

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Réseaux et Télécommunications

### Thème

**Analyse et conception d'une diode laser VCSEL exploitée dans la troisième fenêtre des transmissions optiques**

**Préparé par :**

- Drahmoune Yanis Badri
- Fezoui AbdelKader

**Dirigé par :**

- Melle. ACHOUR Lyakout

**Membres du jury :**

- Mme Bendjelloul
- Mr. Berrah

Année universitaire : 2021/2022



# Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions Dieu, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce travail modeste. Merci Allah de nous avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, le courage, la volonté, la force d'y croire et la patience d'aller jusqu'au bout pour réaliser ce présent travail.*

*Nous tenons tout particulièrement à exprimer notre profond respect, notre gratitude, et nos plus vifs remerciements à notre encadrante Melle L. ACHOUR, sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. De nous avoir aidé à rédiger notre mémoire, d'avoir supervisé ce travail, de nous faire bénéficier de ses grandes compétences, de nous avoir accordée sa confiance, de son aide très précieuse, de nous avoir si généreusement accordé de son temps et de son savoir et de ses conseils.*

*Nous exprimons toute notre gratitude à Madame Bendjelloul et Monsieur Berrah qui nous ont fait l'honneur de faire partie du jury de ce mémoire et en acceptant de siéger à notre soutenance.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements à tous nos enseignants au département ATE (Automatique, Télécommunication et Electronique) de l'université de Bejaia qui ont contribué à notre formation, pour l'ambiance amicale, pour les encouragements et le respect qu'ils nous ont témoignés.*

*Nous remercions tous ceux et toutes celles qui nous ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.*

*Enfin. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles qui nous ont toujours soutenues pour toutes aides morales qu'elles nous ont accordées durant la préparation de ce travail, en particulier nos parents sans qui rien de tout cela n'aurait pu être possible.*

# Dédicaces

*Avec l'expression de ma reconnaissance, Je dédie ce mémoire à ceux qui, quels que soient les termes employés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et l'estime que j'ai toujours eue pour vous. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentie pour mon éducation et ma formation : Mon chère père Brahim.*

*A la femme qui n'a Jamais cessé de me soutenir et de m'épauler pour que Je puisse atteindre mes objectifs, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux. En témoignage, je t'offre ce modeste travail afin de te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée : mon adorable maman Rebiha.*

*A mon bras droit mon très cher frère Ramy, a tous les moments d'enfance passés avec toi mon frère, en gage de ma profonde estime pour l'aide que tu m'as apporté. Tu m'as soutenu, réconforter et encourager. Puissent nos liens fraternels se consolide et se pérennise encore plus.*

*A ma chère sœur Imane et son mari Hassen qui n'ont pas cessée de me conseiller et encourager tout au long de mes études, que dieu les protège et leur offre la chance et tout le bonheur du monde.*

*Merci pour votre amour et soutien.*

***De la part de Drahmoune Yanis Badri***

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma mère Nawel, celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.*

*Mon père Atmane, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.*

*Que dieu les gardes et les protège.*

*Ma Sœur Kenza, mon frère Rafik, mes proches, mes amis.*

*Tous les professeurs et enseignants de l'université de Bejaia.*

*Tous ceux qui m'ont encouragé et ayant collaboré à ce travail.*

***De la part de Fezoui AbdelKader***

# Table des matières

Liste des figures .....	i
Liste des tableaux .....	iii
Liste des abréviations .....	iv
Introduction Générale .....	01
Chapitre I : Généralités sur les lasers à semi-conducteurs .....	03
I.1. Introduction .....	04
I.2. Théorie des bandes .....	04
I.3. Semi-conducteurs .....	05
I.3.1. Semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques .....	05
I.3.1.1. Semi-conducteurs intrinsèques .....	05
I.3.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques .....	06
I.3.2. Semi-conducteur de type n .....	06
I.3.3. Semi-conducteur de type p .....	07
I.3.4. La jonction PN .....	08
I.3.5. La jonction PN polarisée .....	08
I.3.5.1. Polarisation dans le sens inverse .....	08
I.3.5.2. Polarisation dans le sens direct .....	09
I.3.6. Le gap direct et indirect .....	09
I.3.6.1. Semi-conducteurs à gap direct .....	09
I.3.6.2. Semi-conducteurs à gap indirect .....	10
I.3.7. Les alliages semi-conducteurs .....	10
I.3.8. Les hétérostructures .....	11
I.4. Le laser .....	12
I.4.1. Phénomène d'émission et d'absorption dans les semi-conducteurs .....	12
I.4.1.1. L'absorption .....	12
I.4.1.2. L'émission spontanée .....	13
I.4.1.3. L'émission stimulée .....	13
I.4.2. Les compétitions entre les 3 mécanismes .....	14
I.4.3. Principe de fonctionnement d'un laser .....	14
I.4.3.1. Milieu amplificateur ou milieu actif .....	15
I.4.3.2. Pompage .....	15
I.4.3.3. Cavité résonante .....	16
I.4.4. Inversion de population .....	17
I.5. Diode laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) .....	18

I.5.1. Description générale	18
I.5.2. Architecture du composant	19
I.5.3. Matériaux	20
I.5.4. VCSELS aux grandes longueurs d'onde	22
I.5.4.1. Fenêtres de transmission	22
I.5.4.2. Propriétés du matériau	23
I.5.4.3. Les VCSELS et les grandes longueurs d'onde	23
I.5.5. Applications des VCSELS	24
I.5.6. Avantages et inconvénients des VCSELS	24
I.5.6.1. Avantages	24
I.5.6.2. Inconvénients	25
I.6. Conclusion	25
Chapitre II : Etude de l'efficacité des diodes lasers VCSEL au moyen du logiciel	
OPTISYSTEM	26
II.1. Introduction	27
II.2. Informations complémentaires concernant les diodes laser VCSEL	27
II.2.1. Différentes structures de VCSEL	27
II.2.1.1. Zone active à puits quantiques	27
II.2.1.2. Confinement électrique	28
II.2.2. La zone active	30
II.2.2.1. Structure	30
II.2.2.2. Recombinaisons non-radiatives et absorption optique	31
II.2.3. Pompage électrique et pompage optique	31
II.2.3.1. Pompage électrique	31
II.2.3.2. Pompage optique	32
II.2.4. Paramètres basiques du VCSEL	33
II.2.4.1. Courant de seuil	33
II.2.4.2. Puissance optique	33
II.2.4.3. Fréquence de modulation	33
II.3. Simulation d'une transmission optique	34
II.3.1. Système de transmission optique et ses différents composants	34
II.3.2. Critères de qualité d'une transmission optique	34
II.3.2.1. Diagramme de l'œil	34
II.3.2.2. Taux d'erreur binaire BER	35
II.3.2.3. Facteur de qualité	35
II.3.3. Logiciel Optisystem	36
II.3.3.1. Présentation du logiciel	36

II.3.3.2. Description du logiciel .....	36
II.3.4. Simulation d'une chaine de transmission optique en utilisant une diode laser VCSEL .....	37
II.3.4.1 Schéma bloc de la chaine de transmission .....	37
II.3.4.2. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 100 mètres .....	39
II.3.4.2.1. Résultats .....	39
II.3.4.2.2. Observations .....	40
II.3.4.3. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 10 kilomètres .....	41
II.3.4.3.1. Résultats .....	41
II.3.4.3.2. Observations .....	42
II.3.5. Simulation d'une chaine de transmission optique en utilisant une diode Laser conventionnel .....	43
II.3.5.1. Schéma bloc de la chaine de transmission .....	43
II.3.5.2. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 100 mètres .....	43
II.3.5.2.1. Résultats .....	43
II.3.5.2.2. Observations .....	45
II.3.5.3. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 10 kilomètres .....	45
II.3.5.3.1. Résultats .....	45
II.3.5.3.2. Observations .....	47
II.3.6. Bilan obtenu à partir des différentes simulations .....	47
II.4. Comparaison VCSEL / Diode laser conventionnelle .....	47
II.5. Conclusion .....	48
Chapitre III : Conception et simulation d'une diode laser VCSEL à l'aide du Logiciel SILVACO-TCAD .....	49
III.1. Introduction .....	50
III.2. Présentation du logiciel de modélisation numérique SILVACO .....	50
III.2.1. SILVACO ATLAS .....	50
III.2.2. Entrées et Sorties dans SILVACO ATLAS .....	51
III.2.3. ATHENA .....	52
III.2.4. DECKBUILD .....	52
III.2.5. TONYPLOT .....	52
III.2.6. Structure D'entrée dans SILVACO ATLAS .....	53
III.2.7. Langage de commande pour définir une structure .....	55
III.3. Conception et simulation d'un VCSEL avec SILVACO-TCAD .....	56
III.3.1. Première simulation (diode laser VCSEL à 6 puits quantiques) .....	56
III.3.1.1. Spécification de la structure de l'appareil .....	56
III.3.1.1.1. Spécification de maillage .....	56



III.3.1.1.2. Spécification des régions	57
III.3.1.1.3. Spécification des réflecteurs de Bragg distribués	58
III.3.1.1.4. Spécification des puits quantiques	59
III.3.1.1.5. Spécification des électrodes	60
III.3.1.2. Définition du modèle	61
III.3.1.2.1. Spécification des propriétés des matériaux	61
III.3.1.2.2. Spécification du modèle	61
III.3.1.3. Activation de la solution VCSEL	62
III.3.1.3.1. Spécification des paramètres du simulateur	62
III.3.1.3.2. Méthodes numériques	63
III.3.1.4. Les solutions	64
III.3.1.5. Enregistrement et visualisation préliminaire de la structure	64
III.3.1.6. Résultats et discussions	64
III.3.2. Seconde simulation (diode laser VCSEL à 12 puits quantiques)	71
III.3.2.1. Différence entre les deux simulations	71
III.3.2.2. Résultats et discussions	71
III.4. Conclusion	77
Conclusion Générale	78
Références Bibliographiques et Webographiques	79
Résumé	83
Abstract	83

# Liste des figures

Figure I-01 : Schéma des bandes d'énergies dans le cas d'un matériau isolant, semi-conducteur, conducteur, de gauche à droite .....	05
Figure I-02 : Schéma d'un semi-conducteur intrinsèque .....	06
Figure I-03 : Electron délocalisé dans un semi-conducteur de type n .....	07
Figure I-04 : Charge négative excédentaire autour de l'atome de bore (dopage de type p) .....	07
Figure I-05 : Formation d'une jonction PN .....	08
Figure I-06 : Jonction PN polarisée dans le sens inverse .....	08
Figure I-07 : Jonction PN polarisée dans le sens direct .....	09
Figure I-08 : Structure de bande d'énergie du gap direct .....	09
Figure I-09 : Structure de bande d'énergie du gap indirect .....	10
Figure I-10 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonctions .....	11
Figure I-11 : Phénomène d'absorption, d'émission spontanée et d'émission stimulée dans les semi-conducteurs .....	12
Figure I-12 : Le phénomène d'absorption .....	13
Figure I-13 : Le phénomène d'émission spontanée .....	13
Figure I-14 : Le phénomène d'émission stimulée .....	14
Figure I-15 : Schéma d'un système laser .....	14
Figure I-16 : principe du pompage .....	15
Figure I-17 : Schéma d'une cavité résonante .....	16
Figure I-18 : Les deux types de cavité (linéaire et en anneau) .....	16
Figure I-19 : Comportement d'un rayon incliné par rapport à l'axe dans une cavité linéaire .....	17
Figure I-20 : Schéma d'un laser classique comparé avec celui d'un laser à émission par la surface .....	18
Figure I-21 : Structure d'une diode laser émettant par la surface VCSEL .....	19
Figure I-22 : Schéma de principe d'un VCSEL .....	20
Figure I-23 : Matériaux utilisés en fonction de la longueur d'onde .....	21
Figure I-24 : Fenêtres de transmission pour la fibre .....	22
Figure I-25 : Régions de transmission des substrats de fenêtre .....	23
Figure II-01 : Emplacement des puits quantiques dans la cavité : a) structure à zone active centrale, b) structure à gain périodique résonant .....	27
Figure II-02 : structure sans confinement des porteurs .....	28
Figure II-03 : a) VCSEL à implantation de protons ; b) VCSEL à miroir de Bragg oxydé .....	28
Figure II-04 : VCSELs mesa .....	29
Figure II-05 : VCSEL à diaphragme d'oxyde .....	29
Figure II-06 : Diagramme de bande a) de la zone active à multiples puits quantiques et b) d'un puit quantique .....	30
Figure II-07 : Structure de maille de l'InP : a) Forme cristalline b) Maille contrainte et c) Maille étirée .....	31
Figure II-08 : Structure développée par Vertilas .....	32
Figure II-09 : VCSELs accordables à pompage optique : a) structure de l'université de Darmstadt b) structure de BeamExpress .....	32

Figure II-10 : Système de transmission optique .....	34
Figure II-11 : Diagramme de l'œil .....	35
Figure II-12 : Fenêtre principale du logiciel Optisystem .....	36
Figure II-13 : Schéma de la chaine de transmission optique utilisant une diode laser VCSEL comme émetteur optique .....	37
Figure II-14 : Schéma de la chaine de transmission optique avec un Optical power meter .....	38
Figure II-15 : Diagramme de l'œil pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 100m .....	39
Figure II-16 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 100m .....	39
Figure II-17 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 100m .....	40
Figure II-18 : Diagramme de l'œil pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 10Km .....	41
Figure II-19 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 10Km .....	41
Figure II-20 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 10Km .....	42
Figure II-21 : Schéma de la chaine de transmission optique utilisant une diode laser conventionnel comme émetteur optique .....	43
Figure II-22 : Diagramme de l'œil pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 100m .....	43
Figure II-23 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 100m .....	44
Figure II-24 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 100m .....	44
Figure II-25 : Diagramme de l'œil pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 10Km .....	45
Figure II-26 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 10Km .....	46
Figure II-27 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 10Km .....	46
Figure II-28 : Comparaison du VCSEL avec une diode laser émettant par la tranche .....	48
Figure III-01 : Environnement Virtual Wafer Fabrication .....	51
Figure III-02 : Entrées et sorties dans Silvaco Atlas .....	51
Figure III-03 : Menu de commandes de Deckbuild .....	52
Figure III-04 : Fenêtre principale de TonyPlot .....	52
Figure III-05 : Organigramme des étapes de construction d'un model sur ATLAS .....	55
Figure III-06 : Maillage du dispositif VCSEL .....	57
Figure III-07 : Zoom sur la zone active de la diode laser VCSEL .....	59
Figure III-08 : Schéma représentant la structure de la diode laser VCSEL .....	65
Figure III-09 : Schéma représentant la répartition de la température de la diode laser VCSEL ..	65
Figure III-10 : Schéma représentant la répartition de l'intensité lumineuse de la diode laser VCSEL .....	66
Figure III-11 : Schéma représentant le dopage de la diode laser VCSEL .....	66

Figure III-12 : Graph représentant la variation de l'intensité de courant en fonction de la tension (6 puits quantiques) .....	67
Figure III-13 : Graph représentant la variation du gain en fonction de la tension (6 puits quantiques) .....	68
Figure III-14 : Graph représentant la variation de la température en fonction de la tension (6 puits quantiques) .....	69
Figure III-15 : Graph représentant la variation de la longueur d'onde en fonction de la tension (6 puits quantiques) .....	69
Figure III-16 : Graph représentant la variation de la densité de photon en fonction de la tension (6 puits quantiques) .....	70
Figure III-17 : Graph représentant la variation de la puissance émise en fonction de la tension (6 puits quantiques) .....	71
Figure III-18 : Graph représentant la variation de l'intensité de courant en fonction de la tension (12 puits quantiques) .....	72
Figure III-19 : Graph représentant la variation du gain en fonction de la tension (12 puits quantiques) .....	72
Figure III-20 : Graph représentant la variation de la température en fonction de la tension (12 puits quantiques) .....	73
Figure III-21 : Graph représentant la variation de la longueur d'onde en fonction de la tension (12 puits quantiques) .....	74
Figure III-22 : Graph représentant la variation de la densité de photon en fonction de la tension (12 puits quantiques) .....	75
Figure III-23 : Graph représentant la variation de la puissance émise en fonction de la tension (12 puits quantiques) .....	76

## Liste des tableaux

Tableau I-01 : Exemple de semi-conducteur en fonction des éléments des colonnes du tableau périodique .....	11
Tableau I-02 : Tableau comparatif entre VCSELs et EELs .....	20
Tableau I-03 : Longueur d'onde émise en fonction des principaux matériaux utilisés pour l'élaboration des VCSELs .....	21
Tableau I-04 : Applications des VCSELs .....	24
Tableau III-05 : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe .....	54

# Liste des abréviations

**Al** : Aluminium.

**AlAs** : Arséniure d'Aluminium.

**AlGaAs / GaAlAs** : Phospho-Arséniure de Gallium.

**As** : Arsenic.

**BC** : Bande de conduction.

**BER** : Bit Error Rate / taux d'erreur binaire.

**BI** : Bande interdite.

**BV** : Bande de valence.

**DBR** : Distributed Bragg reflector / Réflecteur de Bragg distribué.

**DFB** : Distributed feedback / Rétroaction distribuée.

**EEL** : Edge-Emitting Lasers / Lasers à émission latérale.

**EF** : Niveau de Fermi.

**Ga** : Gallium.

**GaAs** : Arséniure de Gallium.

**In** : Indium.

**InP** : Phosphure D'indium.

**InAlGaAs** : Indium Aluminium Gallium Arsenide.

**InGaAsP** : Indium Gallium Arsenide Phosphide.

**InGaNAs** : Indium Gallium Azote Arsenide.

**LASER** : Light amplification by stimulated emission of radiation / Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.

**LED** : Light-emitting diode / Diode électro-luminescente.

**MQW** : Multi-quantum Well / Multi puits quantiques.

**N** : Azote.

**Optiwave** : Optical Communication System Design Software.

**P** : Phosphore.

**Silvaco** : Silicon Valley Company / Société de la Silicon Valley.

**TCAD** : Technology Computer-Aided Design / Conception assistée par ordinateur.

**VCSEL** : Vertical Cavity Surface Emitting Lasers / Diode laser à cavité verticale émettant par la surface.

**WDM** : Wavelength Division Multiplexing / Multiplexage en longueur d'onde.

# Introduction Générale

De nos jours, la technologie des semi-conducteurs se développe fortement et devient un enjeu important dans le domaine des télécommunications. Les progrès technologiques réalisés dans ce domaine depuis la création du premier composant ont permis le développement d'applications plus diversifiées et performantes [1].

De tous les matériaux, les semi-conducteurs suscitent un intérêt croissant. Cette apparence découle de la richesse de leurs propriétés électroniques. Ils sont pertinents pour la plupart des appareils électriques et optiques. Les développements récents dans les méthodes de croissance des semi-conducteurs ont permis la formation d'alliages semi-conducteurs, tels que les composés III-V, avec différents paramètres de réseau, énergies de bande et composants chimiques. Cela a permis de réaliser des hétéros structures émettrices aux longueurs d'onde des télécommunications.

Les lasers à semi-conducteurs, permettant la science nécessaire et un large éventail de technologies, sont devenus l'un des catalyseurs les plus importants des technologies basées sur la photonique. Les lasers à émission de surface à cavité verticale (VCSEL), une classe essentielle de lasers à semi-conducteurs, sont particulièrement importants pour leur facteur de forme et leurs performances optoélectroniques pour une utilisation en tant que sources optiques dans les communications à haut débit, et des courtes longueurs d'ondes. Par exemple, ces dernières années, VCSEL a été déployé avec des lasers à diode à semi-conducteurs comme source dans des liaisons à fibre optique et des réseaux de centres de données à faible coût. Cela est dû à leurs caractéristiques distinctives, telles qu'une fiabilité élevée, des coûts de production faibles et efficaces, une faible consommation d'énergie, un emballage sans soudure, des seuils de manchon et des courants de fonctionnement fiables, une stabilité à haute température et une fabrication facile de réseaux denses [2].

Le premier laser a vu le jour en 1960, dans un petit laboratoire industriel à Malibu en Californie mais le problème rencontré lors de cette invention été de prendre le principe du laser et l'appliquer dans le domaine optique. Dans les années suivantes, une grande variété de laser vit le jour, fonctionnant avec des milieux et des longueurs d'onde de plus en plus diversifiés [3].

Une grande attention est portée aux sources qui génèrent les signaux optiques. Au début des années 80, de nouvelles techniques sont apparus. Le concept de laser à cavité verticale (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) a été proposé par K.Iga avec pour objectif de remplacer les composants électroniques. L'engouement pour cette nouvelle technologie a été rapide puisqu'elle

présente de nombreux avantages. Néanmoins, sa grande distribution a rencontré certains obstacles, mobilisant encore plus la communauté des chercheurs dans ce domaine [4].

Bien qu'ils aient tendance à être des lasers de puissance inférieure à ceux des diodes lasers conventionnels, les diodes lasers VCSEL offrent une qualité de faisceau supérieure, il existe donc un meilleur compromis en termes de fiabilité et de performances. C'est la raison pour laquelle, nous nous sommes intéressés de près sur les VCSEL dans notre travail, qui s'articulera autour de trois chapitres :

Le premier chapitre traite des généralités sur les semi-conducteurs, ensuite, nous allons voir quelques notions générales sur les lasers et nous nous focaliserons, en particulier sur les lasers à émission de surface à cavité verticale (VCSEL) où nous expliquerons leur principe de fonctionnement, les matériaux utilisés dans leur conception et aussi des rappels sur les fenêtres de transmission optiques.

En deuxième chapitre, nous allons parler plus en détails sur la diode laser VCSEL par la suite nous comparerons entre cette dernière et une diode laser conventionnel à l'aide du logiciel Optisystem et nous terminerons notre présentation, par des commentaires sur les résultats obtenus.

Enfin, dans le troisième chapitre nous présenterons premièrement le logiciel Silvaco-TCAD, puis nous passerons à la conception ainsi que la simulation d'un laser VCSEL à l'aide de ce logiciel, par la suite nous discuterons des résultats obtenus. Enfin, une conclusion générale, viendra clôturer notre travail.

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



## I.1. Introduction

Le mot laser est formé par les initiales de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ce qui correspond en français à une amplification lumineuse par l'émission stimulée des rayonnements électromagnétiques, c'est-à-dire une sorte de focalisateur de photons. L'amplification de la lumière par émission stimulée de photon produit une lumière qui est monochromatique, unidirectionnelle, cohérente et de haute intensité. On distingue plusieurs types de lasers mais ils comprennent tous trois éléments nécessaires qui sont : le milieu actif, l'excitation et l'amplification.

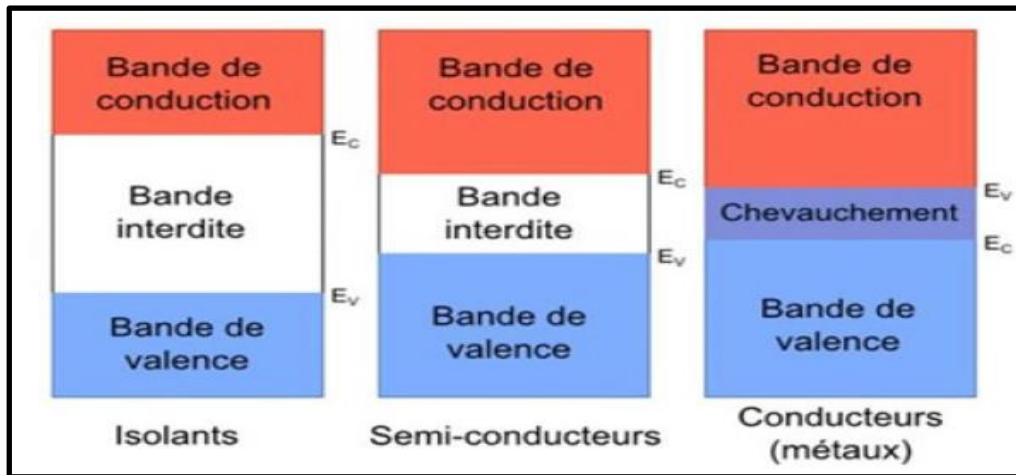
Dans notre chapitre, nous allons voir des généralités sur les semi-conducteurs, les lasers, leurs principes de fonctionnement ainsi que les diodes laser à cavité verticale émettant par la surface exploitée dans la troisième fenêtre des transmissions optiques.

## I.2. Théorie des bandes

Les propriétés électriques d'un matériau sont déterminées par la distribution des charges dans celui-ci. Par exemple, la conduction dépend de l'occupation des électrons dans leurs bandes d'énergies, en effet le remplissage des bandes d'énergie par les populations d'électrons se fait dans le sens énergétique croissant des cases quantiques. Au zéro absolu de température, le plus haut niveau d'énergie occupé est appelé niveau de Fermi  $E_F$ , au-delà de ce niveau, toutes les cases quantiques sont vides, et aux alentours du niveau de Fermi, on distingue donc 3 bandes énergétiques principales :

- La bande de valence  $B_V$  d'énergie  $E_v$  est la bande d'énergie immédiatement sous le niveau de Fermi. La bande de valence est la dernière bande totalement ou partiellement remplie. Autrement dit, les bandes situées en-dessous sont toutes occupées par des électrons.
- La bande de conduction  $B_C$  d'énergie  $E_c$  est la bande d'énergie qui se trouve au-dessus du niveau de Fermi. Au zéro absolu de température, cette bande est vide pour les isolants et les semi-conducteurs ou partiellement pleine pour les conducteurs. L'augmentation de température dans le cas des isolants et des semi-conducteurs permet de faire passer quelques électrons de la bande de valence à la bande de conduction grâce à l'énergie d'activation thermique d'amplitude  $K_B T$  où  $K_B$  dite constante de Boltzmann et  $T$  la température. Les électrons de la bande de conduction peuvent se déplacer dans un champ électrique macroscopique. À noter dans le cas des isolants et des semi-conducteurs que le passage d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction libère une place dans la bande de valence appelé trous.
- La bande interdite  $B_I$  est la bande qui se situe entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction. On définit cette bande uniquement dans le cas des isolants et des semi-conducteurs car dans le cas des conducteurs on dit qu'il existe un chevauchement entre les deux

bandes donc elle n'a pas d'intérêt dans ce cas. La largeur de la bande interdite  $E_g$  est appelée gap ou bandgap et elle est égale à :  $E_g = E_c - E_v$  (eV) [5,6].



*Figure I-01 : Schéma des bandes d'énergies dans le cas d'un matériau isolant, semi-conducteur, conducteur (de gauche à droite) [7]*

### I.3. Semi-conducteurs

Le semi-conducteur est un composé chimique solide, qui peut conduire l'électricité dans certaines conditions mais pas dans d'autres, ce qui en fait un bon moyen de contrôler un courant électrique. En effet, ses propriétés électriques lui permettent à la fois d'être conducteur (comme les métaux) par exemple en chauffant, éclairant ou en le soumettant à une tension électrique, et isolant s'il est pur et au zéro absolu [8].

#### I.3.1. Semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques

Par son habilité à conduire le courant, un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Ça peut varier sur plusieurs ordres de grandeur sous l'effet de la température et/ou de l'éclairement. Un autre facteur modifiant fortement la conductivité est la présence d'impuretés ou le dopage. On distingue deux types de semi-conducteurs [9] :

##### I.3.1.1. Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsqu'il est pur : il ne contient aucune espèce de dopant significative et ses propriétés électriques dépendent uniquement de la structure du matériau. Dans ce type de semi-conducteurs on dit que le nombre d'électrons ( $n$ ) est égal au nombre de trous ( $p$ ) [9].

$$n=p$$

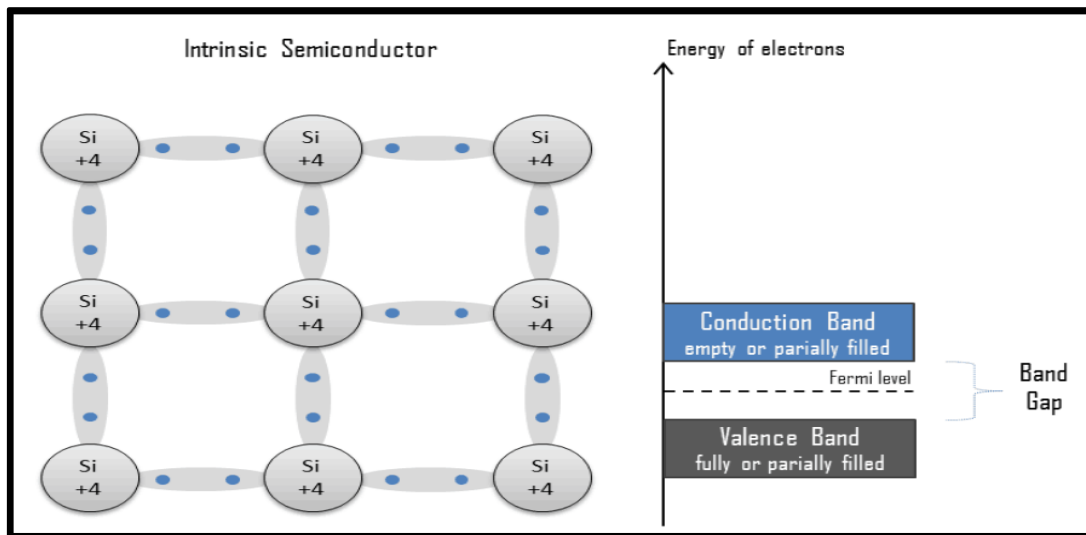


Figure I-02 : Schéma d'un semi-conducteur intrinsèque [10]

### I.3.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque, ou semi-conducteur dopé, est un semi-conducteur, qui a été intentionnellement dopé dans le but de moduler ses propriétés électriques et optiques, le dopage est donc l'introduction intentionnelle d'impuretés dans un semi-conducteur intrinsèque dans le but d'améliorer les qualités de ce dernier. L'ajout d'un petit pourcentage d'atomes étrangers dans le réseau cristallin régulier de silicium ou de germanium produit des changements spectaculaires dans leurs propriétés électriques, car ces atomes étrangers incorporés dans la structure cristalline du semi-conducteur fournissent des porteurs de charge gratuits (électrons ou trous d'électrons) qui transportent le courant électrique à travers le cristal [10].

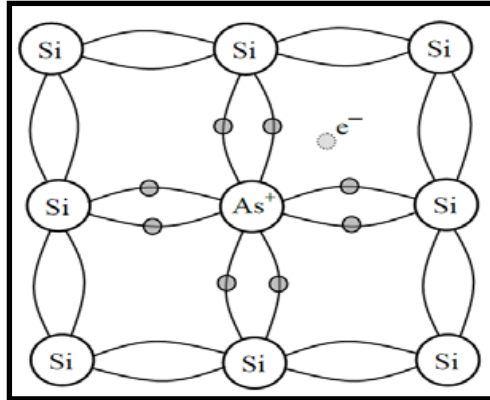
En général, il existe deux types d'atomes de dopant résultant en deux types de semi-conducteurs extrinsèques. Ces dopants qui produisent les changements contrôlés souhaités sont classés comme accepteurs ou donneurs d'électrons par conséquent, lorsqu'on utilise des atomes accepteurs on parle d'un dopage de type p, et lorsqu'on utilise des atomes donneurs il s'agit d'un dopage de type n [10].

- Dopage de type n : les éléments les plus utilisés dans ce dopage sont :
  - P : Phosphore
  - As : Arsenic
- Dopage de type p : les éléments les plus utilisés dans ce dopage sont :
  - B : Bore
  - Ga : Galium

### I.3.2. Semi-conducteur de type n

Dans ce cas, les impuretés injectées sont les atomes pentavalents de la colonne V de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés dans le dopage sont l'arsenic (As) et le phosphore (P), ces éléments possèdent 5 électrons dans la couche de valence. Par exemple

le silicium dopé par des atomes pentavalents tel que l'arsenic (As) est de type  $n$ . Dans le réseau cristallin, l'atome d'arsenic est entouré de 9 électrons dont 8 électrons d'entre eux saturent les orbitales liantes, l'électron restant occupe une orbital délocalisée dans le champ positif de l'ion  $As^+$ . Cela permet d'augmenter la conductivité du semi-conducteur [9].

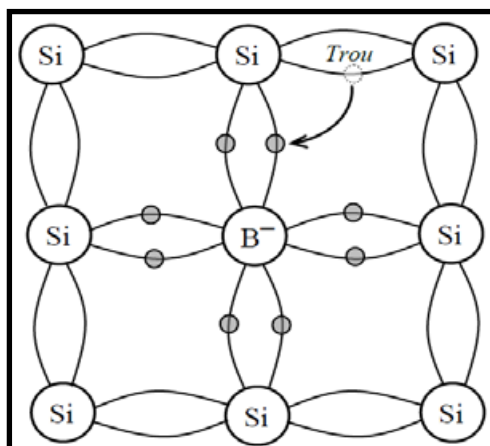


*Figure I-03 : Electron délocalisé dans un semi-conducteur de type n [11]*

Dans ce type de semi-conducteur il est à noter que les électrons sont majoritaires et les trous sont minoritaires et l'ion est +, c'est pour cela qu'on dit que la densité d'électrons  $n$  est supérieure à la densité de trous  $p$  [9].

### I.3.3. Semi-conducteur de type p

Dans ce cas, les impuretés injectées sont les atomes trivalents de la colonne III de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus utilisés dans le dopage sont le Bore (B) et le gallium (Ga). Le Bore possède 3 électrons dans la couche de valence, le dopage d'un semi-conducteur, le silicium par exemple (4 électrons de valence), par des atomes de Bore permet, à température ambiante, d'une part la création d'un trou dans la bande de valence et d'autre part l'apparition d'une charge négative excédentaire autour de l'atome de Bore. L'atome de Bore est considéré dans ce cas un élément accepteur d'électrons [9].



*Figure I-04 : Charge négative excédentaire autour de l'atome de bore (dopage de type p) [11]*

Dans ce type de semi-conducteur il est à noter que les trous sont majoritaires et les électrons sont minoritaires et l'ion est -, la densité de trous  $p$  est supérieure à la densité d'électron  $n$  [9].

### I.3.4. La jonction PN

A la mise en contact de deux semi-conducteurs dopés respectivement n et p, on réalise ce qu'on l'appelle une jonction p-n. Au voisinage de la zone de contact, les électrons en excès dans la zone dopée n ont tendance à migrer au bord de la zone dopée p, et inversement pour les trous. La région située au voisinage de la zone de contact se charge alors positivement d'un côté et négativement de l'autre (positivement à côté de la zone dopée n et négativement à côté de la zone dopée p). Il s'établit un champ électrique statique interne  $E_{int}$  qui s'oppose au mouvement des charges [11].

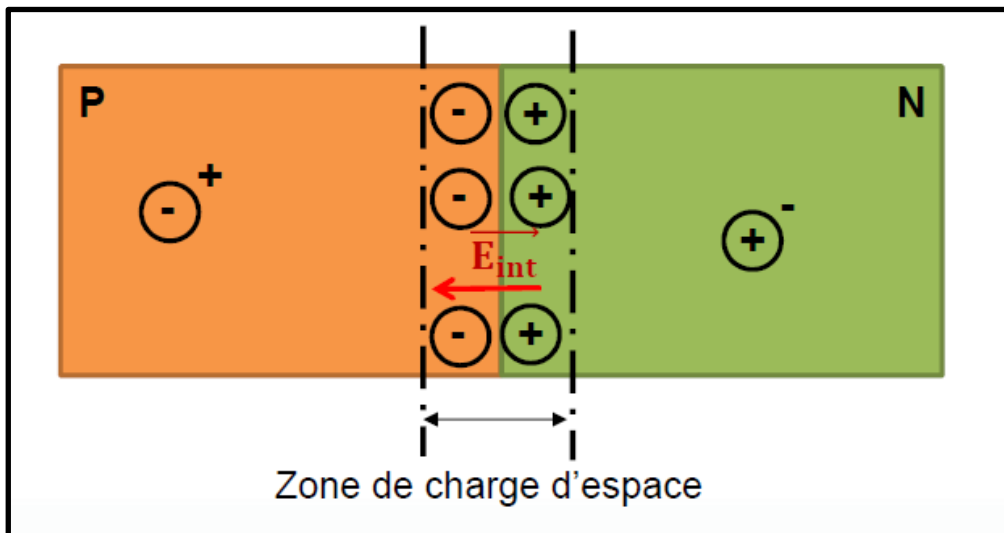


Figure I-05 : Formation d'une jonction PN [11]

### I.3.5. La jonction PN polarisée

#### I.3.5.1. Polarisation dans le sens inverse

Le + du générateur est relié à la zone N et le - à la zone P.

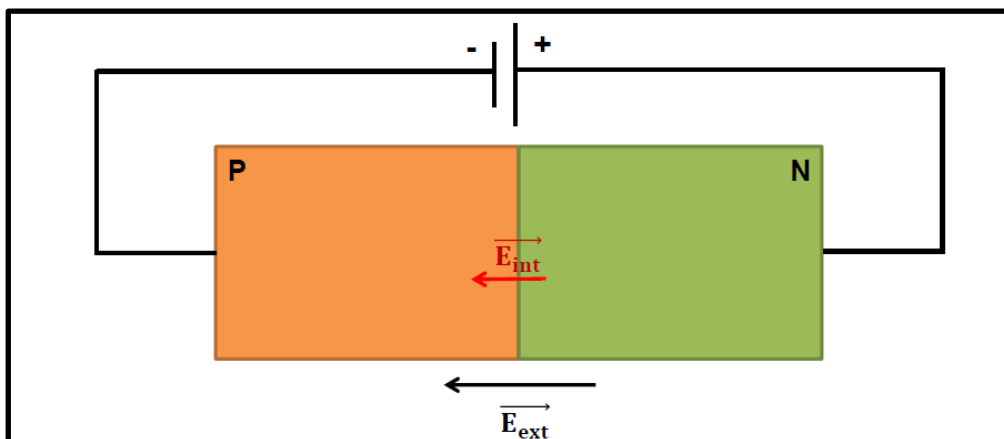


Figure I-06 : Jonction PN polarisée dans le sens inverse [11]

Le champ électrique extérieur  $E_{ext}$  appliqué par le générateur a le même sens que le champ interne de la jonction  $E_{int}$ , ceci va provoquer une augmentation dans la valeur de la différence de potentiel donc aucun courant ne circule (en réalité un courant très faible existe de l'ordre du nanoampère) [11].

### I.3.5.2. Polarisation dans le sens direct

Le - du générateur est relié à la zone N et le + à la zone P.

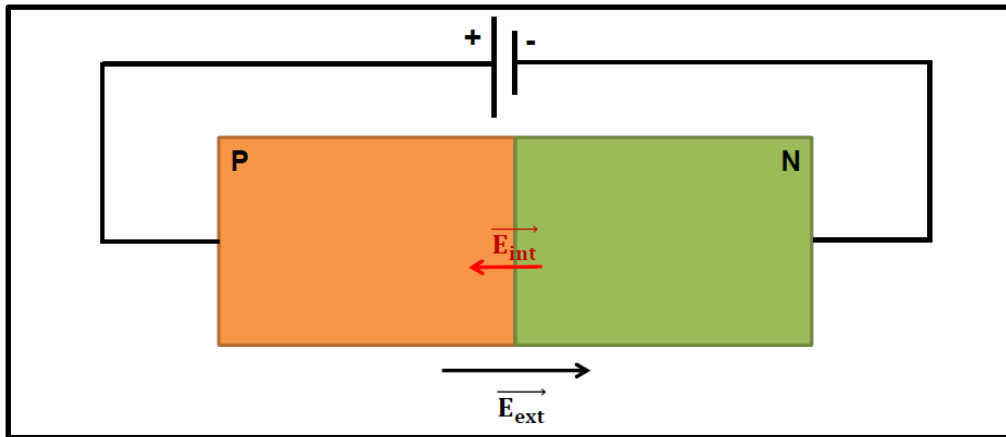


Figure I-07 : Jonction PN polarisée dans le sens direct [11]

Le champ électrique extérieur  $E_{ext}$  s'oppose au champ interne  $E_{int}$  on dit alors que la différence de potentiel diminue donc les électrons peuvent facilement se déplacer ce qui implique alors la présence d'un courant électrique qui peut traverser la jonction [11].

### I.3.6. Le gap direct et indirect

#### I.3.6.1. Semi-conducteurs à gap direct

Dans les semi-conducteurs à gap direct, le maximum de la bande de valence ( $B_V$ ) et le minimum de la bande de conduction ( $B_C$ ) se situent à valeur voisine (même vecteur d'onde  $K$ ), et aussi la transition électronique entre le haut de la bande de valence ( $B_V$ ) et le bas de la bande de conduction ( $B_C$ ) conserve le vecteur d'onde  $\Delta k = 0$  et on n'aura pas un changement dans la quantité de mouvement qui s'exprime comme suit :  $\Delta p = \hbar \Delta k = 0$  [12].

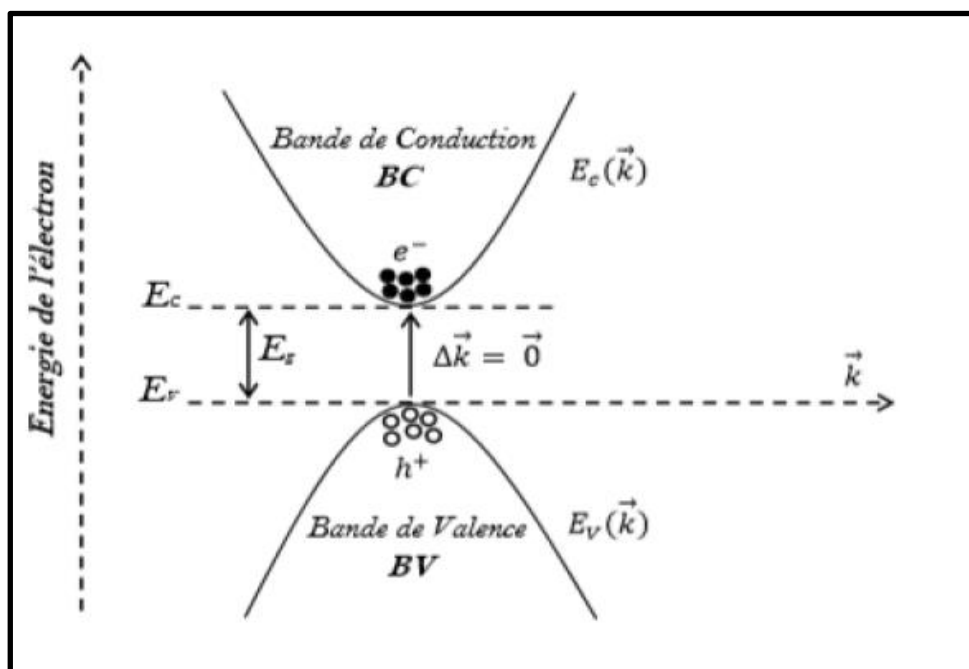


Figure I-08 : Structure de bande d'énergie du gap direct [12]

$K$  : est le vecteur d'onde associé à l'électron.

$E_c$  et  $E_v$  : sont respectivement l'énergie minimum de la bande de conduction et l'énergie maximum de la bande de valence.

$E_g$  : est l'énergie de gap.

### I.3.6.2. Semi-conducteurs à gap indirect

Dans le cas des semi-conducteurs à gap indirect , le minimum de la bande de conduction ( $B_C$ ) est situé à une distance  $\Delta k \neq 0$  du maximum de la bande de valence ( $B_V$ ) , et aussi la transition électronique entre le haut de la bande de valence ( $B_V$ ) et le bas de la bande de conduction ( $B_C$ ) est accompagné par un changement dans la quantité de mouvement  $\Delta p$  ce qui implique le vecteur d'onde n'est pas conservé , cela nous conduit à déterminer les expressions suivantes :  $\Delta k \neq 0$  et aussi  $\Delta p = \hbar\Delta k \neq 0$  [12].

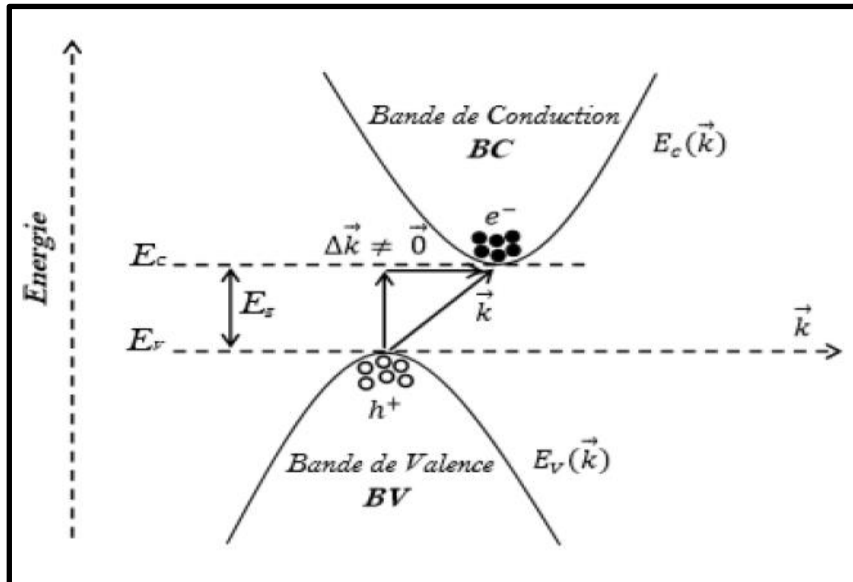


Figure I-09 : Structure de bande d'énergie du gap indirect [12]

### I.3.7. Les alliages semi-conducteurs

Afin d'adapter les propriétés d'un semi-conducteur aux exigences des applications auxquelles il est destiné, on réalise des alliages à partir de plusieurs composées, ces semi-conducteurs composites présentent un grand intérêt notamment ceux du groupe III-V (accepteurs-donneurs respectivement) qui sont largement utilisées en optoélectronique pour la fabrication de diodes électroluminescentes (LED, diodes lasers...) vue leurs robustesses, leurs conductivité thermiques élevée et une bande interdite directe (gap direct).

Les alliages semi-conducteurs sont répartis par rapports au nombre de matériaux présent dans leur composition en alliages on peut alors trouver des alliages binaires, ternaire, quaternaire ou même quinaire. Le tableau suivant donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau périodique des éléments [13].

Tableau I-01 : Exemple de semi-conducteur en fonction des éléments des colonnes du tableau périodique [13]

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	$Cd_xHg_{1-x}Te$

### I.3.8. Les hétérostructures

Une structure ou jonction constituée de deux semi-conducteurs différents (par exemple silicium et germanium) est une hétérojonction. Quand les deux semi-conducteurs sont du même type p ou n on parle d'une hétérojonction isotype, dans le cas contraire on a une hétérojonction anisotype.

Les bandes interdites des deux semi-conducteurs étant différentes, le diagramme d'énergie de l'hétérojonction présente des discontinuités (offsets) de jonction des bandes de conduction ou de valence c'est-à-dire des sauts de potentiel.

Pour réaliser une hétérojonction on fait croître une couche du semi-conducteur 2 sur le semi-conducteur 1. Pour cela il faut que :

- Les deux semi-conducteurs présentent la même symétrie dans le plan de l'interface.
- Que les paramètres cristallins soient voisins.
- Que les coefficients de dilatation thermiques soient proches [14].

Les hétérostructures sont classées en différents types suivant le type d'offset qui se produit à l'hétérojonction abrupte du semi-conducteur. Dans l'hétérojonction de type I (Figure I-10-a), les offsets pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petit gap. Les hétérojonctions de type II sont à gap décalé (Figure I-10-b), ou à gap brisé (Figure I-10-c). Dans ces situations, électrons et trous sont alors séparés dans l'espace, avec les électrons diffusant dans un matériau et les trous dans l'autre [15].

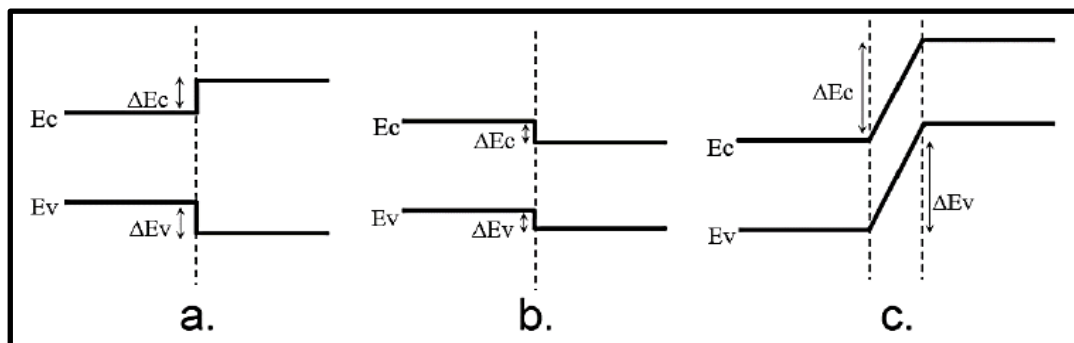


Figure I-10 : Diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonctions [15]



La particularité des composants à hétérostructures résulte de leur capacité à contrôler le flux et la distribution des électrons et des trous à travers ces décalages de bandes, leurs progrès n'ont été rendus possibles que par l'avancée des techniques d'épithaxie, et notamment de l'épithaxie par jets moléculaires [15].

## I.4. Le laser

Les trois principaux composants d'un laser sont les suivants : un milieu actif, un système d'excitation qui est le pompage et une cavité résonante.

### I.4.1. Phénomène d'émission et d'absorption dans les semi-conducteurs

Les phénomènes d'émission et d'absorption peuvent être regroupés dans un groupe de phénomène appelé « les phénomènes de transitions dans les semi-conducteurs ». On sait bien que l'énergie de l'atome peut changer, via des transitions électroniques. Concrètement, cela concerne au moins un de ses électrons, qui effectue une transition d'un état d'énergie à un autre. Dans le cadre d'une interaction lumière/matière, ces transitions font intervenir des particules lumineuses, les photons [16].

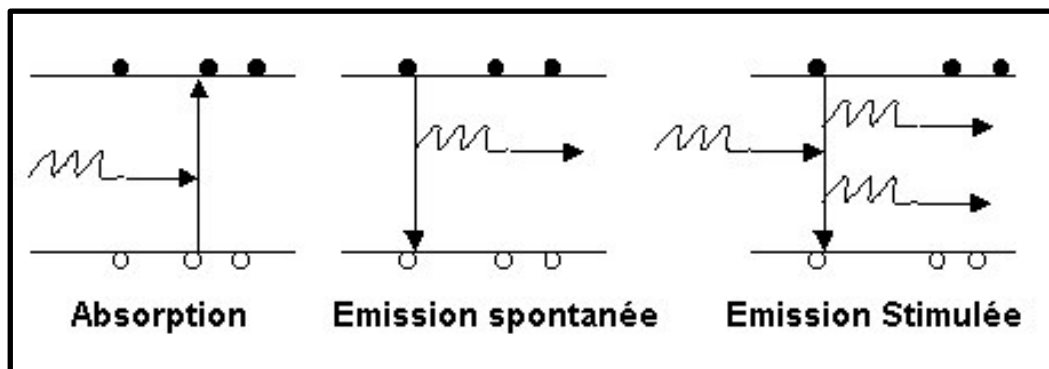


Figure I-11 : Phénomène d'absorption, d'émission spontanée et d'émission stimulée dans les semi-conducteurs [16]

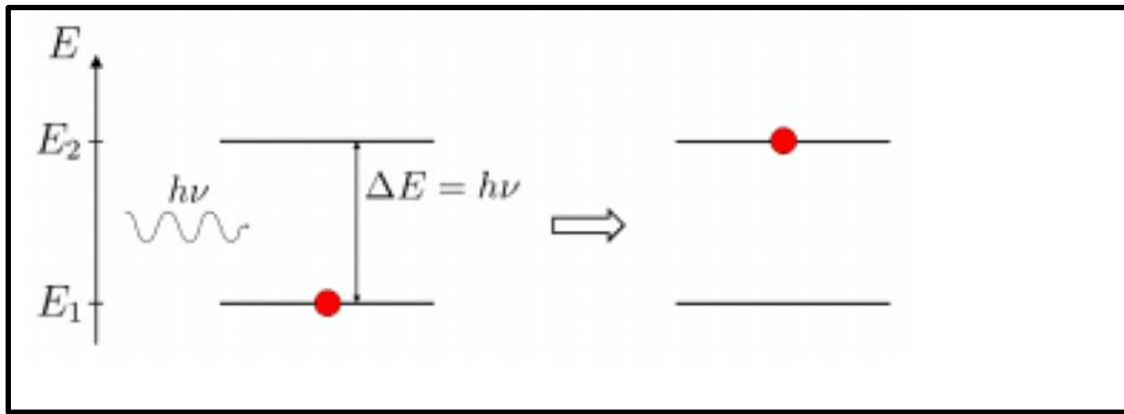
#### I.4.1.1. L'absorption

Un atome est constitué d'un noyau, de protons, de neutrons et des électrons qui gravitent autour du noyau selon une trajectoire bien définie. Un électron se trouve forcément sur une orbite définie, chaque orbite possède un niveau d'énergie. On regarde alors deux niveaux d'énergie,  $E_1$  et  $E_2$  où  $E_1 < E_2$ .

On dit alors que le phénomène d'absorption est le passage d'un électron du niveau inférieur  $E_1$  vers un niveau supérieur  $E_2$  en absorbant un photon incident d'énergie [17] :  $E_p = h\nu = E_2 - E_1$

$h$  : Constante de Planck  $\approx 4,135\ 667\ 662 \times 10^{-15} \text{ eV s}$

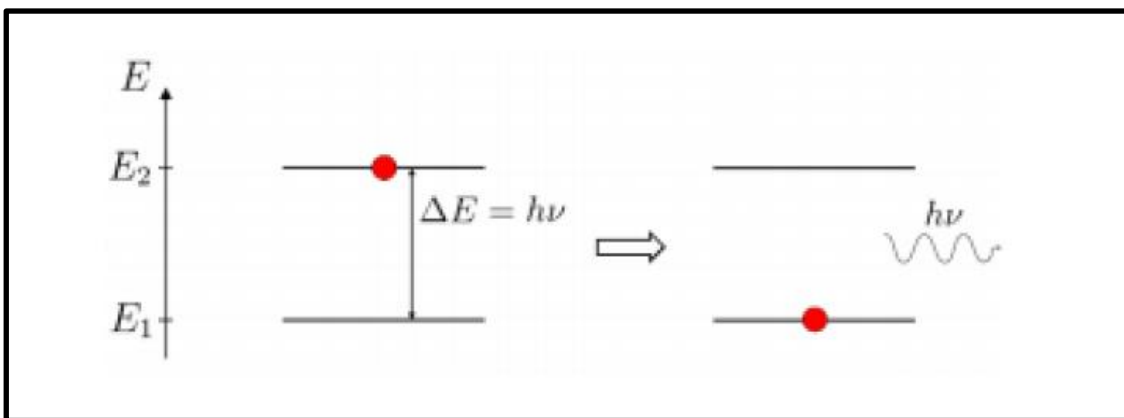
$\nu$  : La fréquence du photon



*Figure I-12 : Le phénomène d'absorption [18]*

#### I.4.1.2. L'émission spontanée

Lorsqu'un électron se trouve sur un niveau excité, il cherche naturellement à retourner vers son niveau de plus basse énergie. Pour cela, il émet un ou plusieurs photons afin de descendre de niveau en niveau, jusqu'au niveau fondamental. Chaque photon émis de cette manière part dans une direction aléatoire, on dit alors que ces photons ont la même énergie, même fréquence, même longueur d'onde mais les ondes associées à ces photons ne sont pas en phase donc le faisceau lumineux est monochromatique mais incohérent et c'est ce phénomène qu'on trouve dans le cas d'une LED [17,18].



*Figure I-13 : Le phénomène d'émission spontanée [18]*

#### I.4.1.3. L'émission stimulée

Comme dans le cas de l'émission spontanée, un électron passe d'un état excité  $E_2$  vers un état de plus basse énergie  $E_1$ , mais cette fois cette émission est stimulée par un rayonnement incident stimulateur ayant une énergie  $h\nu$ . Il en résulte deux photons parfaitement identiques de même énergie, même fréquence et de même longueur d'onde. Les ondes associées à ces photons sont en phase donc le faisceau lumineux est monochromatique cohérent et c'est ce phénomène qu'on trouve dans les lasers.

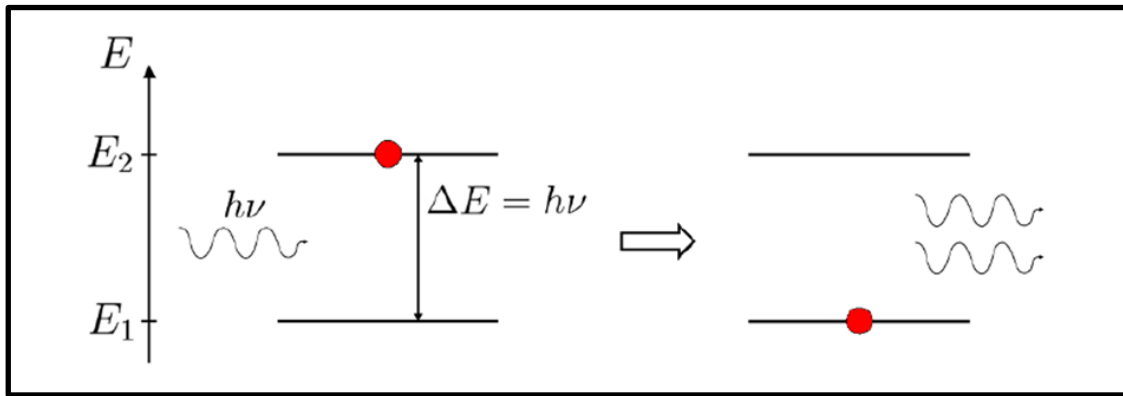


Figure I-14 : Le phénomène d'émission stimulée [18]

### I.4.2. Les compétitions entre les 3 mécanismes

Pour une transition radiative, les trois mécanismes sont toujours présents en même temps. Pour faire un milieu laser, il faut donc trouver des conditions qui permettent de privilégier l'émission stimulée au détriment de l'absorption et de l'émission spontanée.

- Un photon incident d'énergie  $h\nu$  a autant de chance d'être absorbé par un électron du niveau du bas que d'être dupliqué (ou amplifié) par interaction avec un électron du niveau du haut. L'absorption et l'émission stimulée sont vraiment deux processus réciproques soumis aux mêmes probabilités. Pour favoriser l'émission stimulée au détriment de l'absorption, la solution est de jouer sur les populations des niveaux : il faut s'arranger pour avoir plus d'électrons sur le niveau du haut que sur le niveau du bas.
- L'émission spontanée a tendance à vider naturellement le niveau du haut. Il faut donc trouver un moyen de vider le niveau du haut plus vite par émission stimulée que par émission spontanée. Or il se trouve que l'émission stimulée est d'autant plus probable lorsque le milieu est éclairé avec un grand nombre de photons semblables. L'astuce va donc consister à éclairer fortement le milieu, un bon moyen pour cela est le confinement des photons dans une cavité [19].

### I.4.3. Principe de fonctionnement d'un laser

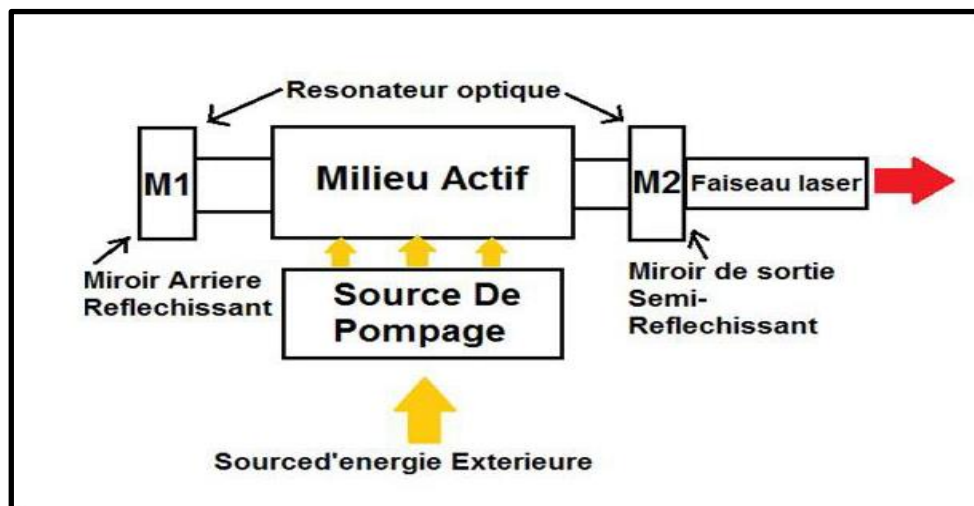


Figure I-15 : Schéma d'un système laser [20]

Un système laser se compose fondamentalement de trois parties principales : un milieu amplificateur, un système d'excitation du milieu actif, et une cavité résonante limitée par deux miroirs comme montré sur le schéma ci-dessus.

### I.4.3.1. Milieu amplificateur ou milieu actif

Celui-ci peut être de différents types, gaz, solide voir liquide. Il renferme les particules excitées, atomes, molécules, ions ou électrons dont les niveaux d'énergie sont utilisés pour accroître la puissance d'une onde lumineuse au cours de sa propagation. Le principe physique mis en jeu est l'émission stimulée [20].

### I.4.3.2. Pompage

Il permet de créer les conditions d'une amplification lumineuse en apportant l'énergie nécessaire au milieu. Le système de pompage peut être de différentes natures : pompage optique (LED, lampes flash, diodes laser ou autres lasers ...) ou bien électrique (courant électrique dans des semi-conducteurs ... etc.) [20]. Les états électroniques se distinguent selon l'énergie conservée par l'atome on les représente sur une échelle d'énergies, où les niveaux de faible énergie sont en bas de l'échelle, tandis que les niveaux de grande énergie sont en haut. La lumière permet de modifier les états électroniques vers les basses énergies, ou bien vers les hautes énergies. Dans ce second cas, les électrons représentés sur l'échelle d'énergie deviennent progressivement plus nombreux dans les hautes énergies [21]. Dans une population d'électrons en équilibre thermique, ce sont les niveaux d'énergie les plus bas qui sont les plus peuplés. Lorsqu'un processus de pompage produit un peuplement majoritaire d'électrons de hautes énergies, on dit qu'on a réalisé une inversion de population.

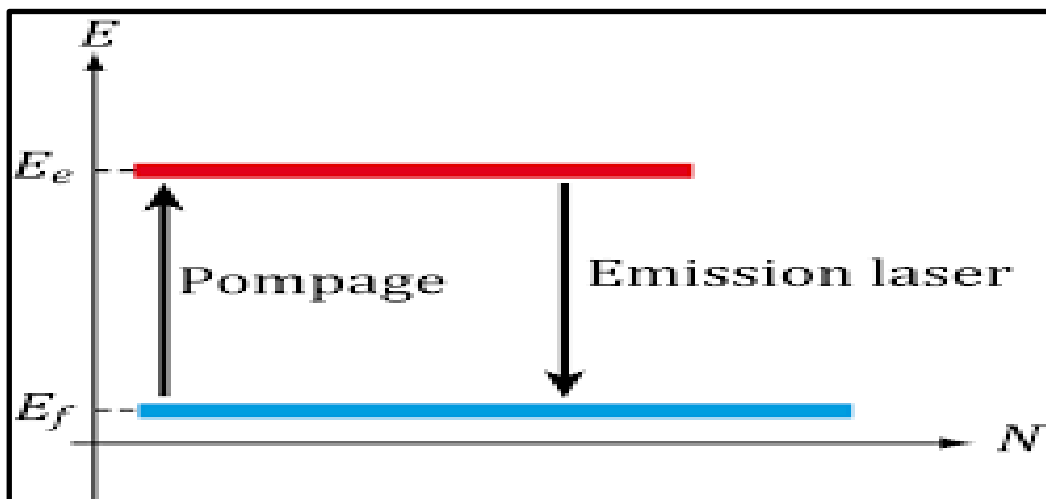
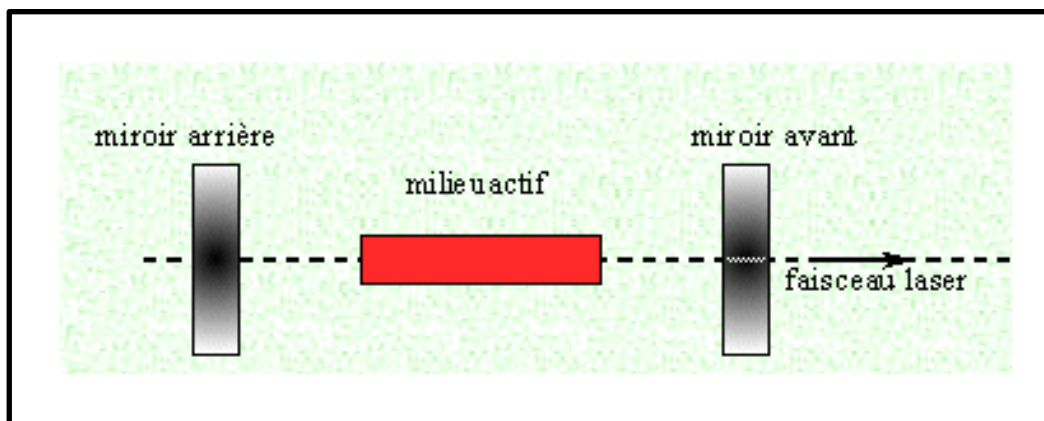


Figure I-16 : principe du pompage [21]

### I.4.3.3. Cavité résonante

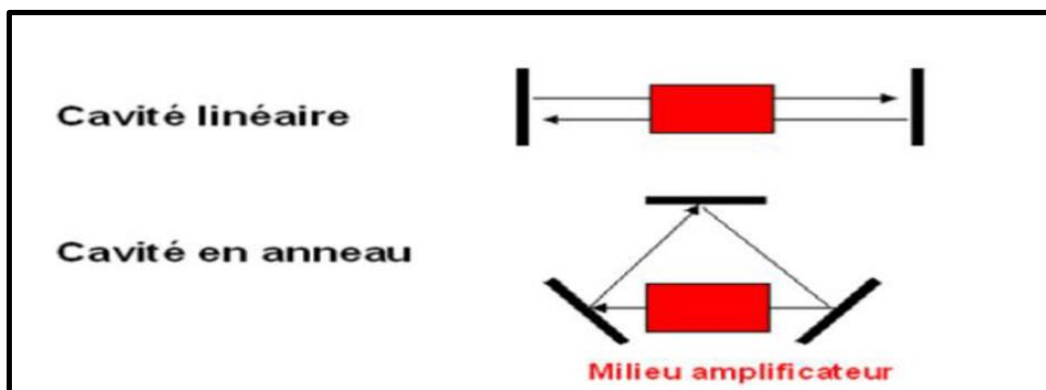
Avant d'être un milieu amplificateur de lumière, un milieu laser pompé par une source d'énergie extérieure est d'abord une LED par émission spontanée. C'est la cavité qui va créer les conditions favorables pour que l'émission stimulée devienne prédominante par rapport à l'émission spontanée. La cavité ou résonateur optique est composée de deux miroirs l'un est réfléchissant et l'autre est semi réfléchissant qui permettent à la lumière de passer de nombreuses fois dans le milieu amplificateur afin d'obtenir des niveaux d'amplification considérables. Le miroir de sortie permet d'extraire une partie de l'onde lumineuse et réfléchit le reste du rayon de la cavité afin de pouvoir utiliser le rayonnement [22].



*Figure I-17 : Schéma d'une cavité résonante [23]*

On peut trouver deux types de cavités :

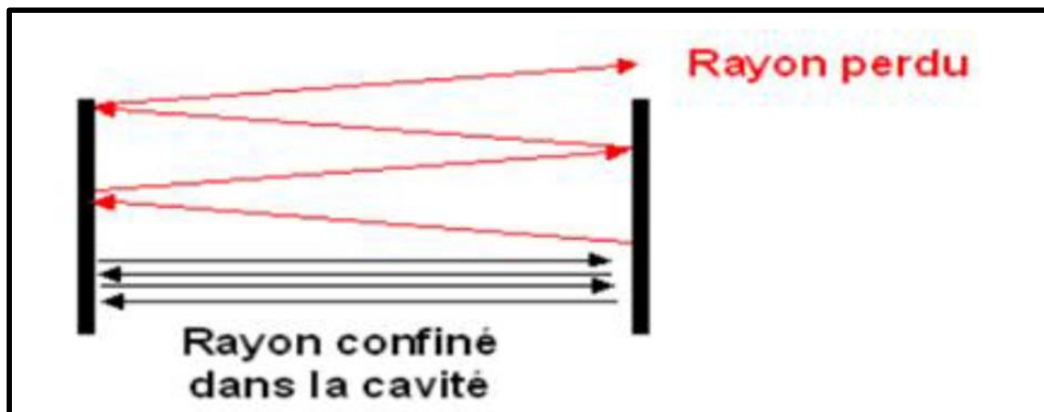
- Des cavités dites « linéaires » (la lumière fait des allers et retour).
- Des cavités en anneau (la lumière fait des tours).



*Figure I-18 : Les deux types de cavité (linéaire et en anneau) [20]*

Cependant, il existe une petite partie de l'émission qui se trouve dans l'axe de la cavité laser. Ces photons spontanés peuvent donc y faire des allers et retours. Au fur et à mesure, le milieu amplificateur va jouer son rôle et la quantité de lumière présente dans la cavité va augmenter de façon considérable. Le confinement de la lumière va ainsi accroître la probabilité d'émission stimulée, au détriment de l'émission spontanée. En parallèle, la cavité va jouer le rôle de filtre à cause des multiples allers et retours : seule l'onde parfaitement perpendiculaire à l'axe de la cavité

pourra se propager et certaines fréquences seront privilégiées (fréquences de résonance de la cavité). Ainsi, la cavité donne au rayonnement laser ses propriétés si particulières (directivité, finesse spectrale). [22].



*Figure I-19 : Comportement d'un rayon incliné par rapport à l'axe dans une cavité linéaire [20]*

Au bout de plusieurs dizaines de milliers d'allers et retours (en général), la quantité de photons générée dans l'axe de la cavité par émission stimulée va être devenue égale à celle qui est perdue (en particulier via le miroir de sortie). Il va donc y avoir un état stationnaire pour lequel un rayonnement (dit rayonnement laser) sort de façon continue par le miroir de sortie [22].

#### I.4.4. Inversion de population

Pour que la production de lumière laser par émission stimulée soit efficace, il faut qu'il y ait plus d'électrons dans l'état excité que dans l'état fondamental :

$$N_2 > N_1$$

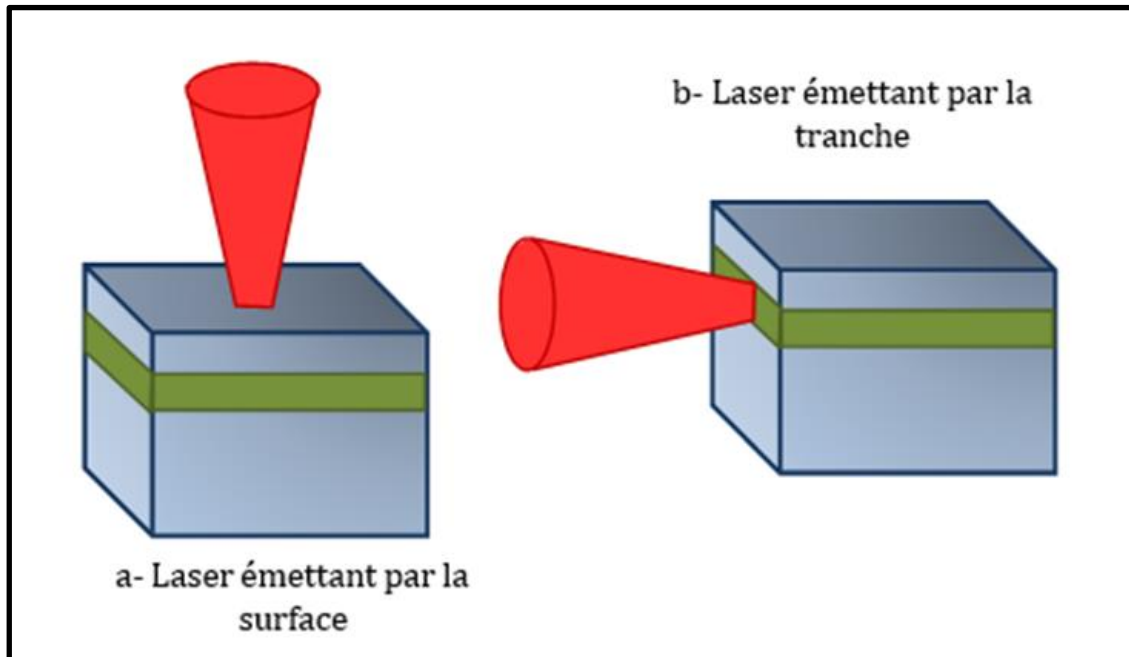
Or, dans la matière, le nombre d'électrons dans l'état fondamental  $N_1$  est très supérieur au nombre d'électrons dans un état excité  $N_2$ . En effet, si l'on considère un atome possédant un niveau fondamental, d'énergie  $E_1$  et des niveaux excités d'énergie  $E_2 > E_1$ . Alors, à l'équilibre thermodynamique et à la température  $T$ , la répartition des populations des porteurs de charges sur les niveaux est donnée par la loi de Boltzmann [23] :

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{K_b T}\right) \quad \dots(\text{I.1})$$

Avec le seul effet thermique, il n'est donc pas possible de provoquer assez d'émission stimulée pour produire de la lumière laser. Il faut trouver un moyen de renverser la tendance thermique et d'obtenir plus d'électrons dans un niveau d'énergie excité que dans le niveau fondamental. Ce processus est appelé inversion de population. Obtenir l'inversion de population nécessite donc une énergie d'excitation externe pour créer plus d'électrons excités que d'électrons non excités [24].

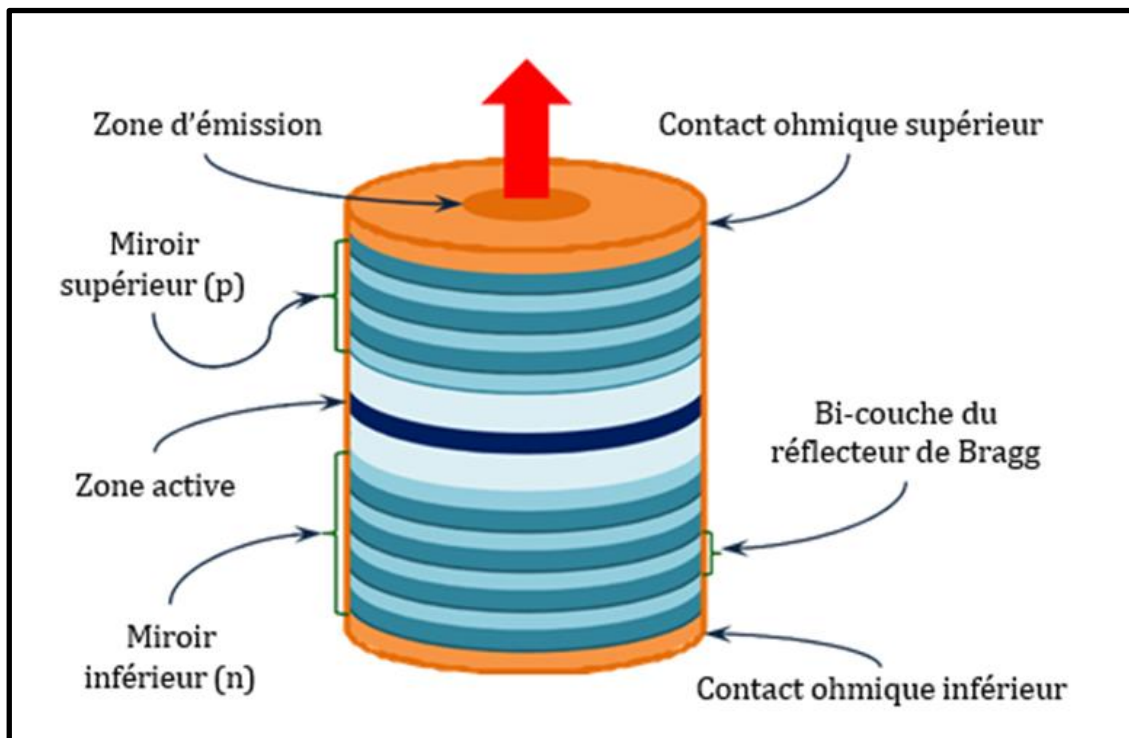
## I.5. Diode laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL)

### I.5.1. Description générale



*Figure I-20 : Schéma d'un laser classique comparé avec celui d'un laser à émission par la surface [25]*

Dans un laser à semiconducteur conventionnel, l'émission laser est perpendiculaire à l'injection des porteurs, ces lasers émettent horizontalement par la tranche (Figure I-20-b). Cette caractéristique présente plusieurs problèmes d'adaptation dans certaines applications. Par exemple, dans les liaisons optoélectroniques, les lasers conventionnels ne sont pas adaptés à la miniaturisation des modules d'émission ; ils ne peuvent pas, non plus, être utilisés aisément dans un système de transmission sur plusieurs canaux parallèles. Ces inconvénients, ont stimulé la création d'une nouvelle technologie qui puisse répondre à ces besoins. Les lasers à cavité verticale émettant par la surface, VCSELs (de l'anglais vertical-cavity surface-emitting laser) présentent des structures émettant suivant un axe perpendiculaire au plan de masse, c'est-à-dire dont la cavité est perpendiculaire à la jonction P-N. Dans un VCSEL, la cavité optique est définie par des réflecteurs de Bragg constitués par des couches alternant forts et faibles indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  de part et d'autre de la jonction P-N. L'axe résonateur est alors l'axe vertical permettant l'émission laser par la surface de la structure (Figure I-20-a et Figure I-21) [25].



*Figure I-21 : Structure d'une diode laser émettant par la surface VCSEL [25]*

La présence de miroirs permet aux photons d'osciller dans la cavité et de sortir par une des surfaces. La longueur de la zone active dans un VCSEL étant plus faible que dans un laser conventionnel, les miroirs doivent avoir un coefficient de réflexion très élevé. Par exemple, pour un VCSEL comme celui de la (Figure I-21), le coefficient de réflexion est de 99% pour le miroir supérieur et de 99,99% pour le miroir inférieur. Le dopage positif du miroir supérieur et négatif du miroir inférieur permet la circulation du courant de polarisation à travers les réflecteurs de Bragg. Ils jouent le rôle d'un filtre sélectif pour permettre l'émission d'une longueur d'onde déterminée.

L'injection de porteurs se fait par l'intermédiaire de deux électrodes, situées au-dessus du miroir supérieur et en dessous du substrat. L'ouverture circulaire au centre de l'électrode supérieure sert à laisser passer la lumière dans le sens vertical. La zone active dans un VCSEL est constituée de puits quantiques distribués dans une double hétérostructure, cela permet de réduire fortement le courant de seuil et l'épaisseur de la cavité [25].

### **I.5.2. Architecture du composant**

L'originalité du concept proposée par K. Iga permet aux VCSELs de se distinguer selon plusieurs critères. Tout d'abord, l'idée est de concevoir un laser totalement monolithique, c'est à dire sans interruption du procédé de fabrication. Pour cela, on fait croître des couches de semiconducteurs sur un substrat appelé « wafer », comme le montre la (Figure I-22-a). Ces couches, qui sont élaborées par épitaxie, comprennent une zone de gain optique associée à deux miroirs, appelés réflecteurs de Bragg qui sont dopés pour assurer la bonne mobilité des porteurs.



Ensuite, à la différence des autres sources laser à semi-conducteurs, les VCSELs sont des composants dont le faisceau laser est émis par la surface, dans une direction perpendiculaire au plan de croissance des couches semiconductrices.

De plus, la structure présente la particularité de faire traverser les électrons à travers les miroirs de Bragg afin de les faire pénétrer dans la zone de gain. De ce fait, les électrons et les photons circulent dans la même direction, ce que présente la (Figure I-22-b).

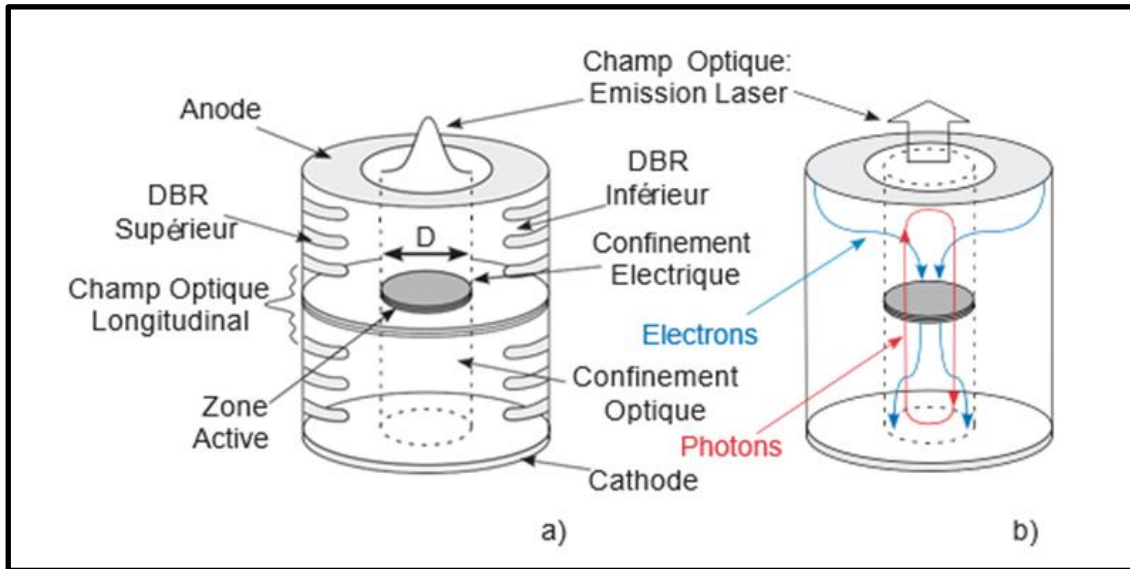


Figure I-22 : Schéma de principe d'un VCSEL [26]

Enfin, la géométrie de ces sources est pour la première fois réalisée de façon cylindrique. Par contre, leurs dimensions sont beaucoup plus faibles comparées aux émetteurs par la tranche (EELs : Edge Emitting Lasers) tels que les DFB ou les DBR comme le montre le (Tableau I-02) [26].

Tableau I-02 : Tableau comparatif entre VCSELs et EELs [26]

Paramètre	Symbole	EEL	VCSEL
Volume de la zone active	$V_{act}$	$60\mu\text{m}^3$	$1,3\mu\text{m}^3$
Longueur de cavité	$L_{act}$	$300\mu\text{m}$	$1\lambda$
Reflectivité des miroirs	$R_m$	0,3	$> 0,99$
Confinement longitudinal	$\Gamma$	50%	3%
Durée de vie photonique	$\tau_p$	1ps	$>3\text{ps}$
Fréquence de résonance à faible courant de polarisation	$F_r$	$<5\text{GHz}$	$>10\text{GHz}$

### I.5.3. Matériaux

Dans la conception de VCSELs à grande longueur d'onde, les matériaux les plus communément utilisés sont composés de InGaAsP ou InAlGaAs sur substrat d'InP. Mais il est également possible de trouver des structures composées en InGaAs et GaInAsSb, sur substrat de GaAs car la technologie en GaAs est bien maîtrisée. La (Figure I-23) présente les matériaux utilisés selon la longueur d'onde avec leur substrat respectif jusqu'à  $2\mu\text{m}$  [26].

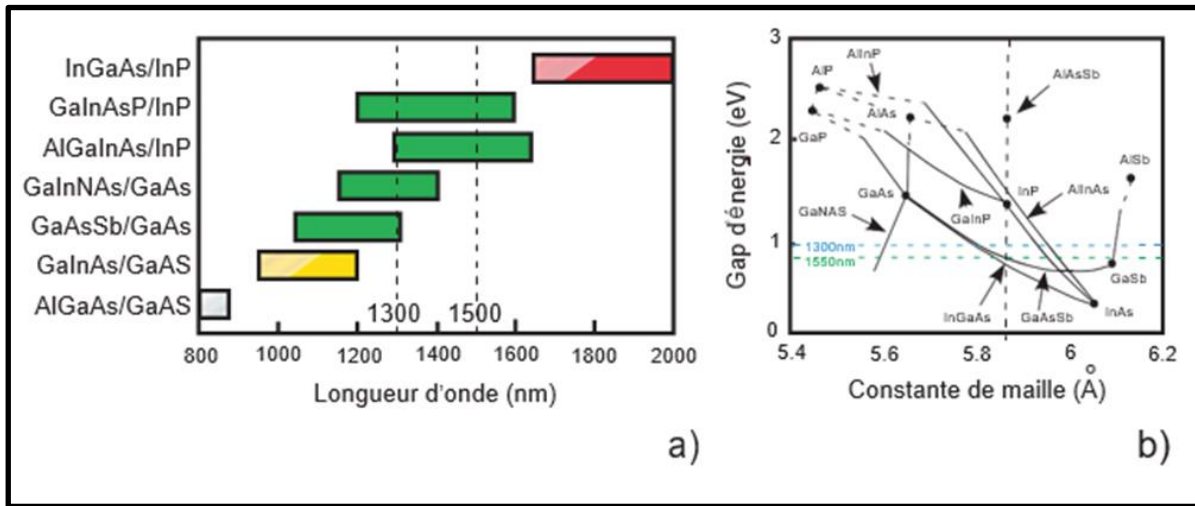


Figure I-23 : Matériaux utilisés en fonction de la longueur d'onde [26]

On constate donc que seuls les matériaux InGaAlAs et InGaAsP sur InP sont capables de couvrir les deux longueurs d'onde utilisées dans les télécommunications. Ils représentent ainsi un atout majeur pour la fabrication de masse et sont utilisés par les principaux fabricants de VCSELs à 1,3 et 1,55 $\mu$ m. Le choix des matériaux présentés dans la (Figure I-23) découle d'un bon compromis entre une zone active à fort gain et la capacité de concevoir des miroirs performants [26].

Le (Tableau I-03) illustre les différents matériaux qui peuvent être utilisés pour la fabrication des VCSELs, selon la longueur d'onde désirée [25].

Tableau I-03 : Longueur d'onde émise en fonction des principaux matériaux utilisés pour l'élaboration des VCSELs [25]

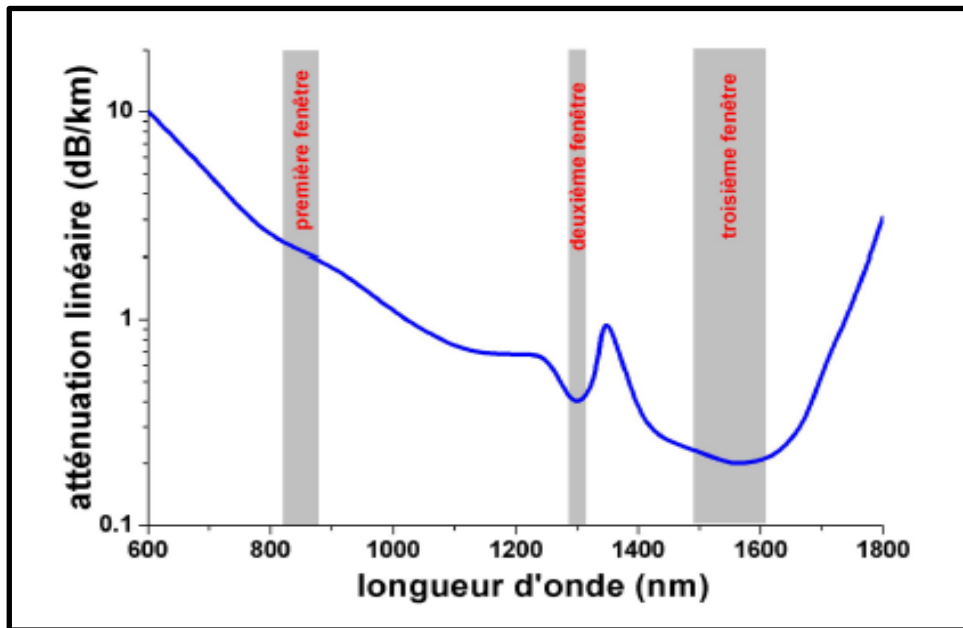
Alliage	Longueur d'onde ( $\mu$ m)
GaAlInP/GaAs	0,63-0,67
GaAlAs/GaAs	0,78-0,88
GaInAs/GaAs	0,98-1,2
GaInNAs/GaAs	1,2-1,3
GaInAsP/InP	1,3-1,6
AlGaInAs/InP	

## I.5.4. VCSELS aux grandes longueurs d'onde

### I.5.4.1. Fenêtres de transmission

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

En admettant ces profils d'atténuation, on remarque trois fenêtres spectrales où l'atténuation est assez faible [27] :



*Figure I-24 : Fenêtres de transmission pour la fibre [28]*

- La 1ère Fenêtre : de 0.8 à 0.9 $\mu\text{m}$ , n'est pas un minimum d'atténuation, ni de dispersion, mais un optimum d'utilisation des matériaux les plus économiques (Silicium pour les détecteurs, GaAs pour les émetteurs) ; cette fenêtre permet d'avoir des liaisons peu coûteuses à courtes distances ou en réseaux locaux, sur des fibres multi modes à des débits de Gbits.
- La 2ème Fenêtre : autour de 1.3 $\mu\text{m}$ , est un minimum relatif d'atténuation (vers 0.5dB/km) et le minimum de dispersion chromatique ; les composants sont plus coûteux qu'à 0.85 $\mu\text{m}$ , mais elle est couramment utilisée en transmission à moyenne distance (qq dizaines de km) sur fibres monomodes, ainsi qu'à haut débit en réseau local.
- La 3ème Fenêtre : autour de 1.55 $\mu\text{m}$ , correspond au minimum absolu d'atténuation (moins de 0.2dB/km), mais elle demande des composants plus coûteux, à cause du problème de dispersion chromatique, elle est d'utilisation plus récente, elle est surtout utilisée en liaisons à très longues distances sur des fibres monomodes (terrestres ou sous-marines), avec des portées dépassant les 100km et des débits de plusieurs Gbits/s. C'est à cette longueur d'onde que l'on utilise l'amplification optique et on pratique à grande échelle le multiplexage en longueur d'onde (WDM) [27].

### I.5.4.2. Propriétés du matériau

Les propriétés du matériau, notamment la transmission, l'indice de réfraction et la dureté du substrat de la fenêtre, peuvent être déterminantes pour choisir la fenêtre la mieux adaptée à notre application. La (figure I-25) ci-dessous met en évidence les zones de transmission des différents matériaux [29] :

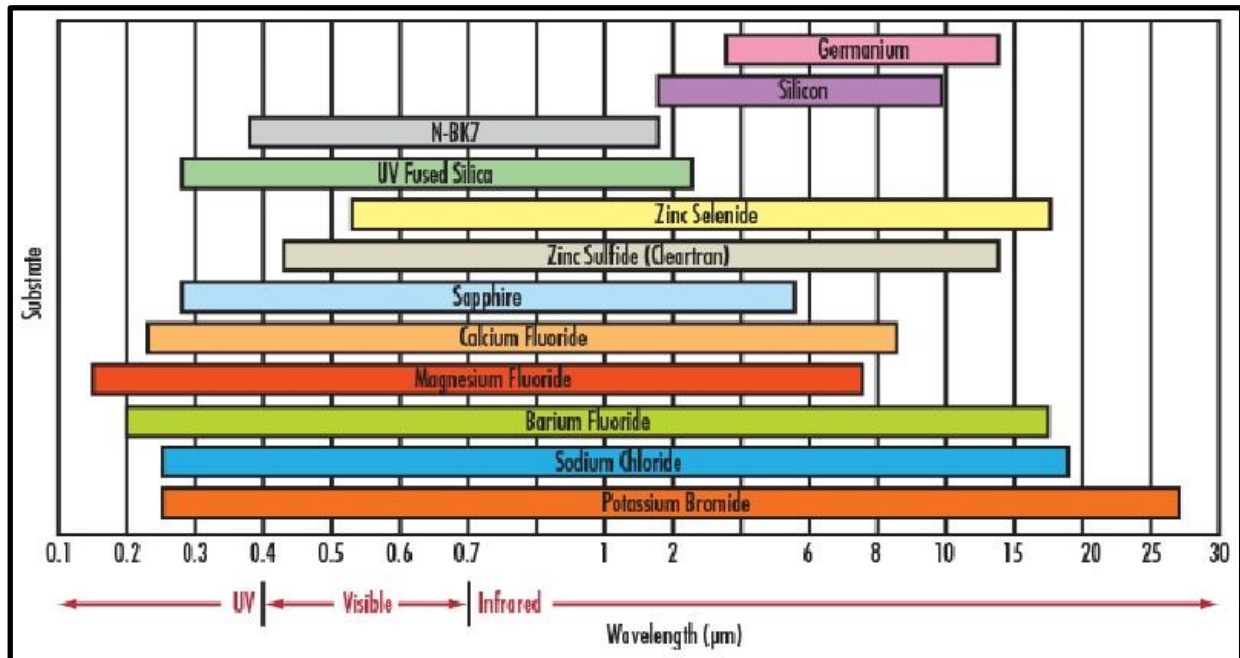


Figure I-25 : Régions de transmission des substrats de fenêtre [29]

L'indice de réfraction (qui décrit comment la lumière ralentit lorsqu'elle traverse le matériau), le nombre d'Abbe (qui décrit la dispersion du matériau), la densité (qui détermine le poids de l'assemblage optique) et le coefficient de dilatation thermique (qui décrit comment la taille du verre varie en fonction des changements de température) sont d'autres propriétés essentielles pour sélectionner la fenêtre appropriée à notre application [29].

### I.5.4.3. Les VCSELs et les grandes longueurs d'onde

La réalisation des VCSELs aux longueurs d'onde des télécommunications affronte des nombreux challenges. Nous présentons deux exemples illustrant ces difficultés :

- Problèmes liés à la structure : les couches constituantes des réflecteurs de Bragg sont plus épaisses à 1550 nm qu'à 850 nm. L'augmentation de l'épaisseur des miroirs engendre une augmentation de l'échauffement du composant.
- Problèmes liés au choix des alliages utilisés : Le "band-gap" de l'AlAs/GaAlAs est trop important pour permettre l'émission aux longueurs d'onde de télécommunication. Certains alliages dérivés de l'InP, dont le "band-gap" favorise l'émission à 1550 nm, ne permettent pas de réaliser des réflecteurs de Bragg assez performants pour la réalisation d'un VCSEL.

Malgré ces obstacles, certaines structures proposées ont donné des résultats probants dans les dernières années. Nous nous contenterons ici de la présentation d'une architecture proposée par Vertilas, qui nous intéresse particulièrement [25].

### I.5.5. Applications des VCSELs

Le (Tableau I-04) présente un résumé des différentes applications des VCSELs [25].

*Tableau I-04 : Applications des VCSELs [25]*

Champ d'application	Exemples
Applications domestiques	Imprimantes laser, têtes de lecture des platines disque compact ou DVD, sauvegardes de données par effet magnéto-optique, pointeurs laser, souris laser, illumination.
Détection et télémétrie	Spectroscopie, médecine, biologie, lecteurs de code à barres, réalisation de robots et drones de faible taille et d'autonomie élevée.
Datacoms et télécoms	Liaisons optiques, réseaux LAN, transmission parallèles avec des matrices de VCSELs.

### I.5.6. Avantages et inconvénients des VCSELs par rapport aux lasers conventionnels

#### I.5.6.1. Avantages

Les VCSELs présentent des avantages par rapport aux lasers émettant par la tranche dus à la construction même de ce type de lasers. Certains de ces avantages, qui ont stimulé le développement technologique des VCSELs de ces dernières années, sont présentés ci-dessous :

- Le courant de seuil est très bas à cause de son volume réduit, les niveaux peuvent atteindre les microampères.
- La longueur d'onde et les courants de seuil sont moins sensibles aux variations de la température.
- La large bande passante qui assure la capacité de modulation à haute fréquence à très faible courant de polarisation.
- Le faisceau émis par les VCSELs est circulaire et faiblement divergent, il est donc, facilement injecté dans les fibres optiques.

- L'émission est verticale par rapport au substrat, ce qui permet de faire des tests initiaux avant de séparer les dispositifs en différentes puces. Ceci rend la fabrication beaucoup plus aisée et moins coûteuse [25].

### **I.5.6.2. Inconvénients**

La technologie VCSEL a également, certains inconvénients :

- Les VCSELs ont une limitation de Puissance (au maximum quelques dizaines de mW) due au passage du courant de polarisation par les miroirs de Bragg, qui ont une résistance assez élevée. Un échauffement important des réflecteurs peut détériorer la réflectivité des miroirs.
- Afin d'obtenir une puissance optique de sortie non négligeable, il est nécessaire d'élargir la zone active, ce qui entraîne l'apparition des modes transverses. Ceci, oblige l'utilisation de fibres optiques multimodes, qui ont une atténuation plus élevée et des problèmes de dispersion modale pour la transmission en télécommunications.
- Bien que les VCSELs aux longueurs d'onde des télécommunications existent sur le marché, ils restent encore assez chers et comportent certaines difficultés pour leur réalisation. En effet, les matériaux couramment utilisés pour l'émission à ces longueurs d'onde ne sont pas très adaptés pour faire des réflecteurs de Bragg [25].

## **I.6. Conclusion**

L'apparition des diodes lasers VCSEL dans le domaine des télécommunications optique permet d'avoir une grande fiabilité et des coûts moindres. Dans ce chapitre nous avons commencés par donner quelques notions et généralités sur les semi-conducteurs, leurs propriétés et leurs types, nous avons ensuite expliqués le principe de fonctionnement du laser enfin nous avons présentés les VCSEL en citant leur principe de fonctionnement, leur structure, les matériaux utilisés dans leur conception, son comportement dans les grandes longueurs d'onde ainsi que certains de ses avantages et inconvénients.

# **Chapitre II : Etude de l'efficacité des diodes lasers VCSEL au moyen du logiciel OPTISYSTEM**

## II.1. Introduction

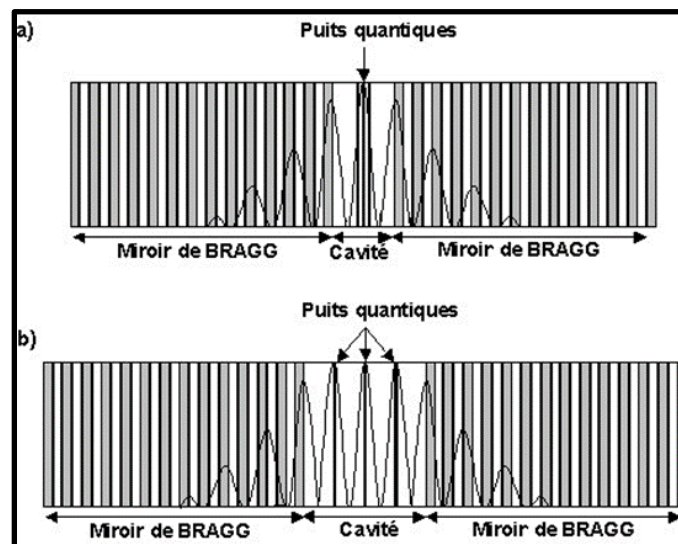
Généralement, le transport de l'information d'un point à un autre est la base de la communication optique, sachant que cette opération fonctionne grâce à des différents équipements que nous allons présenter dans ce chapitre. D'abord, nous parlerons plus en détails sur la diode laser VCSEL. Ensuite, nous allons établir deux liaisons optiques à l'aide du logiciel OPTISYSTEM, mais avant cela, nous présenterons ce logiciel ainsi que les différents composants et éléments utilisés dans notre liaison. Puis, nous effectuerons la simulation des deux liaisons optiques mentionnées auparavant, la première en utilisant comme émetteur optique une diode laser conventionnelle, et dans la deuxième une diode laser VCSEL. Enfin, nous commenterons sur les résultats obtenus et déterminerons qu'elle est l'émetteur optique qui nous permet d'avoir une chaîne de transmission de meilleure qualité.

## II.2. Informations complémentaires concernant les diodes laser VCSEL

### II.2.1. Différentes structures de VCSEL

#### II.2.1.1. Zone active à puits quantiques

Le VCSEL est un laser à puits quantiques, il en comporte 3 le plus souvent. La position de ces puits va être déterminée en fonction de l'onde stationnaire oscillant dans la cavité (Figure II-01) : les puits seront placés aux maxima de l'onde de façon à optimiser le couplage.



**Figure II-01 : Emplacement des puits quantiques dans la cavité : a) structure à zone active centrale, b) structure à gain périodique résonant [30]**

Il existe 2 types de structures selon la longueur de la cavité. La (Figure II-01-a) présente une cavité  $\lambda$ , c'est à dire que son épaisseur correspond à une longueur d'onde. Dans ce cas, il n'y aura qu'un seul maximum d'onde stationnaire où seront placés tous les puits. La seconde structure (Figure II-01-b) utilise le fait que la longueur de la cavité, multiple de la longueur d'onde, puisse



être deux ou trois fois plus grande que la cavité lambda, ce qui permet d'obtenir plusieurs maxima d'onde stationnaire. Ainsi les puits quantiques seront plus espacés, leur recouvrement avec le mode sera maximum ce qui donnera une meilleure sélectivité spectrale [30].

### II.2.1.2. Confinement électrique

Si l'on considère la (Figure II-02), on constate que l'inversion de population a lieu dans toute la zone active : l'émission de photons est susceptible de se produire sur toute la surface de celle-ci. Or l'ouverture permettant la sortie du faisceau lumineux, est limitée par la surface des électrodes, ce qui engendre des pertes optiques. Il a donc été nécessaire d'améliorer la structure du VCSEL pour confiner les porteurs au centre de la zone active. Dans un premier temps, les fabricants ont utilisé les mêmes techniques que celles des diodes lasers conventionnelles [30].

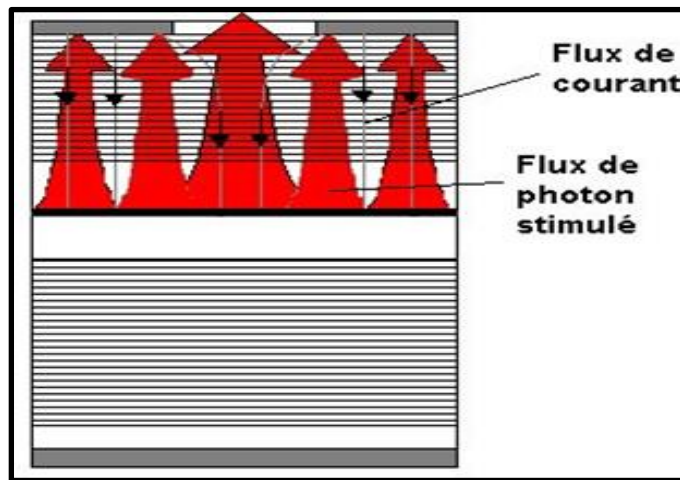


Figure II-02 : structure sans confinement des porteurs [30]

La (Figure II-03-a) présente la première génération de VCSELs car c'est la plus simple à réaliser. Après l'épitaxie, certaines zones du miroir de Bragg supérieur sont rendues isolantes par bombardement de protons ( $H^+$ ). Les porteurs sont ainsi guidés jusqu'au centre de la région active forçant l'émission stimulée à se produire à cet endroit [30].

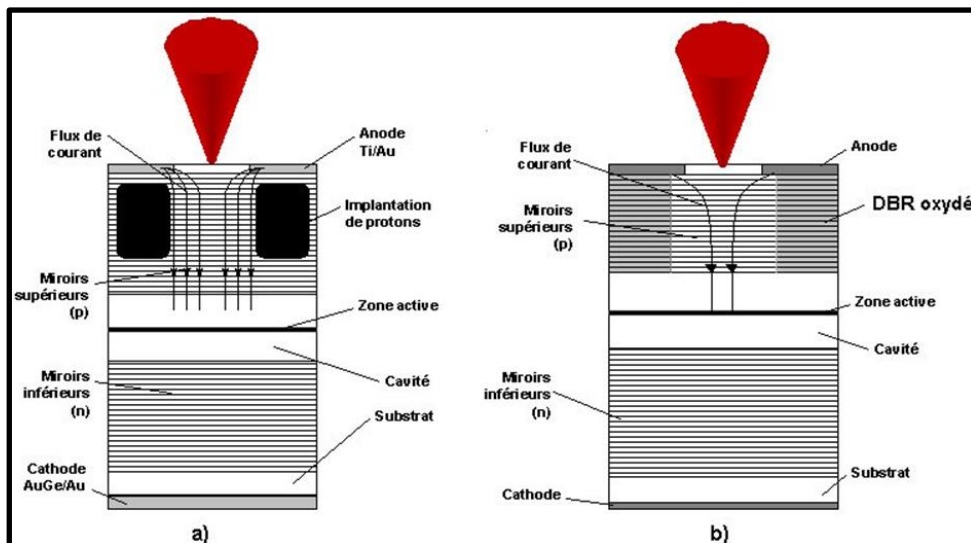


Figure II-03 : a) VCSEL à implantation de protons ; b) VCSEL à miroir de Bragg oxydé [30]

La seconde structure (Figure II-03-b), sur le même principe que le bombardement de protons, va rendre isolante des parties du miroir supérieur par une oxydation locale. Cette méthode a l'avantage de réduire les recombinaisons non-radiatives.

Une autre méthode de confinement, plus communément appelée structure MESA ou pilier gravé, a été imaginée en réduisant la largeur du miroir de Bragg supérieur. L'anode est située au-dessus du miroir mais en minimisant la surface de contact avec celui-ci (Figure II-04-a) ou bien directement au-dessus de la cavité de façon à supprimer la traversée du DBR supérieur par le courant (Figure II-04-b) [30].

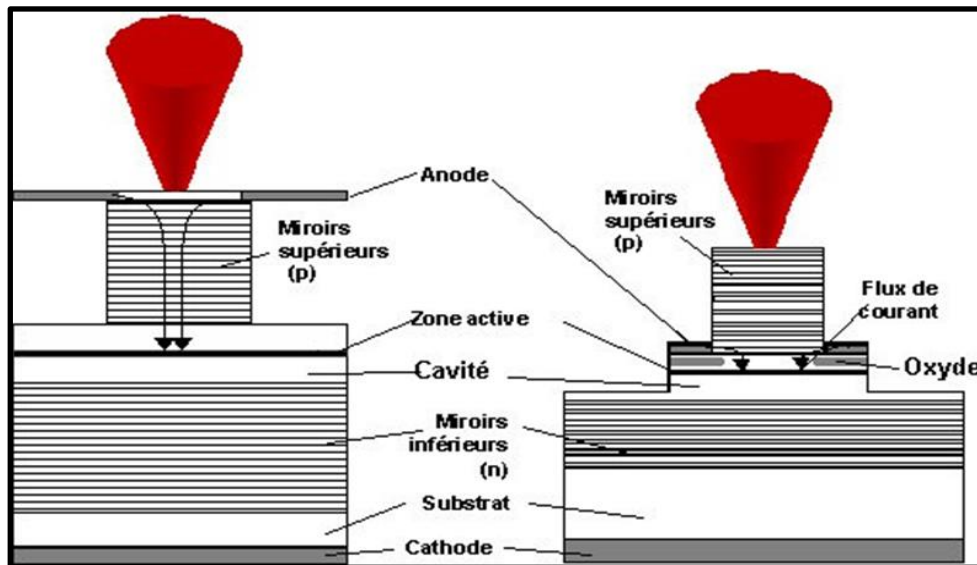


Figure II-04 : VCSELs mesa [30]

Mais cette deuxième structure nécessite une oxydation au sein même de la cavité. Ces structures de VCSEL donnent actuellement les meilleures performances notamment en termes de courant (seuil très bas, inférieur au mA) et de confinement optique mais son procédé de fabrication est beaucoup plus délicat que les précédents ce qui augmente considérablement son coût.

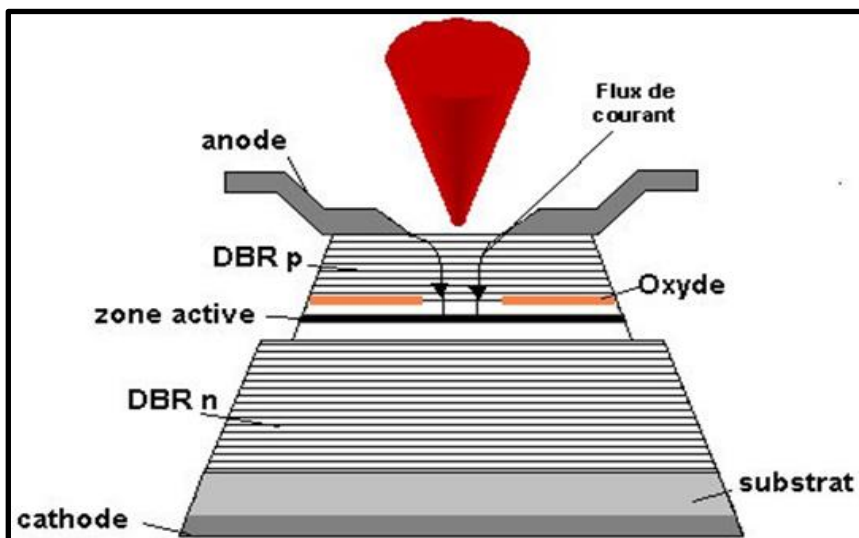


Figure II-05 : VCSEL à diaphragme d'oxyde [30]

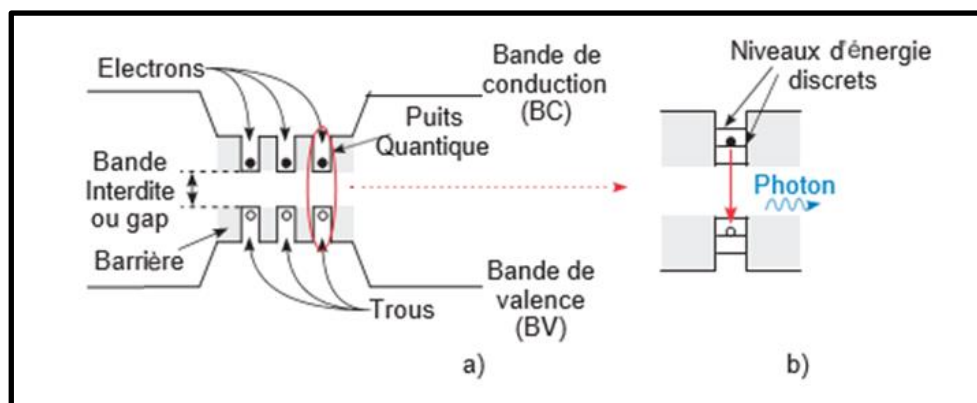
La dernière structure (Figure II-05), appelée à diaphragme d'oxyde, est conçue sur le même principe que celle à DBR oxydé mais en limitant l'attaque à une seule couche d'AlAs, juste au-dessus de la cavité [30].

Ce type de composant, disponible sur le marché depuis l'an 2000, constitue la seconde génération de VCSEL. On peut également noter que les structures MESA et à diaphragme d'oxyde permettent le confinement de l'onde optique dans la cavité et son guidage dans le miroir de Bragg supérieur [30].

## II.2.2. La zone active

### II.2.2.1. Structure

La zone active est le lieu où se produit l'émission stimulée. Il est donc primordial d'optimiser le rapport entre le confinement des électrons et le gain du matériau. Ceci peut être réalisé grâce à l'introduction de puits quantiques dans la zone active. Les électrons vont alors être localisés dans un faible volume, ce qui a pour effet d'augmenter le gain et de réduire le courant de seuil. La structure de ces puits est présentée sur la (Figure II-06-a). On parle d'un environnement quantique car, avec son petit volume, les bandes électroniques sont modifiées en niveaux d'énergie discrets, voir (Figure II-06-b) [26].

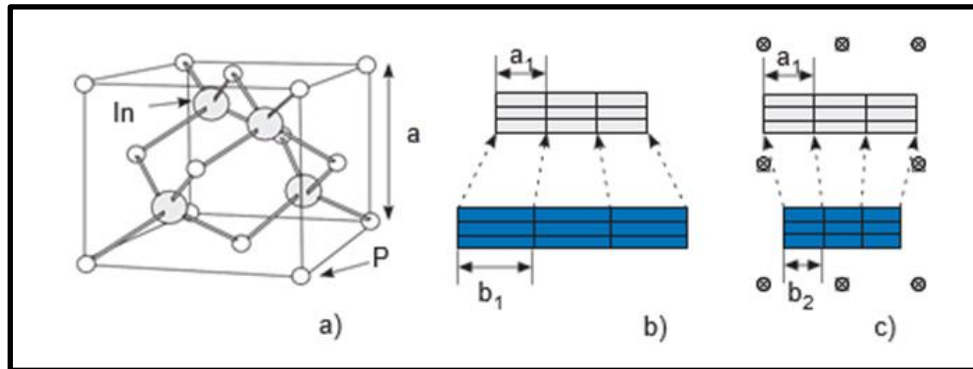


**Figure II-06 : Diagramme de bande a) de la zone active à multiples puits quantiques et b) d'un puit quantique [26]**

Un autre avantage dans la structure des VCSELs vient des barrières de potentiel autour de la zone active appelées SCH (Separate Confinement Heterostructure). En effet, dans les émetteurs par la tranche, ces barrières dont l'indice de réfraction est plus faible que celui des puits, permettent de guider la lumière. Dans le cadre des VCSELs, cela n'est plus nécessaire. Cette zone peut donc être limitée voire complètement retirée, ce qui améliore les performances du laser à haute température.

Dans les procédés de fabrication, la croissance des couches de semiconducteurs est réalisée par épitaxie et en accord de maille avec le substrat. En effet, les semiconducteurs étant des structures cristallines, il y a une distance interatomique  $a$  à respecter, comme le montre la (Figure II-07-a) avec le phosphore d'indium InP. Si un substrat a une maille  $a_1$ , les composés qui seront déposés sur ce substrat devront avoir une maille en accord avec  $a_1$ . Par contre, il est possible de modifier cet

accord de maille en effectuant une contrainte. On peut ainsi faire croître une maille  $b_1$  sur une maille  $a_1$  plus petite (Figure II-07-b), ou une maille  $b_2$  plus petite que la maille  $a_1$  (Figure II-07-c). Ces procédés sont appelés maille contrainte ou maille étirée respectivement [26].



**Figure II-07 : Structure de maille de l'InP : a) Forme cristalline b) Maille contrainte et c) Maille étirée [26]**

La plupart des puits quantiques utilisés dans les VCSELs ont une maille contrainte. Cela permet d'obtenir une densité de porteurs à la transparence plus faible et un gain différentiel plus élevé. Le courant de seuil est, par conséquent, diminué. Cependant, la zone active comprend plusieurs puits, 5 au minimum, et la contrainte appliquée à tous les puits engendre des dislocations et une instabilité dans le processus de fabrication. Pour pallier à ce problème, une contrainte inverse est appliquée aux barrières qui séparent chaque puits afin d'obtenir une maille dite compensée. Un meilleur procédé de fabrication est ainsi obtenu [26].

### II.2.2.2. Recombinaisons non-radiatives et absorption optique

La zone active est le siège des recombinaisons possibles au sein du semiconducteurs. Elles peuvent être de deux types : soit radiatives en émettant un photon, principe de l'émission spontanée, soit non-radiatives en libérant l'excès d'énergie sous forme de chaleur. Dans les VCSELs à grande longueur d'onde, ces effets non-radiatifs deviennent beaucoup plus importants qu'à courte longueur d'onde car ils sont associés à la structure de la bande de valence du matériau utilisé. Il existe au total, trois effets : les recombinaisons par effet Shockley-Read-Hall (qui sont présentes à toutes les longueurs d'onde), les recombinaisons par effet Auger et l'absorption induite entre les bandes de valence appelée IVBA (dominantes pour les grandes longueurs d'onde) (Inter-Valence Band Absorption) [26].

### II.2.3. Pompage électrique et pompage optique

#### II.2.3.1. Pompage électrique

Les VCSELs accordables présentés sur la (Figure II-8) sont pompés électriquement. Cette VCSEL utilise un miroir de Bragg en AlGaAs/AlAs avec une membrane. Cette technologie présente des composants émettant une puissance optique de 1,3mW, accordables en émission monomode. Par contre, il est à noter qu'un compromis doit être fait, pour ces structures, entre la longueur de la membrane, la plage de compatibilité et la bande passante de modulation.

Une autre technologie similaire utilise une membrane en GaAs suspendue par quatre bras au-dessus duquel est déposé un miroir diélectrique en SiNH/Au [26].

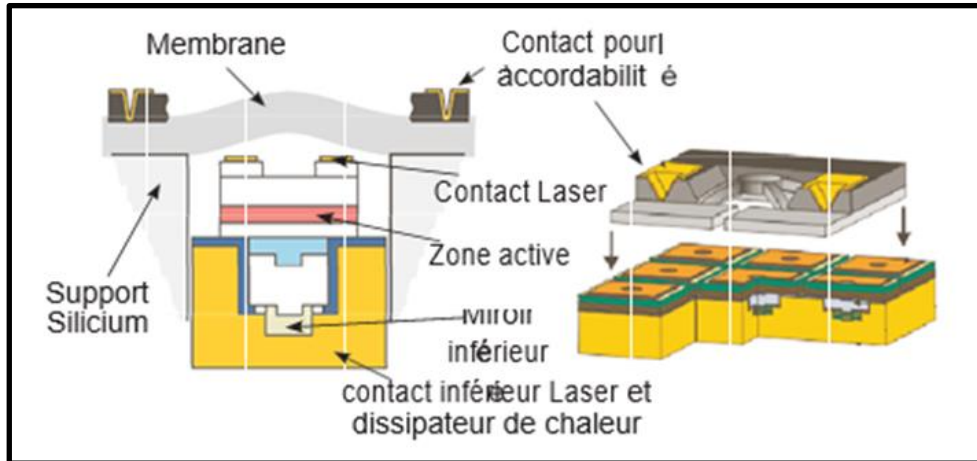


Figure II-08 : Structure développée par Vertilas [26]

Une autre façon d'obtenir la compatibilité a été développée qui utilise une membrane concave comme le présente la (Figure II-08). Les résultats affichent un comportement monomode à 1,55µm [26].

### II.2.3.2. Pompage optique

Un autre principe de fonctionnement dans les VCSELs accordable est de pomper la structure optiquement. Le premier VCSEL accordable à 1,55µm fut réalisé en 2002 avec un pompage optique issu d'un laser à 980nm (Figure II-09-a) [26].

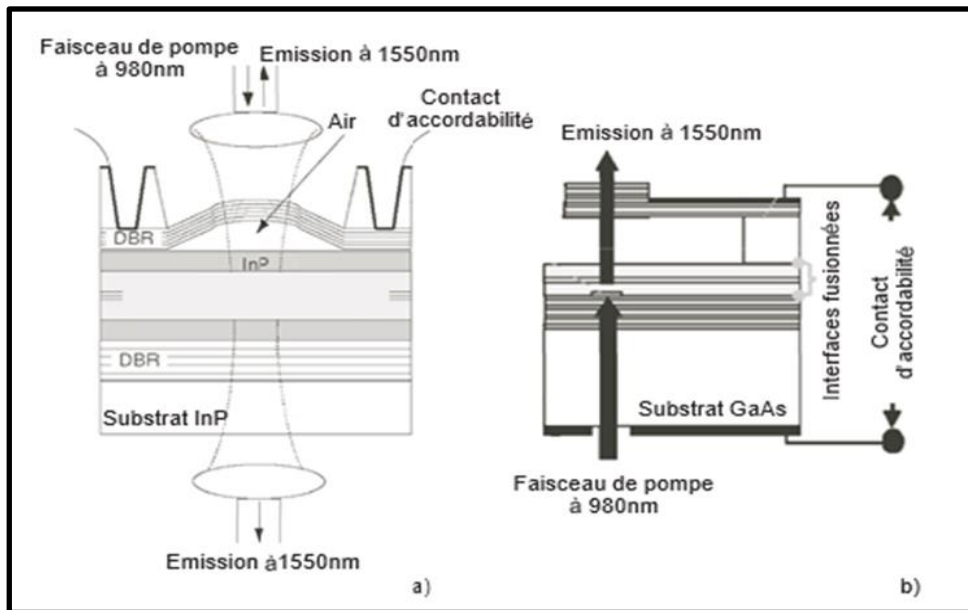


Figure II-09 : VCSELs accordables à pompage optique : a) structure de l'université de Darmstadt b) structure de BeamExpress [26]

Ces VCSELs émettent à 1,55µm et sont fabriqués sur un substrat d'InP. L'accordabilité se fait avec une puissance optique de 300-400µW avec une puissance de pompe de 40mW. De plus, les mesures de transmission montrent une capacité de modulation supérieure à 2,5Gbps.

Il y a également eu une nouvelle fabrication de VCSELS accordables à grande longueur d'onde pompés optiquement. La structure est présentée sur la (Figure II-09-b) et est réalisée sur substrat de GaAs en utilisant le procédé de fusion de wafer, l'émission est centrée à 1,6µm. La puissance de sortie est de 2mW pour une puissance de pompe à 80mW [26].

## II.2.4. Paramètres basiques du VCSEL

### II.2.4.1. Courant de seuil

Le courant de seuil d'un VCSEL peut être exprimé, en termes de la densité de courant de seuil de la façon suivante :

$$I_{seuil} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 J_{seuil} = \frac{q V N_{th}}{\eta_i \tau_s} \quad \dots(\text{II.1})$$

Où  $q$  est la charge de l'électron,  $V$  est le volume de la zone active,  $N_{th}$  est la densité de porteurs de seuil,  $\eta_i$  est le rendement quantique interne,  $\tau_s$  est le temps de recombinaison et  $D$  est le diamètre de la zone active.

A partir de l'équation, nous pouvons déduire qu'il est essentiel de réduire le volume de la région active pour diminuer le courant de seuil [25].

### II.2.4.2. Puissance optique

La puissance optique en sortie d'un VCSEL peut s'exprimer par :

$$P_0 = \eta_d \cdot \eta_{spon} \cdot \beta \cdot h \cdot \nu \cdot I, \quad (I \leq I_{seuil}) \quad \dots(\text{II.2})$$

$$P_0 = n_d \cdot h \cdot \nu \cdot (I - I_{seuil}) + \eta_d \cdot \eta_{spon} \cdot \beta \cdot h \cdot \nu \cdot I_{seuil}, \quad (I \geq I_{seuil}) \quad \dots(\text{II.3})$$

Avec  $\eta_d$  qui représente le rendement quantique différentiel du miroir supérieur (celui qui permet la sortie de la lumière),  $\eta_{spon}$  est le rendement d'émission spontanée,  $\beta$  est le facteur d'émission spontanée,  $h$  est la constante de Planck,  $\nu$  est la fréquence d'émission du laser et  $I$  est le courant injecté au laser [25].

### II.2.4.3. Fréquence de modulation

La bande passante, c'est-à-dire la fréquence maximale à laquelle il peut être modulé est donnée par la relation :

$$f_{3dB} = 1,55 \cdot f_r \quad \dots(\text{II.4})$$

Où  $f_r$  est la fréquence de relaxation exprimée par la relation :

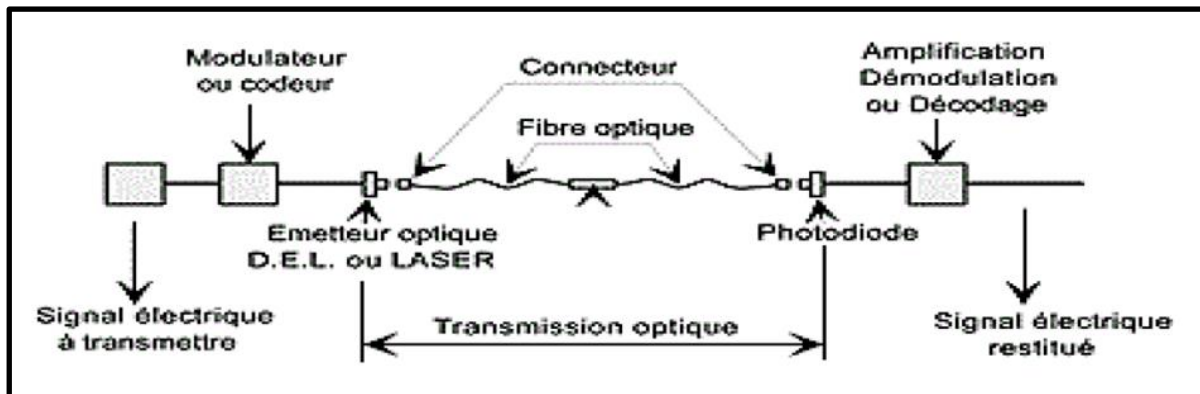
$$f_r = \frac{1}{2 \pi \tau_s} \cdot \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_p} \left(\frac{I}{I_{seuil}} - 1\right)} \quad \dots(\text{II.5})$$

Où  $\tau_s$  est le temps de recombinaison et  $\tau_p$  la durée de vie des photons [25].

## II.3. Simulation d'une transmission optique

### II.3.1. Système de transmission optique et ses différents composants

La transmission de données dans la fibre optique repose sur un système complexe mais au niveau élémentaire, tous les systèmes de communications optiques sont fondés sur des liaisons optiques. Globalement, ces liaisons se basent sur trois blocs fondamentaux : un bloc d'émission, un bloc de réception et une série de tronçons de fibres optiques.



*Figure II-10 : Système de transmission optique*

Le rôle d'un tel système est premièrement, au niveau du bloc émetteur, d'émettre un signal optique continu. Ensuite, la ligne optique a pour objectif de faire propager ce signal sur une distance donnée, en prenant en considération les différents phénomènes qui peuvent provoquer une déformation du signal (atténuation et autres). Et finalement, au niveau de la réception, ce signal optique est détecté par un module de détection (une photodiode) et transformé en un signal électrique.

### II.3.2. Critères de qualité d'une transmission optique

Afin de connaître le bon fonctionnement d'un système, on compare la séquence envoyée à celle reçue, cette dernière est obtenue en mesurant la qualité de transmission, pour cela il y'a trois critères principaux qui sont : le facteur de qualité (ou le facteur Q), le taux d'erreur binaire (BER) et le diagramme de l'œil.

#### II.3.2.1. Diagramme de l'œil

Le diagramme de l'œil représente la superposition synchrone de tous les symboles binaires de la séquence transmise, c'est la façon visuelle pour estimer la qualité d'un signal, plus le signal est de mauvaise qualité, plus le diagramme de l'œil est fermé, plus le facteur de qualité est faible et ainsi plus la détection du signal sans erreur est difficile [31].

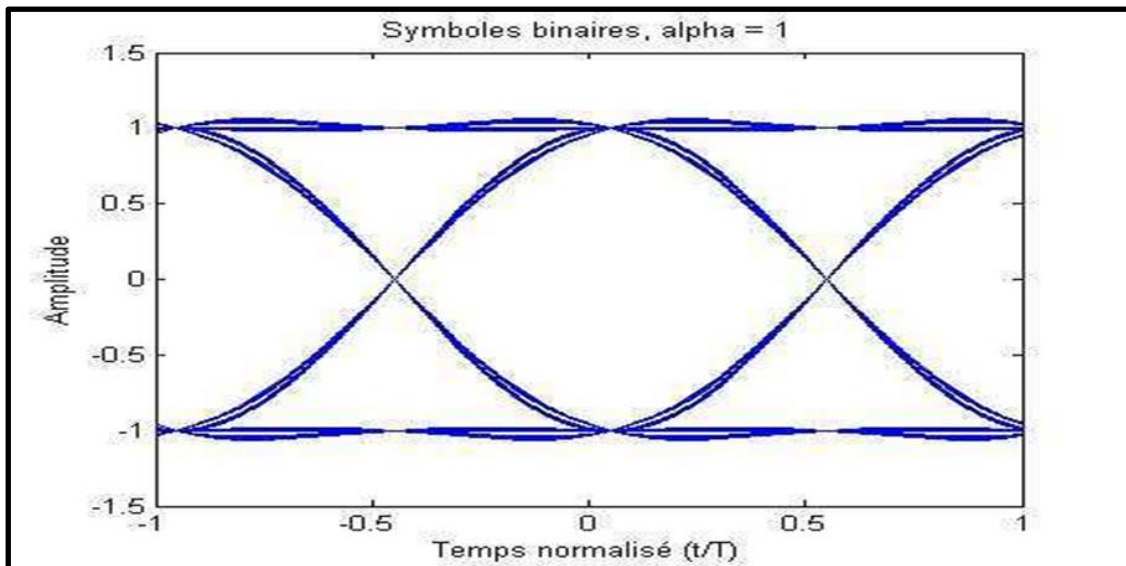


Figure II-11 : Diagramme de l'œil [32]

### II.3.2.2. Taux d'erreur binaire BER

Le critère le plus intuitif permettant d'évaluer la qualité du signal transmis est la comparaison entre la séquence binaire à l'émission et celle à la réception nous parlons dans ce cas de taux d'erreur binaire. Il est défini par le rapport entre le nombre de bit envoyés et le nombre de bit reçus [33].

$$BER = \frac{\text{Nombre de bits erronés}}{\text{Nombre de bits transmis}} \quad \dots(\text{II.6})$$

En télécommunication optique on dit qu'un système est généralement considéré de bonne qualité si ce taux d'erreur binaire est inférieur à une valeur de  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$  ou  $10^{-15}$  suivant les systèmes.

### II.3.2.3. Facteur de qualité

Facteur de qualité, ou le facteur Q, est un critère de qualité d'un signal optique, c'est donc le rapport du signal sur bruit électrique. Il est obtenu à partir des statistiques du bruit des niveaux (1) et (0) du signal à détecter tel que [33] :

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\delta_1 - \delta_2} \quad \dots(\text{II.7})$$

Où :  $I_0$  et  $I_1$  sont les valeurs moyennes qui représentent le signal utile,  $\delta_1$  et  $\delta_2$  sont les écarts types des densités de probabilité des symboles 1 et 0.

Il est à noter que le facteur Q est d'habitude exprimé en dB en utilisant la formule suivante :

$$Q \text{ (dB)} = 20 \cdot \log_{10}(Q)$$



## II.3.3. Logiciel Optisystem

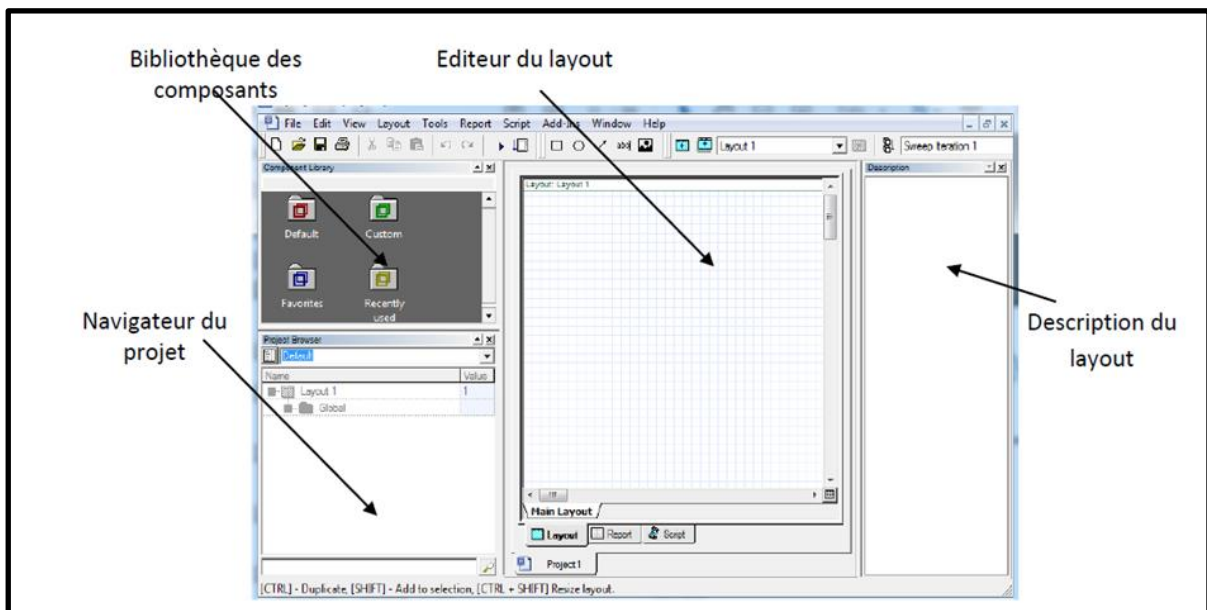
### II.3.3.1. Présentation du logiciel

Le logiciel OptiSystem développé par une société canadienne Optiwave (Optical Communication System Design Software) permet aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir, simuler et d'analyser des systèmes de transmission optique. La diversité des systèmes simulés peut être étendue par la possibilité d'insérer des fonctions réalisées par l'utilisateur et qui peuvent être ajoutées aux systèmes simulés. Le logiciel OptiSystem permet de tester et optimiser pratiquement n'importe quel type de liaison optique, il est basé sur la modélisation réaliste des systèmes de communications par fibre optiques. La démarche à suivre pour simuler un système optique se décompose en deux étapes : « Construire le schéma bloc » puis « Analyser le schéma » [33].

### II.3.3.2. Description du logiciel

Optisystem est un logiciel pour Windows, il comprend essentiellement une fenêtre principale réparti en plusieurs parties :

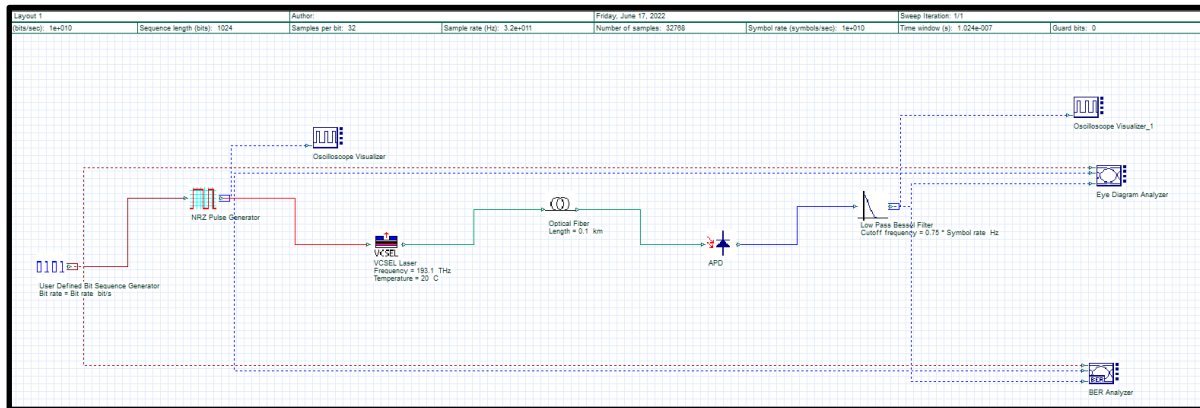
- Editeur du layout : permet l'édition et la configuration du schéma en cours de conception.
- Projet en cours : visualisation des divers fichiers et composants correspondant au projet en cours.
- Vue d'ensemble du projet : permet la visualisation miniature de layout en cours d'édition.
- Bibliothèque : une base de données de divers composant existant, elle contient tout type de modèle qui permet de réaliser les différents schémas.
- Navigateur du projet : Cette fenêtre contient tous les composants utilisés lors du projet afin de pouvoir accéder plus rapidement aux différents composants, particulièrement dans le cas d'un projet complexe qui contient un nombre important de composants [33].



*Figure II-12 : Fenêtre principale du logiciel Optisystem*

## II.3.4. Simulation d'une chaine de transmission optique en utilisant une diode laser VCSEL

### II.3.4.1. Schéma bloc de la chaine de transmission



*Figure II-13 : Schéma de la chaîne de transmission optique utilisant une diode laser VCSEL comme émetteur optique*

Dans cette chaîne de transmission nous utiliserons un générateur qui génère une séquence binaire pseudo-aléatoire (PRBS) qui est considéré dans notre cas comme étant l'information numérique à transmettre, bien que cette séquence binaire est une succession de bits c'est-à-dire une succession de 0 et 1, nous ne pouvons pas la transmettre directement dans le canal car elles sont des quantités abstraites et pour les introduire dans un canal, nous devons les associer à un signal physique qui porte l'information relative à ces données et ceci est réalisé grâce à un codage en ligne (on parle dans ce cas-là d'une transmission en bande de base) le codage en ligne choisi dans notre cas est bien le codage NRZ (No Return to Zero).

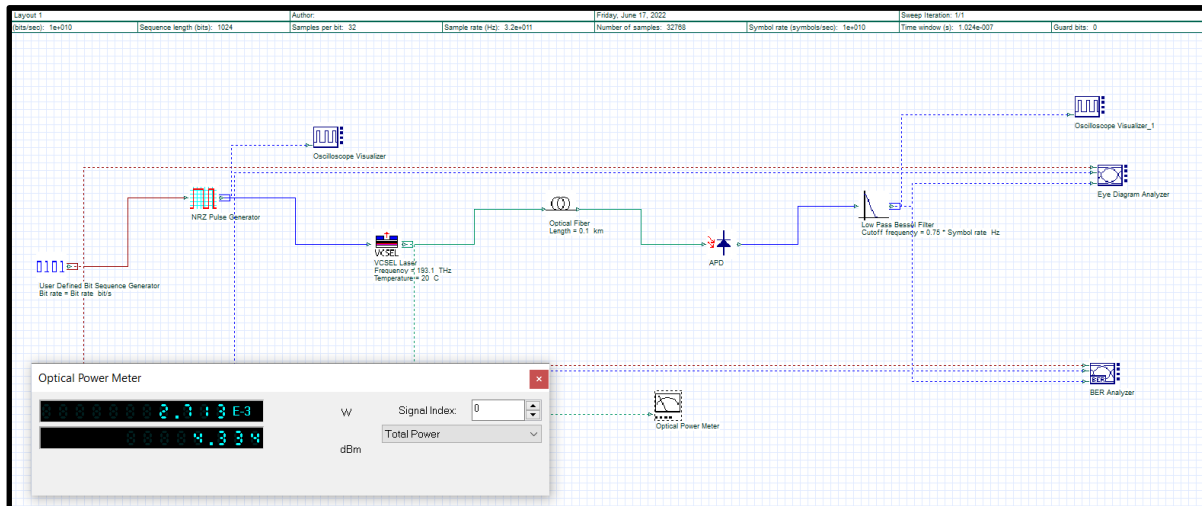
Le format NRZ est celui le plus utilisé dans les réseaux de télécommunications actuels. Dans le cas du format NRZ, à chaque bit correspond un niveau continu. Ainsi, lorsque deux (ou plus) symboles identiques se suivent, le signal reste au même niveau continu. Il n'y a donc pas de retour à zéro entre deux '1' successifs d'où le nom de ce format. Nous aurons alors un signal électrique codé en NRZ.

Nous avons utilisé une diode laser VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) comme émetteur optique à l'entrée avec une fréquence de 193.1 THz (qui équivaut à une longueur d'onde de 1550 nm) sous une température de 20°C, nous lui introduirons le signal électrique provenant du codeur NRZ, ainsi elle transmettra à la sortie un signal lumineux qui va être transporté par une fibre optique, la photodiode ADP (photodiode à avalanche) à la réception va transformer le signal lumineux reçu en un signal électrique.

Nous utiliserons deux oscilloscopes comme visualiseur, le premier pour visualiser le signal électrique à la sortie du générateur NRZ et le second pour apercevoir le signal électrique provenant

de la photodiode APD, plus précisément à la sortie d'un filtre passe bas de Bessel qui constitue un réducteur de bruit.

Aussi, nous utiliserons un analyseur de diagramme de l'œil et un analyseur de BER afin qu'on puisse dans un premier temps analyser les résultats mais aussi d'évaluer la qualité de transmission. Afin de mesurer la puissance moyenne du signal lumineux (signal optique) à la sortie du VCSEL, nous devons utiliser un composant appelé : Optical power meter. Comme le montre la figure suivante :



**Figure II-14 : Schéma de la chaîne de transmission optique avec un Optical power meter**

Nous constatons que la puissance moyenne du signal lumineux est égale à  $2,713 \times 10^{-3} \text{ W} = 2,713 \text{ mW}$ .

## II.3.4.2. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 100 mètres

### II.3.4.2.1. Résultats

- Diagramme de l'œil

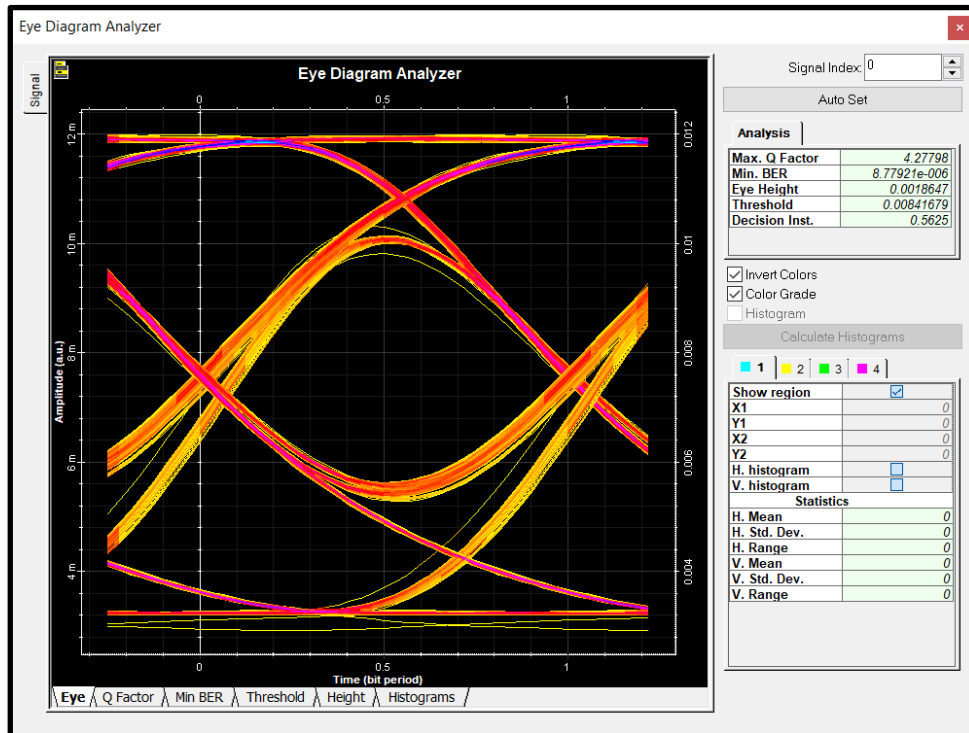


Figure II-15 : Diagramme de l'œil pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 100m

- Le taux d'erreur binaire BER

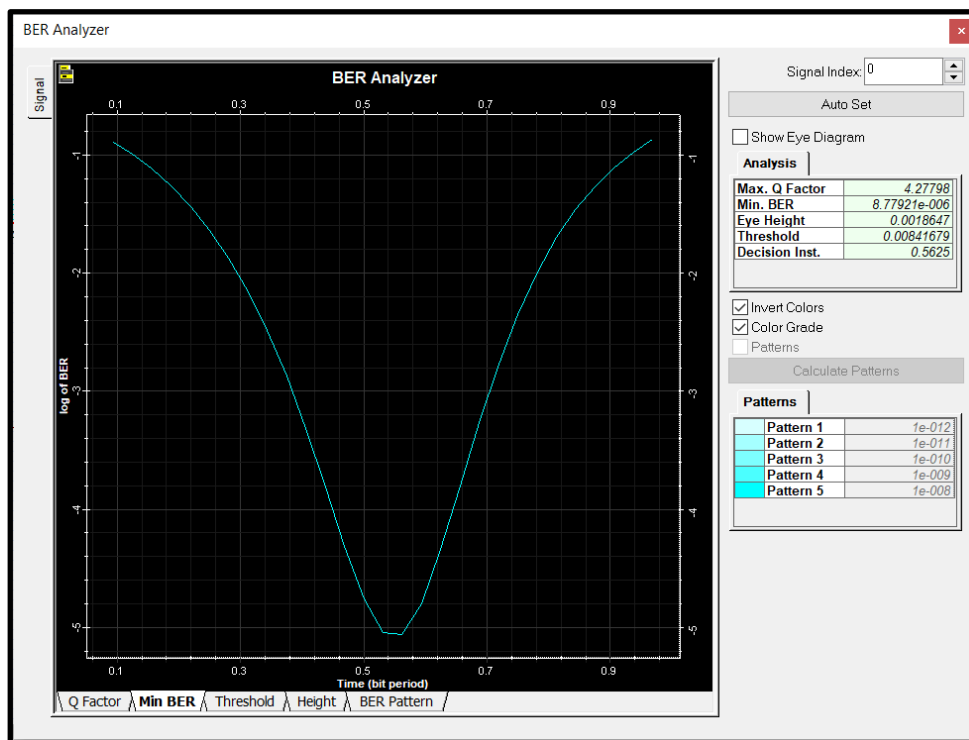
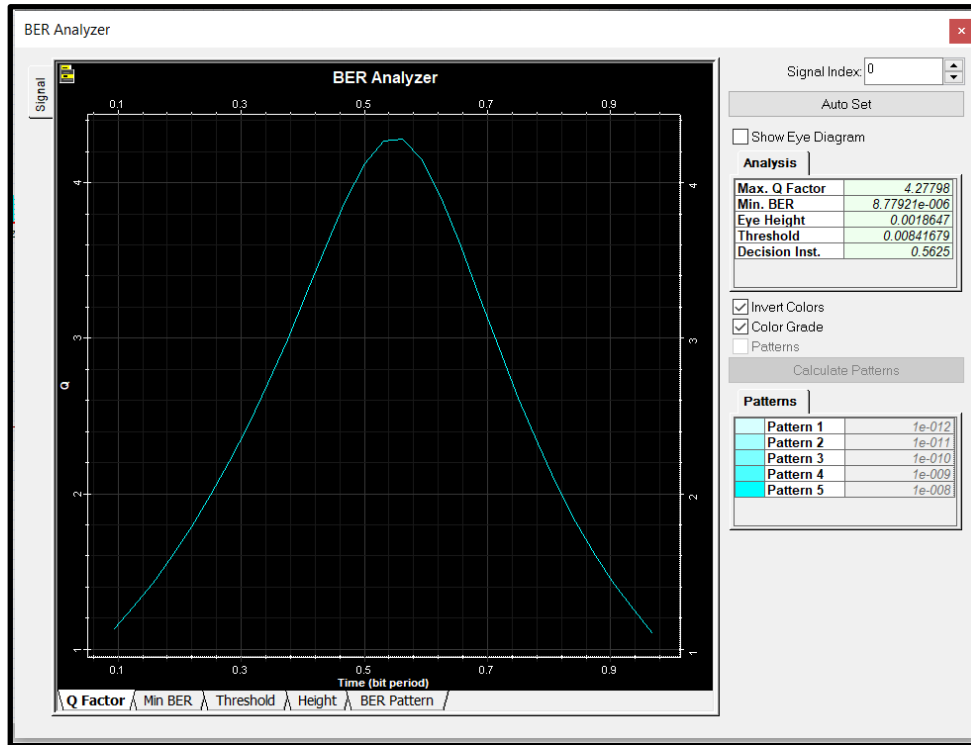


Figure II-16 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 100m

- Le facteur de qualité Q



*Figure II-17 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 100m*

### II.3.4.2.2. Observations

- Le diagramme de l'œil est bien ouvert (Hauteur de l'œil =  $1.8647 \cdot 10^{-3}$ ).
- La valeur maximale du facteur de qualité Q est de 4.27798.
- La valeur minimale du taux d'erreur binaire BER est de  $8.77921 \cdot 10^{-6}$ .
- La valeur du seuil est de  $8.41679 \cdot 10^{-3}$ .
- La valeur du « Decision instant » est de 0.5625.

### II.3.4.3. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 10 kilomètres

#### II.3.4.3.1. Résultats

- Le diagramme de l'œil

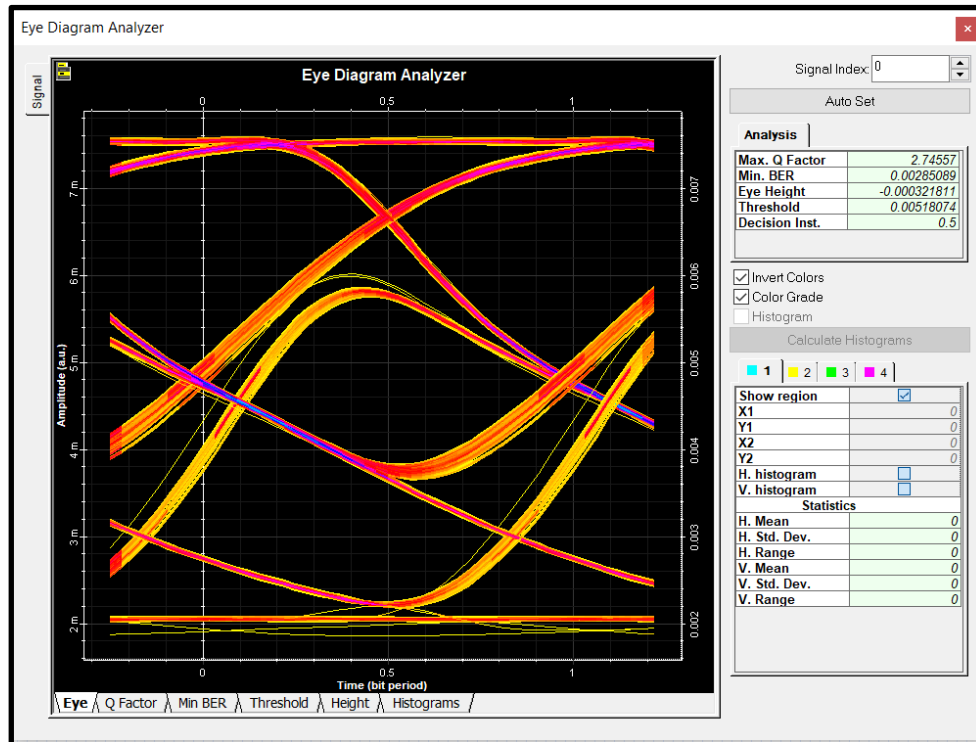


Figure II-18 : Diagramme de l'œil pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 10Km

- Le taux d'erreur binaire BER

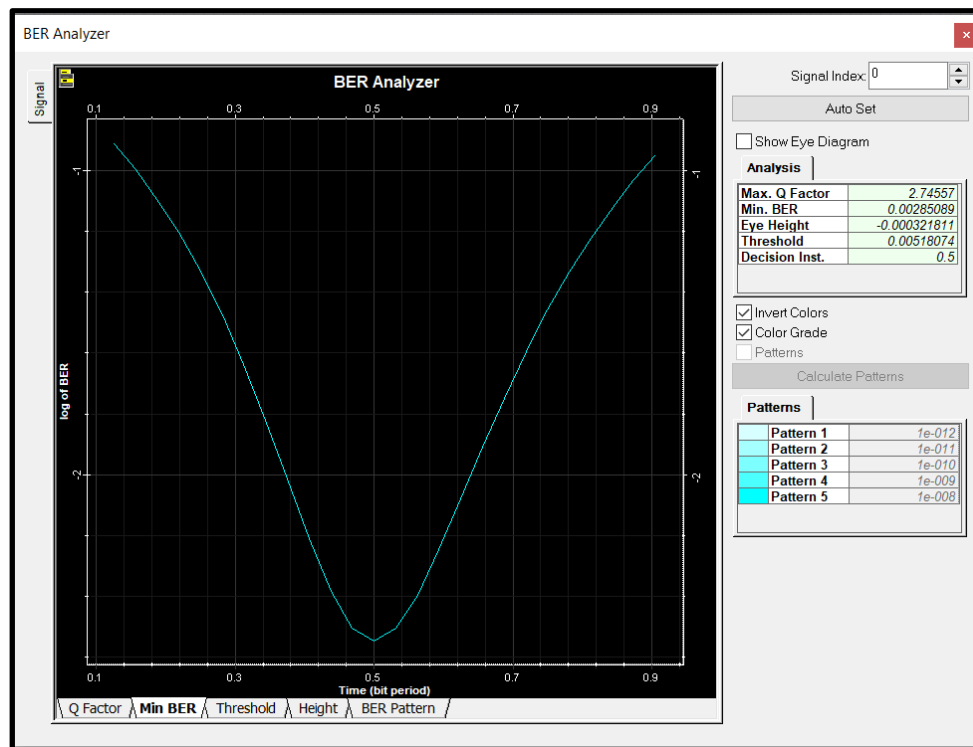
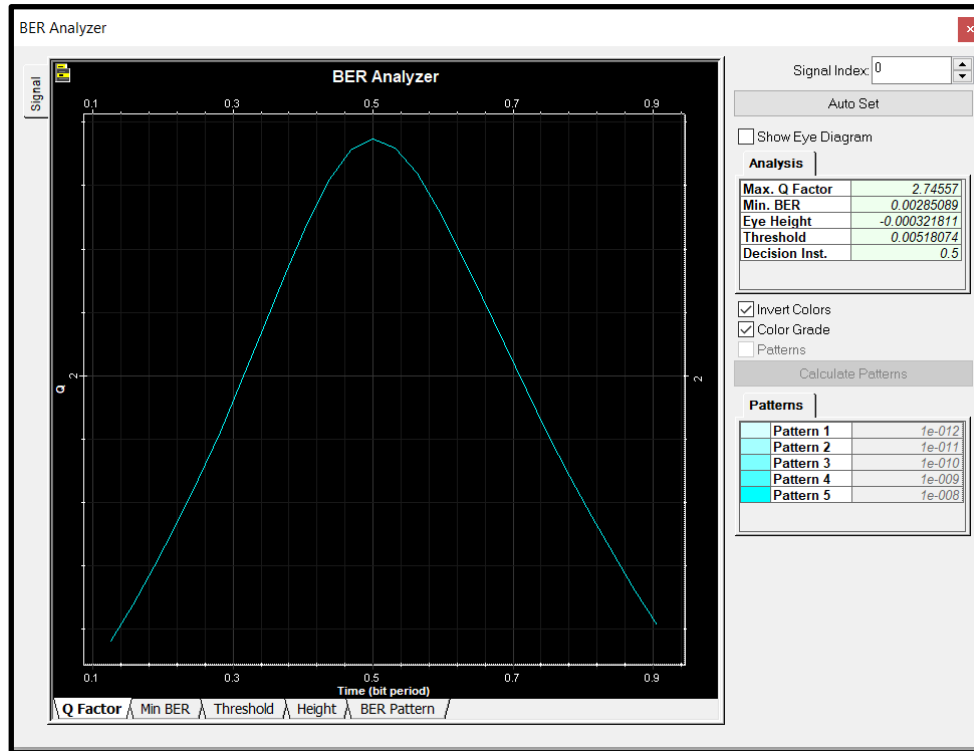


Figure II-19 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 10Km

- Le facteur de qualité



*Figure II-20 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser VCSEL avec une fibre optique de longueur de 10Km*

### II.3.4.3.2. Observations

- Le diagramme de l'œil est fermé (Hauteur de l'œil =  $-3.21811 \cdot 10^{-4}$ ).
- La valeur maximale du facteur de qualité Q est de 2.74557.
- La valeur minimale du taux d'erreur binaire BER est de  $2.84089 \cdot 10^{-3}$ .
- La valeur du seuil est de  $5.18074 \cdot 10^{-3}$ .
- La valeur du « Decision instant » est de 0.5.

## II.3.5. Simulation d'une chaine de transmission optique en utilisant une diode laser conventionnel

### II.3.5.1. Schéma bloc de la chaine de transmission

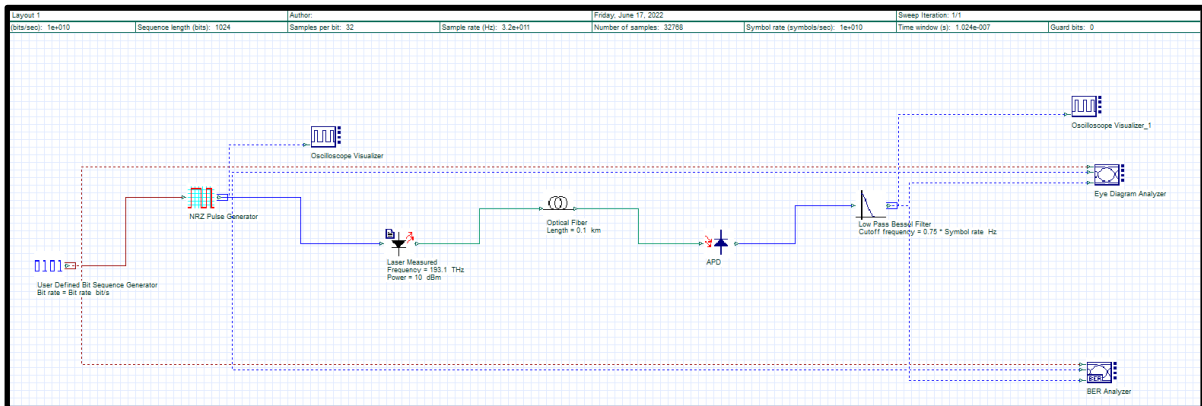


Figure II-21 : Schéma de la chaine de transmission optique utilisant une diode laser conventionnel comme émetteur optique

Dans cette chaine de transmission, nous garderons les mêmes équipements et paramètres avec la précédente, l'unique différence est au niveau de l'émetteur, où nous utiliserons une diode laser de type "Laser measured" également avec une fréquence de 193.1 THz.

### II.3.5.2. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 100 mètres

#### II.3.5.2.1. Résultats

- Le diagramme de l'œil

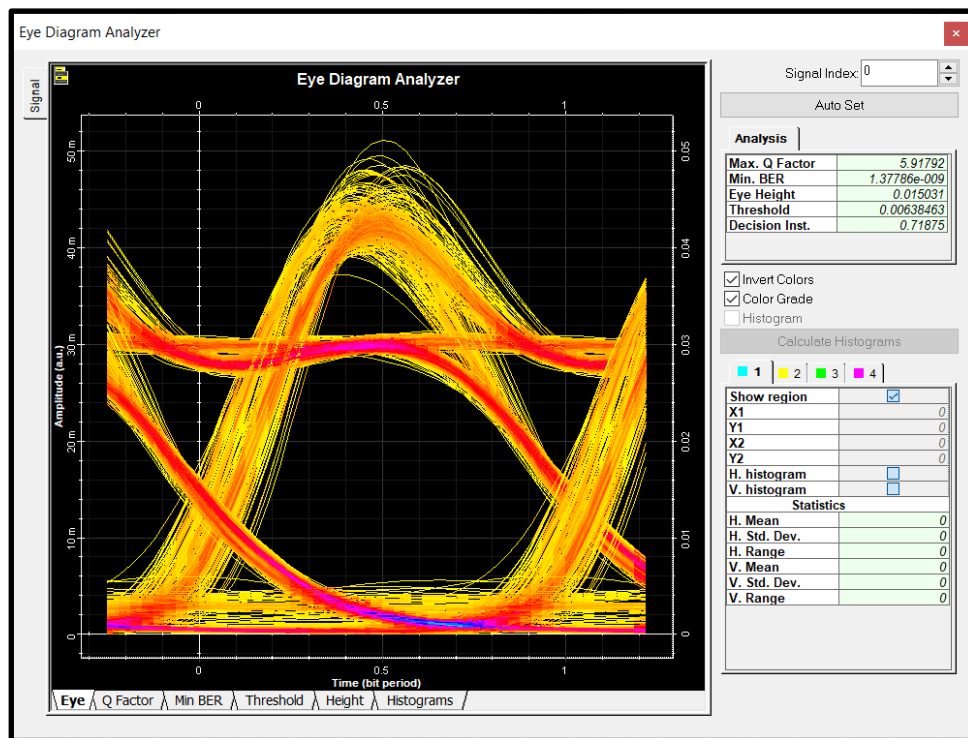


Figure II-22 : Diagramme de l'œil pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 100m



- Le taux d'erreur binaire BER

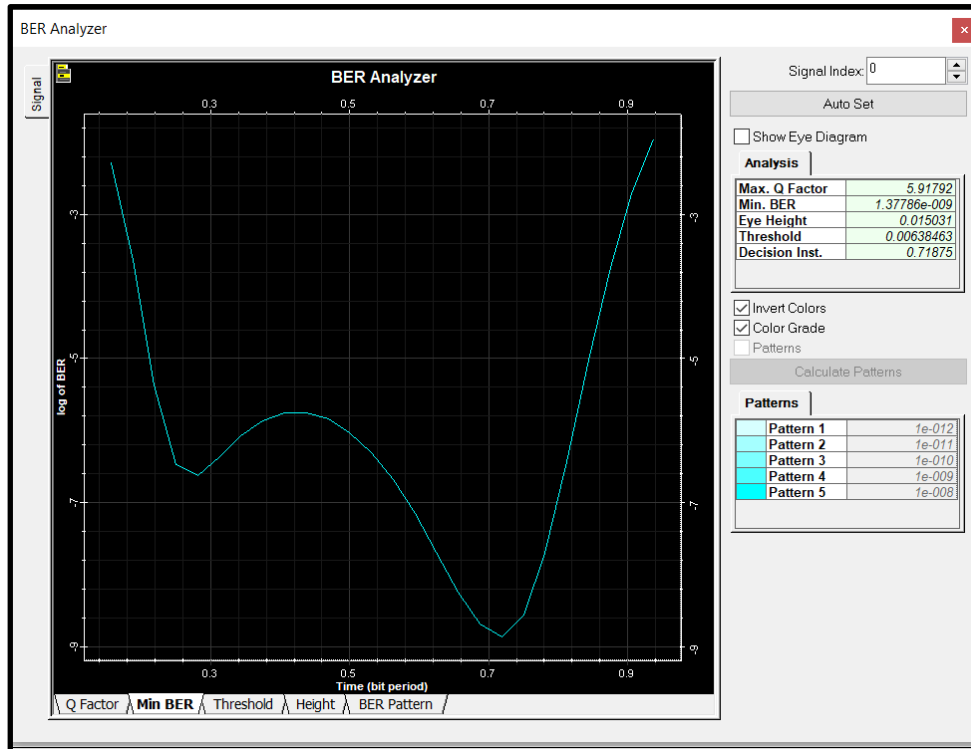


Figure II-23 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 100m

- Le facteur de qualité

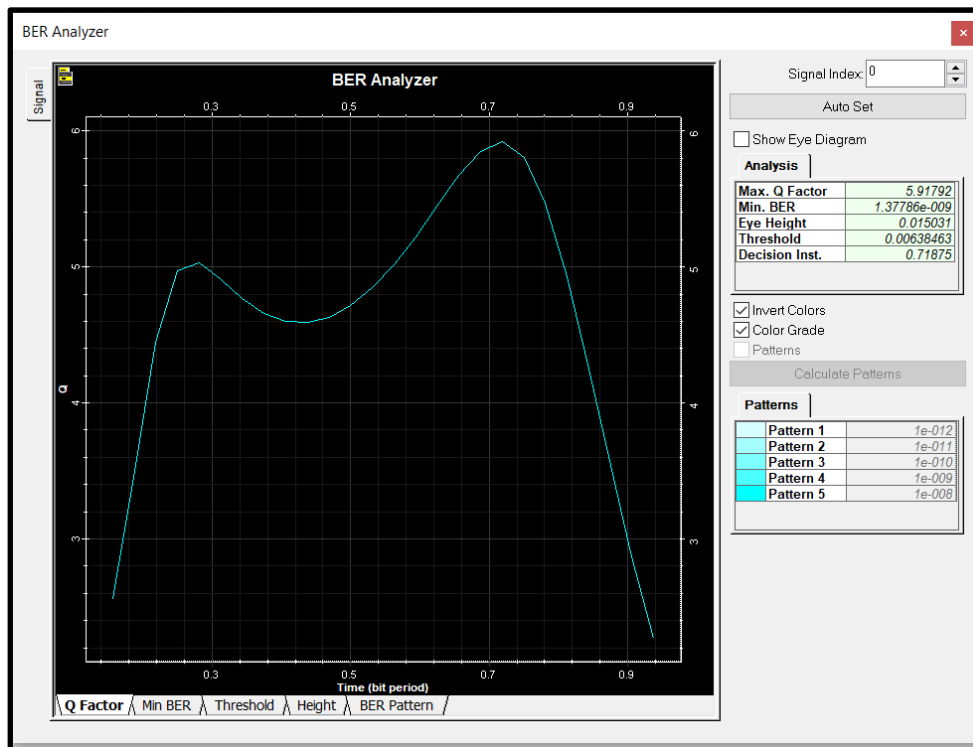


Figure II-24 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 100m

### II.3.5.2.2. Observations

- Le diagramme de l'œil est bien ouvert (Hauteur de l'œil =  $1.5031 \cdot 10^{-2}$ ).
- La valeur maximale du facteur de qualité Q est de 5.91792.
- La valeur minimale du taux d'erreur binaire BER est de  $1.37786 \cdot 10^{-9}$ .
- La valeur du seuil est de  $6.38463 \cdot 10^{-3}$ .
- La valeur du « Decision instant » est de 0.71875.

### II.3.5.3. Le cas d'une fibre optique d'une longueur de 10 kilomètres

#### II.3.5.3.1. Résultats

- Le diagramme de l'œil

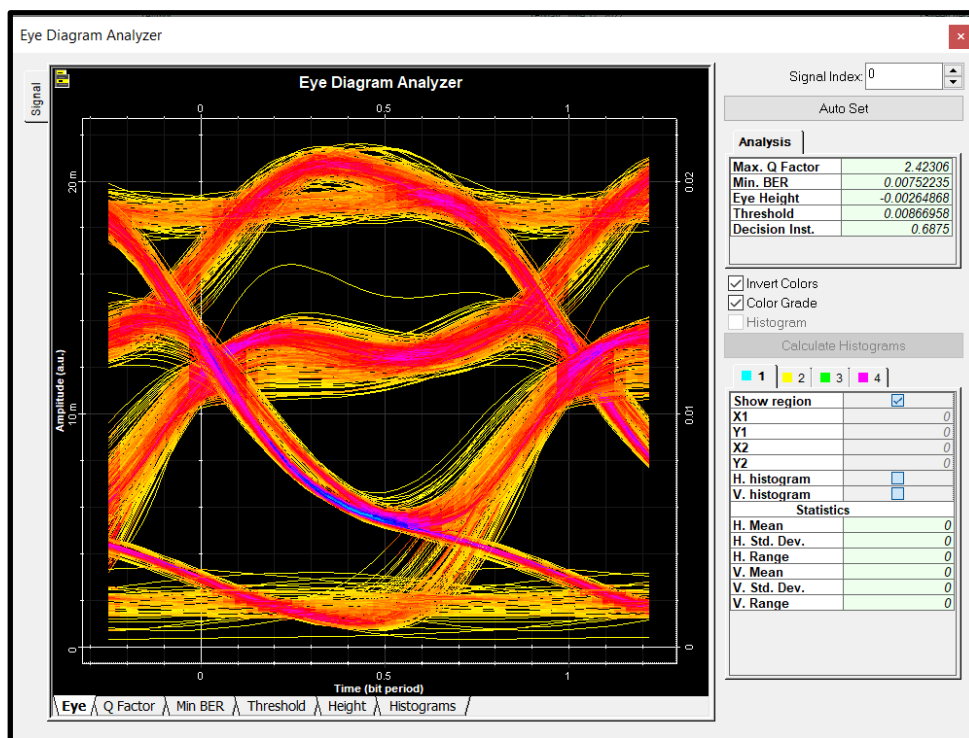


Figure II-25 : Diagramme de l'œil pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 10Km

- Le taux d'erreur binaire BER

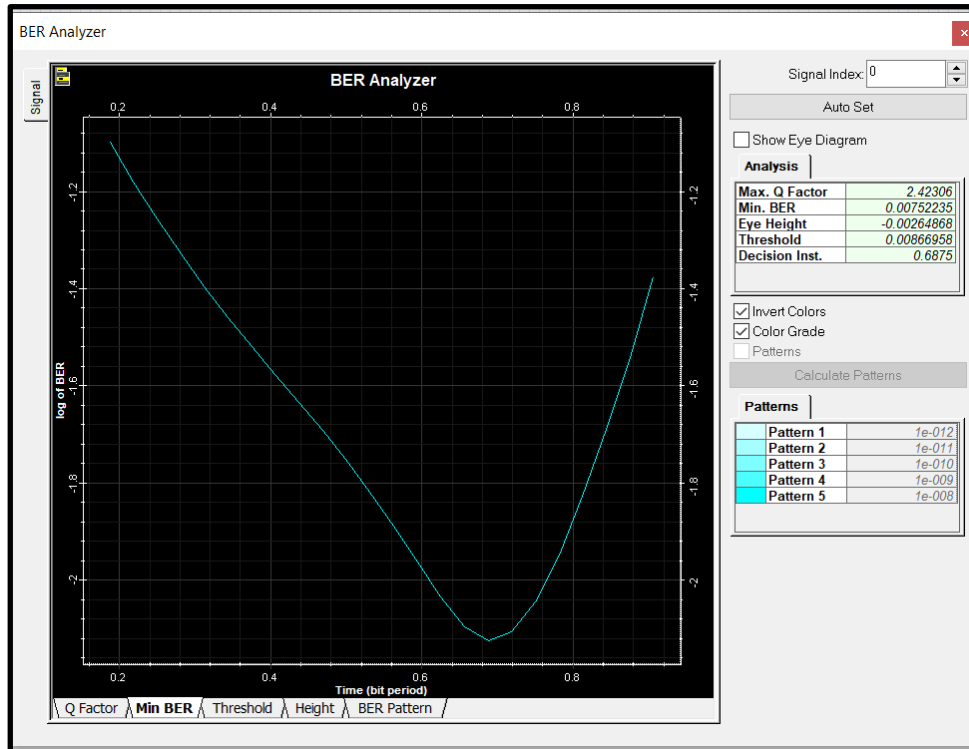


Figure II-26 : Graph représentant la variation du BER en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 10Km

- Le facteur de qualité

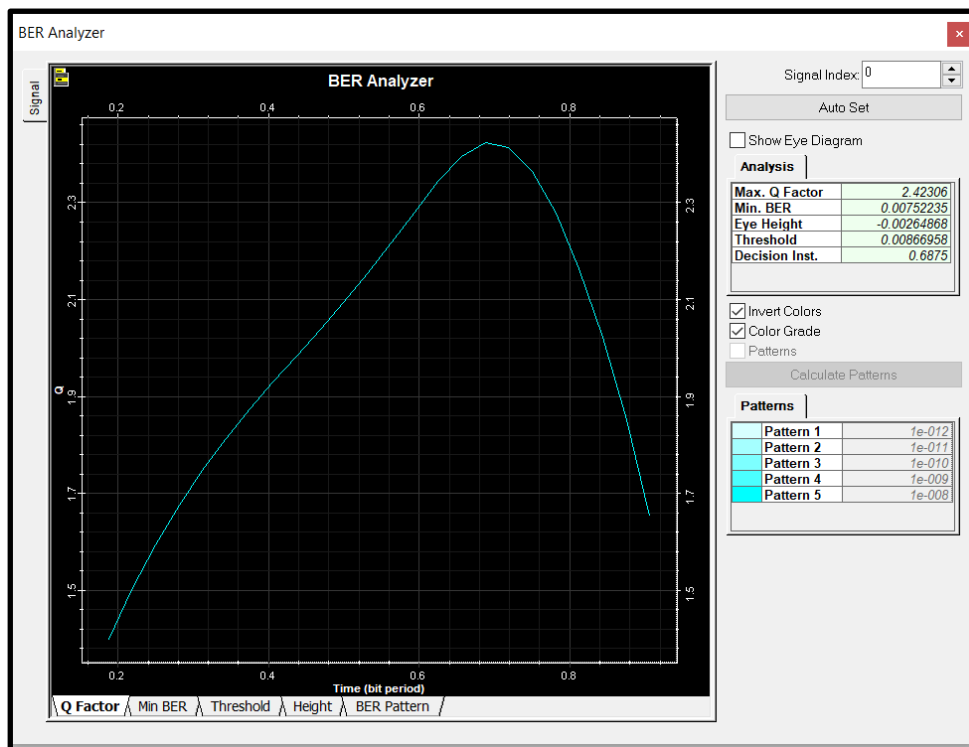


Figure II-27 : Graph représentant la variation du facteur Q en fonction du temps pour une diode laser conventionnel avec une fibre optique de longueur de 10Km

### II.3.5.3.2. Observations

- Le diagramme de l'œil est fermé (Hauteur de l'œil =  $-2.64868 \cdot 10^{-3}$ ).
- La valeur maximale du facteur de qualité Q est de 2.42306.
- La valeur minimale du taux d'erreur binaire BER est de  $7.52235 \cdot 10^{-3}$ .
- La valeur du seuil est de  $8.66958 \cdot 10^{-3}$ .
- La valeur du « Decision instant » est de 0.6875.

### II.3.6. Bilan obtenu à partir des différentes simulations

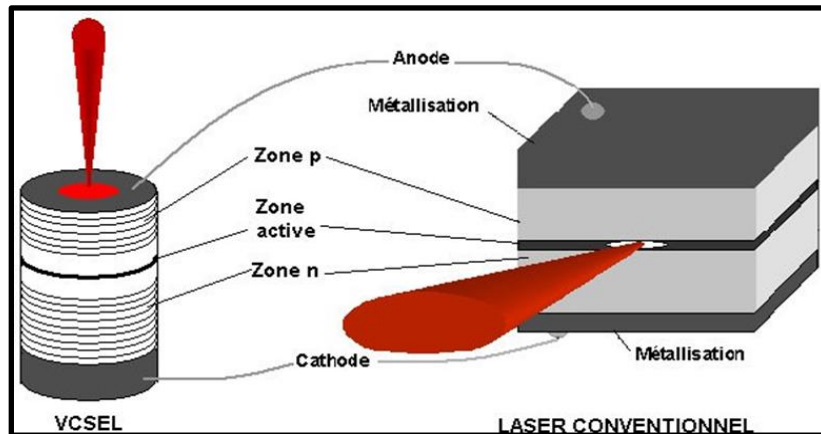
- Nous constatons que plus on augmente la distance, plus la qualité de transmission décroît.
- Les variations de BER indiquent que la longueur du câble à fibre optique utilisé influe sur les performances. Plus l'emplacement du récepteur (La photodiode APD) est éloigné, plus la valeur du BER obtenu est grande.
- Le facteur de qualité Q et le BER sont meilleurs pour les portées réduites (inférieure à 1 kilomètre).
- Le diagramme de l'œil est plus ouvert pour les courtes distances par rapport aux longues distances.
- Pour des transmissions optiques a courtes distances (quelques centaines de mètres) Il est préférable d'utiliser une diode laser conventionnel. Tandis que pour des transmissions optiques a longues distance (plus d'un kilomètre) il est préférable d'utiliser une diode laser VCSEL.
- Bien que la diode laser conventionnel présente une meilleure valeur de BER sur les courtes distances, les diagrammes de l'œil de la diode laser VCSEL est bien mieux former dans les deux cas (courtes et longue distances), c'est pour cela qu'il est bien plus intéressant d'étudier et de convoiter cette dernière.

## II.4. Comparaison VCSEL / Diode laser conventionnelle

Hormis la structure verticale, le VCSEL possède de nombreux autres avantages.

- Tout d'abord, la zone active étant constituée de puits quantiques, cela permet de réduire fortement le courant de seuil et l'épaisseur de la cavité (car le coefficient des miroirs de Bragg est très élevé). Ainsi, pour les VCSELS actuels, le courant de seuil est beaucoup plus faible que celui des lasers conventionnels :  $I_{th} > 20 \text{ mA}$  pour les lasers conventionnels et  $I_{th} < 4 \text{ mA}$  pour les VCSELS.
- La structure verticale et cylindrique permet au faisceau émis d'être circulaire et faiblement divergent. Alors que pour les émetteurs par la tranche, le faisceau est fortement elliptique et diverge en champ lointain, ce qui complique le couplage avec la fibre optique et oblige donc l'ajout d'un dispositif de focalisation au niveau de la connexion.

- D'autre part, la bande passante du VCSEL est assez élevée, pour un courant de polarisation très bas et donc une faible consommation de puissance [30].



*Figure II-28 : Comparaison du VCSEL avec une diode laser émettant par la tranche [30]*

- Malgré tout le VCSEL n'est pas arrivé à maturité. Depuis 1996 (date à laquelle le premier VCSEL fut commercialisé), beaucoup de travaux de recherche ont porté sur l'amélioration du confinement des porteurs dans la zone active. En effet, la traversée des miroirs de Bragg par le courant de polarisation, engendre des phénomènes parasites augmentant la résistance série ( $\approx 30$  Ohm contre  $\approx 5$  Ohm pour un laser conventionnel), ces problèmes sont accentués en fonctionnement dynamique. Une autre conséquence est la limitation en courant du composant : en règle générale, le courant maximum dans le VCSEL se situe entre 10 et 20mA ; au-delà, il y a échauffement et déformation des DBR empêchant toute oscillation dans la cavité.
- D'autre part, le VCSEL est monomode longitudinal, mais, lorsque le courant de polarisation augmente, de nombreux modes transverses sont excités. Ce phénomène est dû au « spatial hole burning », phénomène physique non linéaire associé à la diffusion des porteurs. Ce qui oblige le VCSEL à émettre dans des fibres multimodes [30].

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité plus de détails concernant la diode laser VCSEL, mais aussi comparé cette dernière avec une diode laser conventionnel, tout en présentant le logiciel Optisystem qui est un logiciel de simulation très puissant et très efficace dans les chaînes de transmissions optiques ainsi que l'ensemble des éléments qui ont servi dans la réalisation du modèle du système à simuler. Nous avons également défini les éléments qui ont servi de critères de qualité pour évaluer la qualité de transmission des données obtenues en sortie.

En effet, nous avons fait une simulation d'une chaîne de transmission optique en longueur d'onde de 1550 nm. Par la suite, on a interprété les résultats obtenus en se basant sur le digramme de l'œil, le facteur de qualité et le taux binaire et nous avons conclu que la diode laser VCSEL est plus efficace qu'une diode laser conventionnel pour les transmissions à longue distance.

# **Chapitre III : Conception et simulation d'une diode laser VCSEL à l'aide du logiciel SILVACO-TCAD**

## III.1. Introduction

Dans ce chapitre consacré à la simulation d'un dispositif VCSEL avec le logiciel SILVACO-TCAD, nous allons d'abord présenter la technologie de modélisation des dispositifs semi-conducteurs TCAD et le simulateur SILVACO exploitant cette technologie. Ensuite, nous passerons à la conception de notre dispositif VCSEL comportant une structure multi-puits quantiques émettant à une longueur d'onde de  $1.54 \mu\text{m}$ , puis on passera à l'extraction des résultats de la simulation et à l'interprétation de ces derniers.

## III.2. Présentation du logiciel de modélisation numérique SILVACO

### III.2.1. SILVACO ATLAS

Silvaco International est une société de logiciels qui offre des programmes pour la modélisation de tous les domaines de l'électronique, y compris les circuits analogiques et numériques. Cette société dispose de logiciel allant de la simple modélisation jusqu'aux schémas des circuits intégrés de pointe et des outils d'extraction [35].

Le logiciel SILVACO-ATLAS est un simulateur de dispositifs semi-conducteurs basé sur les principes physiques à deux et à trois dimensions, ce qui signifie qu'il peut prédire les caractéristiques électriques qui sont associés aux structures physiques bien spécifiées et des conditions de polarisation. Ceci est obtenu en rapprochant le fonctionnement d'un dispositif sur une grille à deux ou trois dimensions, comprenant un certain nombre de points de grille appelés nœuds.

En appliquant un ensemble d'équations différentielles, dérivées des lois de Maxwell, sur cette grille, vous pouvez simuler le transport des porteurs à travers une structure. Cela signifie que le rendement électrique d'un dispositif peut maintenant être modélisé en courant continu, alternatif ou en modes de fonctionnement transitoires [38].

ATLAS est conçu pour être utilisé avec les outils interactifs de VIRTUAL WAFER FAB (VWF). Il s'agit de DECKBUILD, TONYPLOT, DEVEDIT, MASKVIEWS et OPTIMIZER [39] :

- DECKBUILD : fournit un environnement d'exécution interactive.
- TONYPLOT : fournit des capacités de visualisation scientifique.
- DEVEDIT : est un outil interactif pour la spécification de la structure et du maillage ainsi que le raffinement.
- MASKVIEWS : est un éditeur de masque pour le circuit intégré IC.
- OPTIMIZER : supports d'optimisation à travers de multiples simulateurs.

Virtual Wafer Fabrication (VWF) aide à effectuer la simulation efficacement sans avoir recours à des logiciels tiers. De la (figure III-01), on voit que Silvaco avec VWF propose des logiciels de simulation puissants.

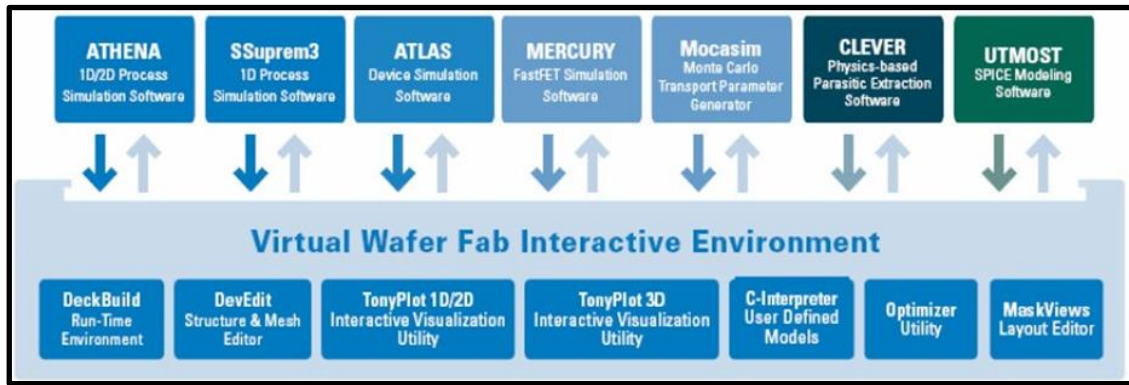


Figure III-01 : Environnement Virtual Wafer Fabrication [35]

### III.2.2. Entrées et Sorties dans SILVACO ATLAS

La (figure III-02) présente les types d'informations qui entrent et sortent d'ATLAS. La plupart des simulations sur ATLAS utilisent deux entrées : un fichier texte qui contient des commandes pour ATLAS à exécuter et un fichier de structure qui définit la structure qui sera simulée. ATLAS produit trois types de sortie. La sortie d'exécution fournit un guide pour le progrès des simulations en cours d'exécution, et c'est là que les messages d'erreur et les messages d'avertissement apparaissent. Les fichiers Log stockent toutes les tensions et courants terminaux de l'analyse de dispositif, et les fichiers de solution stockent les données deux et tridimensionnelles relatives à la valeur des variables de solution à l'intérieur du dispositif pour un seul point de polarisation [37].

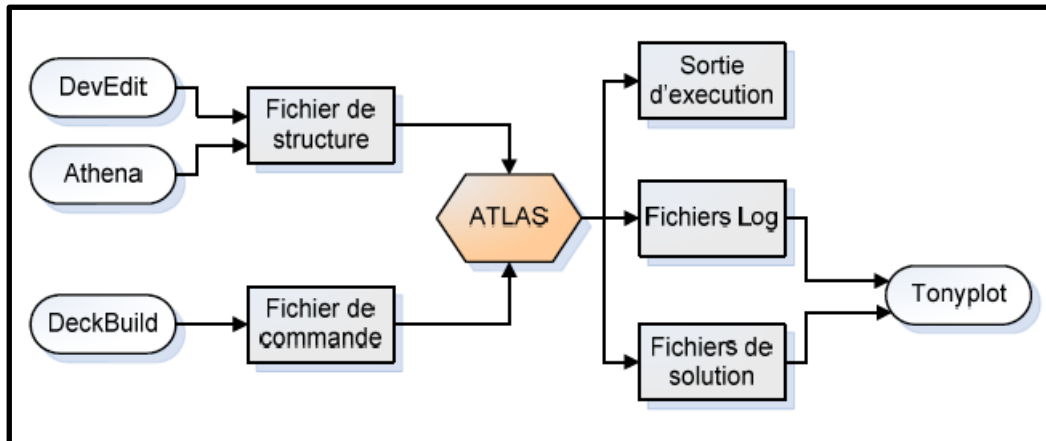


Figure III-02 : Entrées et sorties dans Silvaco Atlas [38]

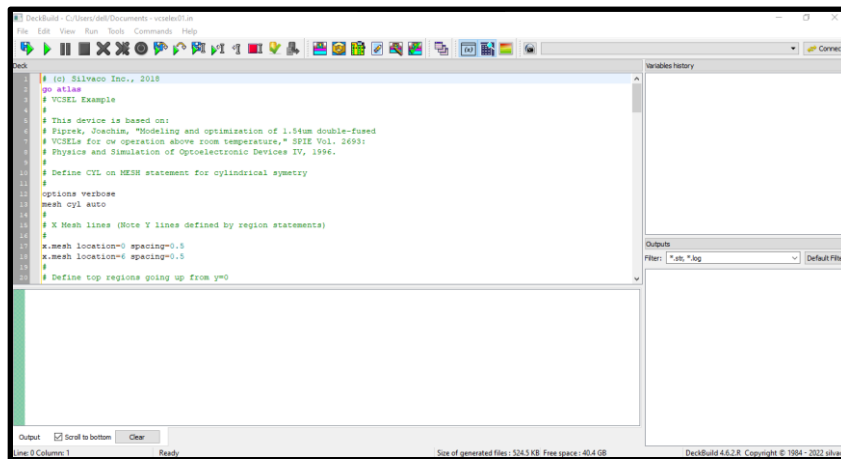
- Sortie d'exécution - guide de la progression de la simulation en cours d'exécution.
- Fichiers journaux (Log) - résumés des informations de sortie électrique.
- Fichiers de solution - stockent les données 2D et 3D relatives aux valeurs des variables de solution.



### III.2.3. ATHENA

Le logiciel de simulation ATHENA de SILVACO fournit des fonctionnalités générales pour la simulation numérique, physique et à deux dimensions du traitement des semi-conducteurs. Ces structures physiques sont utilisées comme entrées par ATLAS. Il traite la simulation comme une série d'événements consécutifs, et simule généralement en simultanéité avec ATLAS [45].

### III.2.4. DECKBUILD



*Figure III-03 : Menu de commandes de Deckbuild*

DeckBuild est un environnement d'exécution graphique interactive, pour le développement de procédé et les dispositifs de simulation des entrées de plateformes. Il se compose d'une fenêtre pour la création de la plate-forme d'entrée, d'une fenêtre pour la sortie du simulateur et le contrôle et d'un ensemble de fenêtres pop-up pour chaque simulateur qui fournissent le langage complet et le support d'exécution [40].

### III.2.5. TONYPLOT



*Figure III-04 : Fenêtre principale de TonyPlot*

TonyPlot est un outil de traitement graphique utilisé avec tous les simulateurs SILVACO et fait partie intégrante des VWF, Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil du dopage, et caractéristiques électriques). TONYPLOT peut fonctionner en autonome ou avec d'autres outils interactifs de VWF, comme DECKBUILD, VWF ou SPDB (figure III-04) [41].

### III.2.6. Structure D'entrée dans SILVACO ATLAS

Un fichier de commande ATLAS est une liste de commandes pour ATLAS à exécuter. Cette liste est stockée sous forme de fichier texte ASCII qui peut être préparé dans DECKBUILD ou en utilisant n'importe quel éditeur de texte. La préparation du fichier d'entrée en DECKBUILD est préférée, et peut être facilitée par l'utilisation appropriée du menu Commandes de DECKBUILD. Le fichier d'entrée contient une séquence d'instructions. Chaque déclaration se compose d'un mot clé qui identifie la déclaration et un ensemble de paramètres. Le format général est :

**<STATEMENT> <PARAMETER>=<VALUE>**

Le paramètre peut être : réel, entier, caractère et logique.

Quelques conseils sur la structure appropriée des déclarations sont énumérés ci-dessous :

- La déclaration doit venir en premier, mais après cela, l'ordre des paramètres dans une instruction n'est pas important.
- Il est seulement nécessaire d'utiliser suffisamment de lettres de n'importe quel paramètre pour le distinguer de tout autre paramètre sur la même déclaration. Ainsi, le paramètre Concentration peut être raccourci à Conc. Cependant, le paramètre Région ne peut pas être réduit à R car il y a également le paramètre RATIO associé à la déclaration du dopage.
- Les Valeurs Logiques peuvent être explicitement défini comme faux (False) en les faisant précéder par le symbole  $\wedge$ .
- Toute ligne commençant par # est ignorée. Ces lignes sont utilisées comme des commentaires.
- ATLAS peut lire jusqu'à 256 caractères sur une ligne. Cependant, il est préférable de répartir les longues déclarations d'entrée sur plusieurs lignes pour rendre le fichier d'entrée plus lisible. Le caractère \ à la fin d'une ligne indique la continuation.

L'ordre dans lequel les déclarations se produisent dans un fichier d'entrée d'ATLAS est important. Il y a cinq groupes de déclarations, et ceux-ci doivent se produire dans l'ordre correct. Ces groupes sont indiqués dans le (tableau III-05).

Chaque fichier d'entrée doit contenir ces cinq groupes en ordre. Sinon, cela entraînera généralement un message d'erreur et la fin de la compilation du programme, mais il pourrait également conduire à un mauvais fonctionnement du programme. Par exemple, les paramètres des matériaux ou modèles figurant dans le mauvais ordre ne peuvent pas être utilisés dans les calculs.

L'ordre des déclarations dans la définition du maillage, la définition structurelle, et les groupes de la solution est également important [39].

*Tableau III-05 : Groupes de commande ATLAS avec les déclarations de base dans chaque groupe [45]*

Group		Statements
1. Structure specification	_____	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material models specification	_____	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical method selection	_____	METHOD
4. Solution specification	_____	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results analysis	_____	EXTRACT TONYPLOT

L'ordre dans lequel les commandes ATLAS apparaissent est le suivant [46] :

- Spécification de la structure : MAILLE, RÉGION, ÉLECTRODE, DOPAGE.
- Spécification des modèles de matériaux : MATÉRIAUX, MODÈLES, CONTACT, INTERFACE.
- Sélection de la méthode numérique : METHOD.
- Spécification de la solution : LOG, SOLVE, LOAD, SAVE.
- Analyse des résultats : EXTRACT, TONYPLOT.

### III.2.7. Langage de commande pour définir une structure

L'organigramme suivant sur la (figure III-05) peut clarifier l'ordre des commandes d'Atlas.

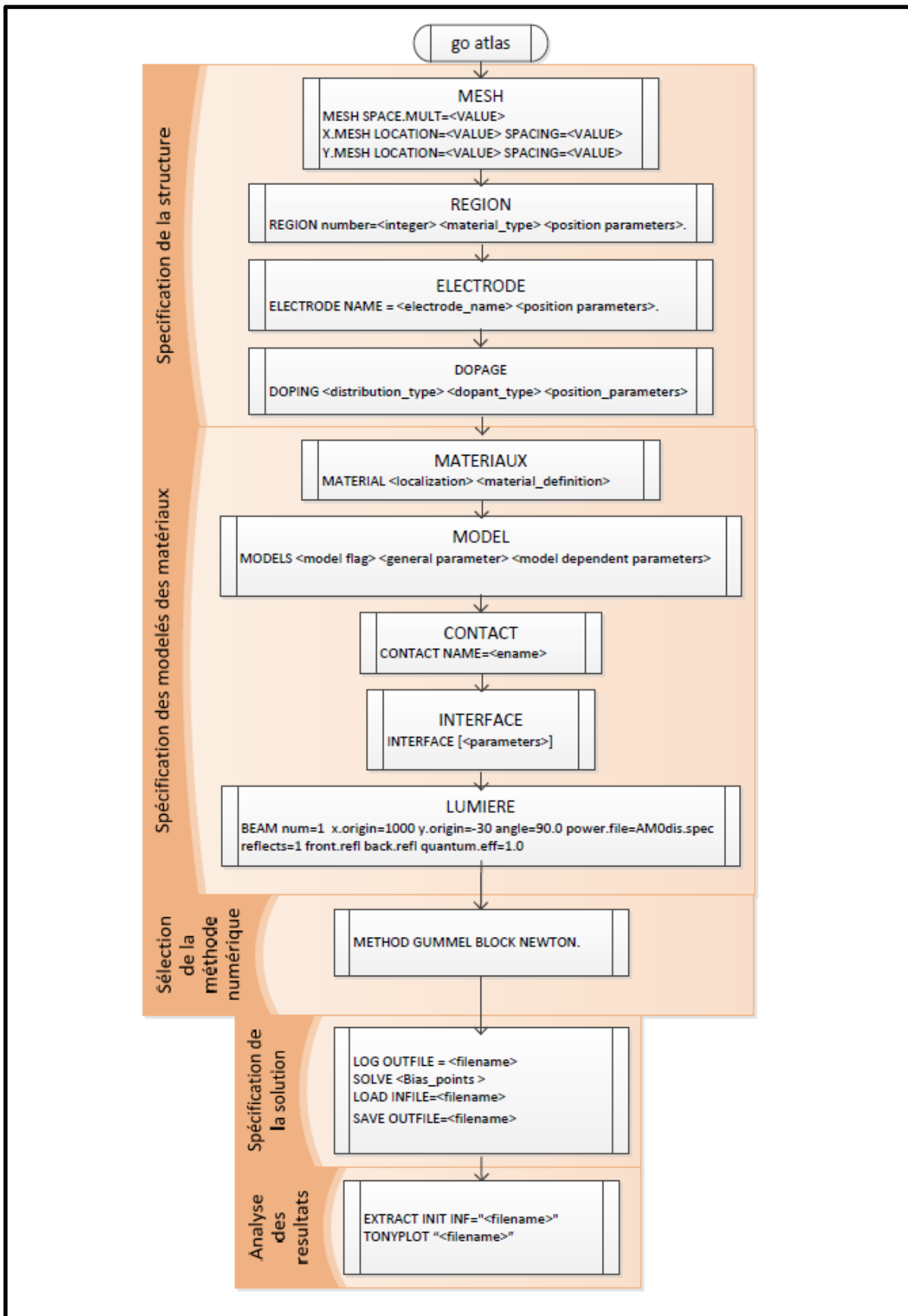


Figure III-05 : Organigramme des étapes de construction d'un model sur ATLAS

### III.3. Conception et simulation d'un VCSEL avec SILVACO

#### III.3.1. Première simulation (diode laser VCSEL à 6 puits quantiques)

##### III.3.1.1. Spécification de la structure de l'appareil

La structure du dispositif VCSEL à 6 puits quantique émettant à  $1,55 \mu\text{m}$  que nous allons simuler est constituée de :

- 30 périodes de  $GaAs/AlGaAs$  formant le DBR supérieur qui est recouvert par un contact métallique sur une couche de mise en phase de  $GaAs$  pour améliorer la réflectivité. L'absorption des miroirs est maintenue faible par un dopage au béryllium à  $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ .
- 28 périodes de  $GaAs/AlAs$  formant le DBR inférieur qui est recouvert par un contact métallique sur une couche de mise en phase de  $GaAs$ . L'absorption des miroirs est maintenue faible par un dopage au béryllium à  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ .

En ce qui concerne le dopage des miroirs de Bragg, l'élément par défaut choisi par le logiciel est le béryllium (Be), il fait partie des éléments bivalents les plus efficace pour le dopage.

Les interfaces de couche sont graduées paraboliquement pour réduire la résistance électrique de l'interface.

La région active à multiple puits quantiques MQW optimisée pour la simulation comprend 6 puits quantiques. Elle est intégrée dans des couches d'espacement  $InP$  qui ont été prolongées par de minces couches de  $GaAs$  au-dessus de chaque miroir fusionné pour augmenter la longueur d'onde d'émission.

##### III.3.1.1.1. Spécification de maillage

La première étape dans la construction d'un dispositif après la déclaration go atlas, est de définir le maillage. Le maillage est une grille qui recouvre la zone physique dans lequel le dispositif est construit et simulé. Le maillage est simplement réalisé par une série de lignes horizontales et verticales définies par l'utilisateur avec un espacement entre eux [37].

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [42].

On définit le maillage dans la direction  $X$  en utilisant les instructions  $X.MESH$ . Le maillage dans la direction  $Y$  est généralement spécifié avec les couches du dispositif dans les instructions  $REGION$ . On peut toutefois introduire les lignes de maillage  $Y$  en utilisant les instructions  $Y.MESH$  après les instructions  $X.MESH$ .

Pour que les lignes de maillage soient insérées automatiquement aux bords de la région définie, on utilise les instructions  $REGION$  et  $DBR$ . Pour activer cette fonctionnalité, on spécifie  $AUTO$  dans les instructions  $MESH$ .

Dans la première instruction on définit un maillage cylindrique symétrique :

*MESH CYL AUTO*

Et elle sera suivie par un ensemble d'instructions :

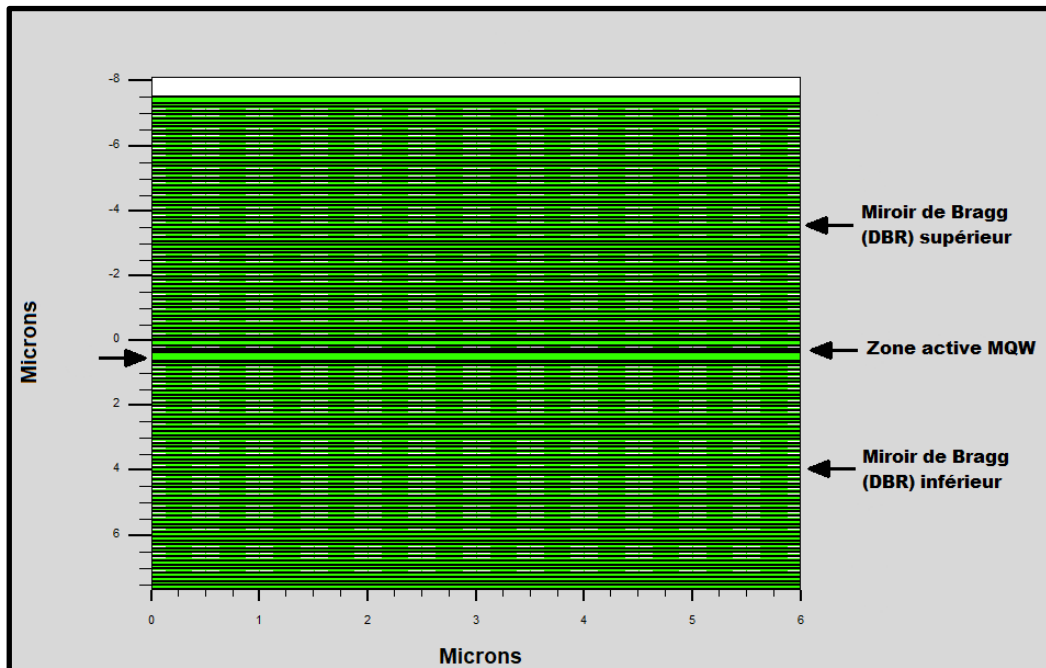
*X.MESH LOCATION=<valeur en  $\mu\text{m}$ > SPACING=<valeur en  $\mu\text{m}$ >*

L'instruction *X.MESH* spécifie le maillage dans la direction *X*, le paramètre *SPACING* définit l'espacement (résolution du maillage), tandis que le paramètre *LOCATION* définit l'intervalle de maillage ou l'espacement en microns [47].

```

3 # Définir l'instruction CYL sur MESH pour la symétrie cylindrique
4 #
5 options verbose
6 mesh cyl auto
7 #
8 # Lignes de maillage X (Note: les lignes Y définies par les déclarations de région)
9 #
10 x.mesh location=0 spacing=0.5
11 x.mesh location=6 spacing=0.5
12 #

```



*Figure III-06 : Maillage du dispositif VCSEL*

La structure se compose de 138 régions subdivisées par l'opération du maillage en  $(Y = 523) \times (X = 13)$  ce qui nous donne un total de 6799 nœuds sur toute la structure, cela permet d'avoir une grande précision de calcul.

### III.3.1.1.2. Spécification des régions

La déclaration de la région est utilisée pour séparer l'instruction du maillage initial en blocs distincts et définit les paramètres des matériaux initiaux qui peuvent être désignés plus tard par des numéros de région. Tous les domaines maillés d'une structure doivent être assignés à une région et les régions doivent être ordonnées de la plus basse vers la plus élevée. Par exemple, la région 5 ne peut pas être définie avant la région 4 [36].

*REGION number=<entier> <type de matériau> < paramètres de position>*

On spécifie les régions de périphérique à l'aide des instructions *REGION* et *DBR*. Ces instructions spécifient l'épaisseur de la couche, la composition, le dopage, l'ordre de placement et l'information de maillage dans la direction *Y*. L'ordre des instructions *REGION* et *DBR* est généralement défini par l'ordre dans lequel les couches apparaissent dans la structure. On peut aussi utiliser des modèles de puits quantiques pour le gain et la recombinaison spontanée en spécifiant *QWELL* sur l'énoncé *REGION* pour les régions appropriées.

La région est spécifiée par l'instruction *REGION* dans laquelle la composition du matériau est spécifiée par le paramètre *MATERIAL* dont les valeurs sont les noms des matériaux. Pour les matériaux ternaires et quaternaires, on peut également spécifier les fractions de composition *X* ou *Y* ou les deux, en utilisant les paramètres *X.COMPOSE* ou *Y.COMPOSE* ou les deux. On peut utiliser les paramètres *DONORS* et *ACCEPTORS* pour spécifier des densités uniformes de donneurs ionisés ou d'accepteurs, ou les deux, alors que l'épaisseur de la région dans la direction *Y* en microns est spécifiée par le paramètre *THICK*. On peut également utiliser les paramètres *X.MIN*, *X.MAX*, *Y.MIN* et *Y.MAX* pour spécifier l'emplacement et l'étendue de la région [47].

Dans notre cas les zones de contact et les zones d'espace sont déclarées de cette manière :

```
16 #
17 region material=GaAs thick=0.01 sy=0.005 accept=4e19 top
18 region material=GaAs thick=0.02 sy=0.01 accept=4e17 top
19 #
```

```
24 # zone de contact supérieur
25 #
26 region material=GaAs thick=0.184 sy=0.02 accept=4e17 top
27 region material=GaAs thick=0.02 sy=0.01 accept=2e19 top
28 #
```

```
60 # zone de contact inférieure
61 #
62 region material=GaAs thick=0.02 sy=0.005 donor=5e18 bottom
63 #
```

### III.3.1.1.3. Spécification des réflecteurs de Bragg distribués

Un réflecteur de Bragg distribué ou *DBR* est une structure périodique composée de régions de deux compositions de matériaux alternés. La spécification d'un *DBR* par une série d'instructions *REGION* est possible mais peut être fastidieuse. On peut donc utiliser l'instruction *DBR* pour simplifier la spécification (l'instruction *DBR* peut être utilisée pour spécifier n'importe quel super réseau composé de couches de deux compositions de matériaux alternées).

Les paramètres *MAT1* et *MAT2* spécifient les noms de matériaux des deux couches.

Les paramètres *X1.COMP*, *Y1.COMP*, *X2.COMP* et *Y2.COMP* sont utilisés pour spécifier les fractions de composition *X* et *Y* des deux matériaux pour les matériaux ternaires et quaternaires. Les épaisseurs des deux couches sont spécifiées par les paramètres *THICK1* et *THICK2* de l'instruction *DBR*. Le dopage pour les couches est spécifié par les paramètres *NA1* et *NA2* pour les accepteurs. Les paramètres *ND1* et *ND2* pour les donneurs [47].

- Spécification des réflecteurs de Bragg supérieurs

```

20 # Mirroirs de bragg (DBR) supérieurs
21 #
22 dbr half.cyc=60 thick1=0.1157 thick2=0.1273 n1=3 n2=3 mat1=GaAs mat2=AlGaAs x2.comp=0.67 na1=4e17 na2=4e17 top
23 #
    
```

- Spécification des réflecteurs de Bragg inférieurs

```

56 # Mirroirs de bragg (DBR) inférieurs
57 #
58 dbr half.cyc=56 thick1=0.1157 thick2=0.134 n1=3 n2=3 mat1=GaAs mat2=AlAs nd1=1e18 nd2=1e18 bottom
59 #
    
```

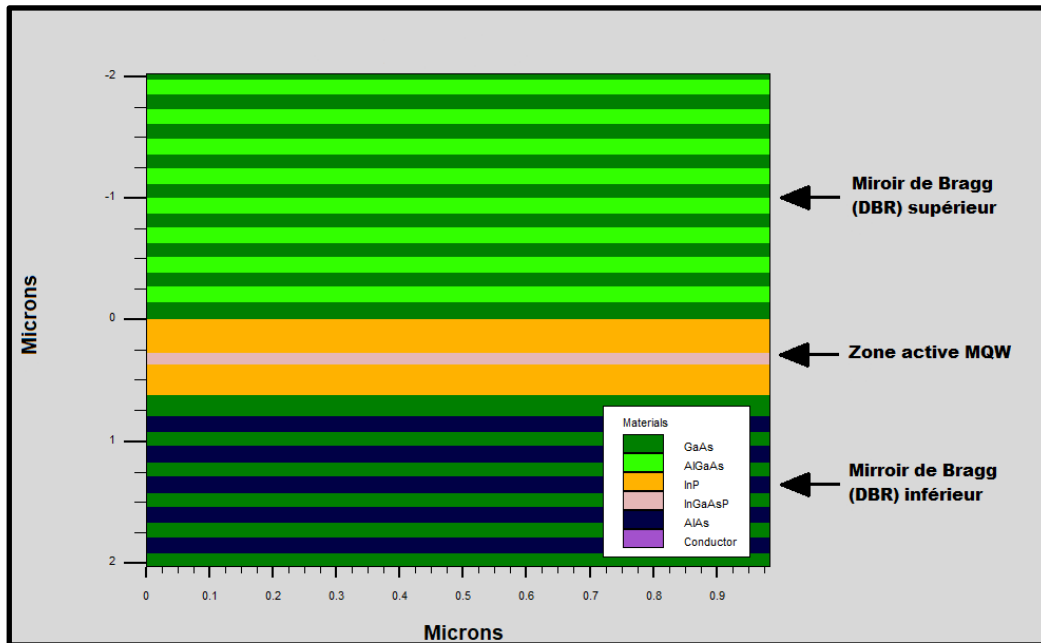


Figure III-07 : Zoom sur la zone active de la diode laser VCSEL

### III.3.1.1.4. Spécification des puits quantiques

Le modèle de puits quantique parabolique est utilisé pour prédire les énergies des états liés dans une région pour une utilisation ultérieure dans la modélisation du gain optoélectronique, de la recombinaison radiative et de l'absorption.

On peut activer le modèle de puits quantique en spécifiant *QWELL* dans l'instruction *REGION* ou *MODELS*. L'orientation et la dimensionnalité du solveur Schrödinger sont définies par le paramètre *SP.GEOMETRY* sur l'instruction *MODELS* avec une valeur par défaut de *IDY*. On peut également résoudre les cas *IDX* et *IDZ*. Les régions avec le paramètre *QWELL* sont traitées comme des puits quantiques indépendants, sauf si elles sont adjacentes et ont la même orientation.

Par défaut, le maillage Atlas est utilisé pour la discrétisation. Si le maillage Atlas est trop grossier, on peut spécifier *WELL.NX* ou *WELL.NY* ou *WELL.NZ* ou tous les trois dans l'instruction *REGION* ou *MODELS* pour utiliser un maillage de puits quantiques auxiliaire. Si un maillage auxiliaire est utilisé, l'échantillonnage est uniforme et les valeurs d'énergie de l'état lié sont interpolées sur le maillage du dispositif pour la modélisation optique. Généralement, on doit sélectionner *WELL.NX*, *WELL.NY* et *WELL.NZ* pour résoudre correctement la géométrie, cependant il existe un compromis entre la précision et la vitesse de calcul [47].



La déclaration de la région active *MQW* décrite précédemment dans la spécification des paramètres du dispositif simulé est déclaré comme suit :

```

32 region material=InP thick=0.178 sy=0.04 accept=1e18 bottom
33 region material=InP thick=0.1 sy=0.05 accept=1e16 bottom
34 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
35 region material=InGaAsP thick=0.0055 x.comp=0.24 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom \
36 well well.nx=12 well.ny=99
37 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
38 region material=InGaAsP thick=0.0055 x.comp=0.24 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom \
39 well well.nx=12 well.ny=99
40 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
41 region material=InGaAsP thick=0.0055 x.comp=0.24 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom \
42 well well.nx=12 well.ny=99
43 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
44 region material=InGaAsP thick=0.0055 x.comp=0.24 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom \
45 well well.nx=12 well.ny=99
46 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
47 region material=InGaAsP thick=0.0055 x.comp=0.24 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom \
48 well well.nx=12 well.ny=99
49 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
50 region material=InGaAsP thick=0.0055 x.comp=0.24 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom \
51 well well.nx=12 well.ny=99
52 region material=InGaAsP thick=0.008 x.comp=0.52 y.comp=0.82 sy=0.001 bottom
53 region material=InP thick=0.258 sy=0.04 donor=5e18 bottom
54 region material=GaAs thick=0.05 sy=0.025 donor=1e18 bottom

```

### III.3.1.1.5. Spécification des électrodes

La définition des électrodes permet de réaliser les contacts Grille, Anode et Cathode [43].

Cependant, SILVACO ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définis [35].

Une fois que vous avez spécifié les régions et les matériaux, définissez au moins une électrode qui entre en contact avec un matériau semi-conducteur. Cela se fait avec l'instruction "ELECTRODE" :

**ELECTRODE NAME=<nom de l'électrode> < paramètres de position >**

Si aucun paramètre de coordonnée Y n'est spécifié, l'électrode est supposée être située au sommet de la structure. Vous pouvez également utiliser les paramètres RIGHT, LEFT, TOP et BOTTOM pour définir l'emplacement [44]. Par exemple :

**ELECTRODE NAME=SOURCE LEFT LENGTH=0.5**

Spécifie que l'électrode source commence au coin supérieur gauche de la structure et s'étend vers la droite sur la distance LENGTH [44].

Les paramètres de position sont spécifiés par les instructions *X.MIN*, *X.MAX*, *Y.MIN* et *Y.MAX*. On peut également utiliser certains raccourcis lors de la définition d'une électrode en utilisant les commandes suivantes : *RIGHT*, *LEFT*, *TOP*, *BOTTOM*, *NUMBER*, *NAME* [47].

Dans notre cas on considère l'anode couvrant tout le haut de la structure (*X.MAX=6*) mais sans dimension selon la direction *Y* pour ne pas encombrer le programme avec des calculs inutiles. Vu les dimensions de l'électrode, les différents mécanismes de pertes à ce niveau peuvent être négligé, de même, la cathode couvre aussi le bas du dispositif.

```

68 # Électrodes
69 #
70 electrode num=1 name=anode top x.max=6
71 electrode num=2 name=cathode bottom
72 #

```

### III.3.1.2. Définition du modèle

Après la spécification de notre structure, on procède si nécessaire à la modification des caractéristiques et des paramètres des matériaux utilisés qu'ATLAS prend par défaut, et à la définition de notre choix du modèle physique qui sera utilisé pendant la simulation. Ces actions sont accomplies en utilisant respectivement les instructions *CONTACT*, *MATERIAL* et *MODELS*. Les modèles d'ionisation d'impact peuvent être activés à l'aide de l'instruction *IMPACT*. Les propriétés d'interface sont définies à l'aide de l'instruction *INTERFACE* [47].

#### III.3.1.2.1. Spécification des propriétés des matériaux

Une fois que la structure est complètement assemblée, les matériaux utilisés pour construire le dispositif doivent eux-mêmes être définis. La déclaration *MATERIAL* permet la spécification de certains paramètres de base. Ces valeurs peuvent s'appliquer à un matériau ou à une région [38].

La capacité la plus importante que les déclarations *MATERIAL* permettent est la création des matériaux définis par l'utilisateur. L'utilisateur peut utiliser arbitrairement n'importe quel matériau lors de la définition d'une structure, puis modifier l'ensemble de ses propriétés pour correspondre à celle d'un matériau désiré. Bien que le *MATERIAL* porte le nom du matériau choisi, il agira fonctionnellement comme n'importe quel matériau l'utilisateur le désire [34].

Il existe des paramètres par défaut pour les propriétés des matériaux utilisés dans la simulation. Nos modifications peuvent s'appliquer à :

Un matériau spécifié :

**MATERIAL MATERIAL=<Nom\_du\_matériau>**

Une région spécifiée :

**MATERIAL REGION=<Numéro\_de\_la\_région>**

L'instruction *MATERIAL* nous permet de spécifier plusieurs propriétés à modifier [47].

Dans notre cas certaines modifications sont nécessaires, essentiellement pour améliorer la convergence électrique vers la zone active à travers l'atténuation de la résistivité des DBRs.

```

75 # Ici, nous lissons les DBR pour une meilleure convergence électrique
76 #
77 material material=AlGaAs eg300=1.42 affin=4.07 nc300=4.35e17 nv300=8.16e18 permi=13.2
78 material material=AlAs eg300=1.42 affin=4.07 nc300=4.35e17 nv300=8.16e18 permi=13.2
79 material mater=InGaAsP mun=1000 mup=500 copt=1e-15 epsinf=12.2500 alphaa=500.0 nc300=1e19 nv300=1e19
80 material mater=AlGaAs epsinf=9.2700
81 material mater=GaAs epsinf=11.2200
82 material mater=AlAs epsinf=8.3500
83 material mater=InP epsinf=9.9200 nc300=1e19 nv300=1e19
84 material tc.a=-0.4665 tc.b=0.0092 tc.c=4e-7 \
85 hc.a=1.82476 hc.b=2.5004e-4 hc.c=0 hc.d=17024
86 #

```

#### III.3.1.2.2. Spécification du modèle

Les modèles physiques se répartissent en cinq catégories : la mobilité, la recombinaison, les statistiques des porteurs, l'ionisation par impact, et l'effet tunnel.

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

### MODELS CONMOB FLDMOB SRH

CONMOB est le modèle de mobilité dépendant de la concentration du dopage. FLDMOB est le modèle de mobilité dépendant du champ électrique parallèle. SRH est le modèle Shockley- Read-Hall pour les statistiques des porteurs de charge [35].

Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT.

La perte de chaleur de l'appareil est définie à l'aide de contacts thermiques dans la déclaration *THERMCONTACT*, qui spécifie les conductivités thermiques pour simuler la perte de chaleur par rayonnement via les surfaces exposées ou la conduction à travers le semi-conducteur vers un dissipateur thermique [47].

```

87 # Activer certains modèles
88 #
89 model srh fermi lat.temp li spont
90 thermcontact num=1 elec.num=2 ext.temp=300
91 thermcontact num=2 x.min=6 alpha=100 ext.temp=300
92 thermcontact num=3 elec.num=1 alpha=100 ext.temp=300
93 #

```

### III.3.1.3. Activation de la solution VCSEL

#### III.3.1.3.1. Spécification des paramètres du simulateur VCSEL:Atlas

L'instruction *VCSEL* est définie pour activer le simulateur *VCSEL:Atlas*. Une fois activé, les équations des dispositifs à semi-conducteurs sont résolues de manière auto-cohérente avec les équations du taux d'émission de photons et l'équation de Helmholtz.

Pour activer la simulation de test de réflectivité, il faut procéder comme suit :

- Spécification du paramètre *VCSEL.CHECK* dans une instruction *VCSEL*.
- Spécification du paramètre *VCSEL.INCIDENCE* pour surveiller la réflectivité de la cavité froide pour la lumière incidente sur une structure à partir du haut ou du bas de la structure.

*VCSEL.INCIDENCE* = 1 - L'incidence de la lumière par le haut.

*VCSEL.INCIDENCE* = 0 - L'incidence de la lumière par le bas.

*VCSEL.INCIDENCE* = 2 ou > 2 - Les deux directions d'incidence de la lumière sont prises en compte. Le programme compare les fréquences de résonance de la cavité obtenues pour chaque direction d'incidence. Si les résultats ne concordent pas dans une certaine tolérance, *VCSEL:Atlas* se fermera avec une erreur.

Par défaut, la lumière est incidente par le haut de la structure.

- Spécification des paramètres *PHOTON.ENERGY* ou *OMEGA* pour l'énergie ou la fréquence initiale des photons.

- Spécification des paramètres *EINIT* et *EFINAL* qui définissent la plage d'énergie des photons dans le test de réflectivité. Si elles ne sont pas spécifiées, elles prennent les valeurs par défaut suivantes :  $EINIT = 0,8 \text{ PHOTON.ENERGY}$  et  $EFINAL = 1,2 \text{ PHOTON.ENERGY}$ .
- Spécification *NSPEC* pour le nombre de points d'échantillonnage entre *EINIT* et *EFINAL*. La valeur par défaut est  $NSPEC = 100$ .
- *NMODE* spécifie le nombre de modes d'intérêt transversaux. La valeur par défaut est  $NMODE = 1$ .
- *PROJ* permet une résolution plus rapide des équations de taux de photons en dessous du seuil. Ce schéma de solution doit être désactiver lorsque le biais atteint le seuil d'effet laser par la spécification du paramètre *PROJ* dans une instruction *VCSEL*.
- *PERTURB* permet une résolution plus rapide de l'équation de Helmholtz. Lorsque spécifié, le programme résout l'équation d'onde longitudinale une seule fois. L'approche perturbatrice est utilisée pour expliquer les changements d'indice de réfraction.
- *PERTE* indique les pertes laser supplémentaires [47].

```

105 # configurer les modèles laser
106 #####
107 vcsel vcsel.check vcsel.incidence=1 proj itmax=30 maxch=100.0 toler=0.010 photon.energy=0.8 einit=0.75 efinal=0.85
    perturb
108 #

```

### III.3.1.3.2. Méthodes numériques

ATLAS contient plusieurs méthodes numériques pour calculer les solutions aux problèmes de dispositif à semi-conducteur. Il existe trois principaux types de méthodes numériques. La première méthode est la méthode de GUMMEL qui est utile lorsque le système d'équations est faiblement couplé mais a seulement la convergence linéaire. La méthode suivante est la méthode de NEWTON, qui est utile lorsque le système d'équations est fortement couplé et a convergence quadratique. Cette méthode prend plus de temps pour résoudre les quantités qui sont essentiellement constantes ou faiblement couplées et exige également une estimation initiale plus précise du problème pour obtenir la convergence. La dernière méthode est la méthode des blocs qui peut fournir des temps de simulation plus rapides [37].

Les paramètres numériques suivants contrôlent les performances de la simulation *VCSEL* :

- *TOLER* définit la tolérance relative souhaitée pour le calcul de la densité de photons. La valeur par défaut est 0.01. Le réglage de ce paramètre à une valeur inférieure peut ralentir considérablement le calcul. L'utilisation d'une valeur plus élevée entraînera des calculs plus rapides mais moins précis.
- *ITMAX* définit le nombre maximal d'itérations *VCSEL* externes lors du calcul de la densité de photons. La valeur par défaut est 30.

- *TAUSS* est un paramètre d'itération utilisé dans le calcul des densités de photons. L'utilisation d'une valeur plus élevée de ce paramètre peut accélérer le calcul mais peut entraîner des problèmes de convergence [47].

### III.3.1.4. Les solutions

L'instruction *Log* crée le fichier de sauvegarde des caractéristiques électriques (l'état d'équilibre, le régime transitoires ou DC) et les données déterminées par une déclaration *Solve* après la déclaration *Log*.

La déclaration *Solve* suit une instruction *Log* et calcule les informations relatives à un ou plusieurs points de polarisation.

Pour visualiser le fichier de données enregistrés, l'instruction *Tonyplot* est très bien adaptée pour ce genre de solutions, elle s'écrit comme suit [47] :

*Log outfile = <nom du fichier >.log*

*Solve vanode= vstep= vfinal= name=*

*Tonyplot <nom fichier >.log*

### III.3.1.5. Enregistrement et visualisation préliminaire de la structure

Une fois la structure définie, on peut enregistrer les informations dans un fichier *.str* en utilisant l'instruction :

*save outfile=<nom\_du\_fichier>.str*

De la même manière, à l'aide de l'outil *TonyPlot* on peut visualiser le schéma de la structure en utilisant l'instruction :

*Tonyplot <nom\_du\_fichier>.str*

A la fin du programme, on introduit l'instruction *QUIT*, les résultats obtenus seront alors affichés immédiatement sous *Tonyplot* [47].

```

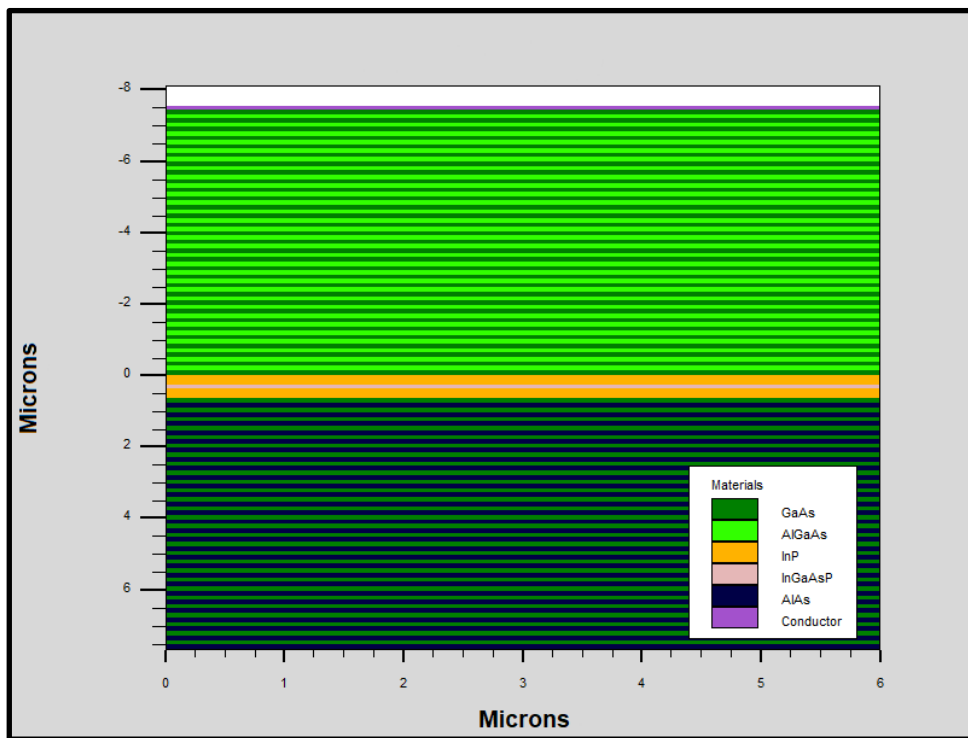
109 # activer un fichier log pour capturer les données
110 #
111 log outf=vcsel6puits.log
112 #
113 # résoudre en fonction de la tension
114 #
115 solve prev
116 solve vstep=0.1 name=anode vfinal=5
117 save outf=vcsel6puits_0.str
118 solve vstep=0.1 name=anode vfinal=5
119 save outf=vcsel6puits_1.str
120 method ^las.proj block
121 vcsel tauss=0.01
122
123 solve vstep=0.1 name=anode vfinal=5
124 save outf=vcsel6puits_2.str
125 solve vstep=0.1 name=anode vfinal=5
126 save outf=vcsel6puits_3.str
127 tonyplot vcsel6puits.log -set vcsel6puits_0.set
128 tonyplot vcsel6puits_3.str -set vcsel6puits_1.set
129 quit

```

### III.3.1.6. Résultats et discussions

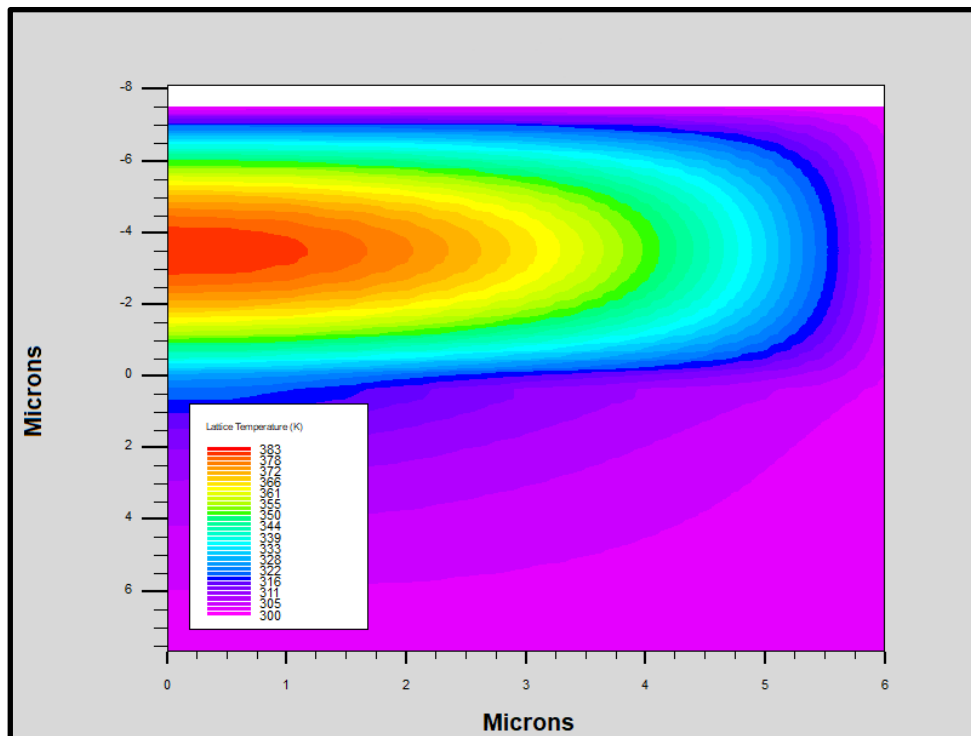
Dans cette section nous allons présenter les principaux résultats caractérisant la diode VCSEL obtenue suite à la simulation.

- **Structure de la diode laser VCSEL**



*Figure III-08 : Schéma représentant la structure de la diode laser VCSEL*

- **Répartition de la température de la diode laser VCSEL**



*Figure III-09 : Schéma représentant la répartition de la température de la diode laser VCSEL*

**Commentaires :** D'après la figure on remarque que la diode laser chauffe dans la partie supérieure (c'est la partie dopée par un dopage de type P).

• Répartition de l'intensité lumineuse de la diode laser VCSEL

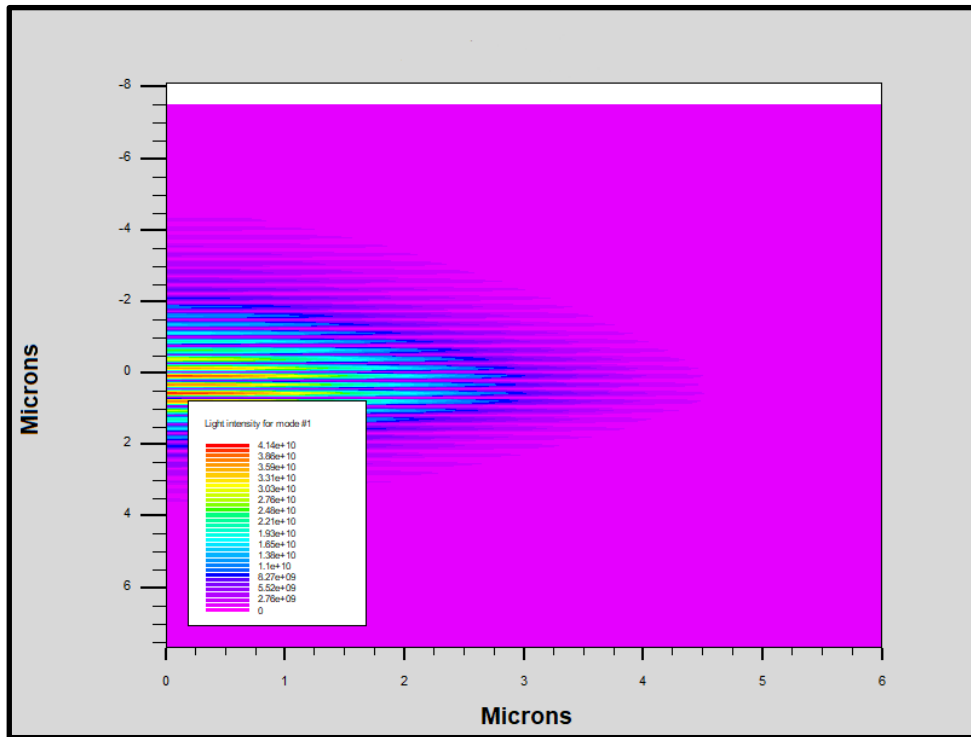


Figure III-10 : Schéma représentant la répartition de l'intensité lumineuse de la diode laser VCSEL

Commentaires : D'après la figure on remarque que l'intensité de la lumière est concentrée au niveau de la zone active de la structure ce qui confirme que l'effet laser se produit dans cette région.

• Le dopage de la diode laser VCSEL

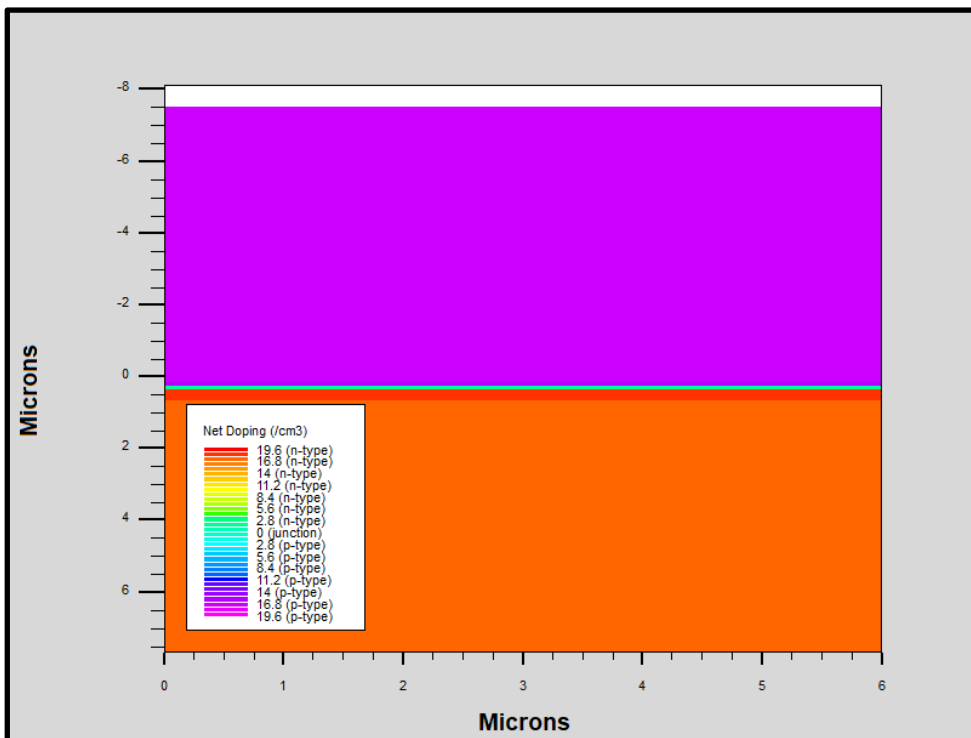
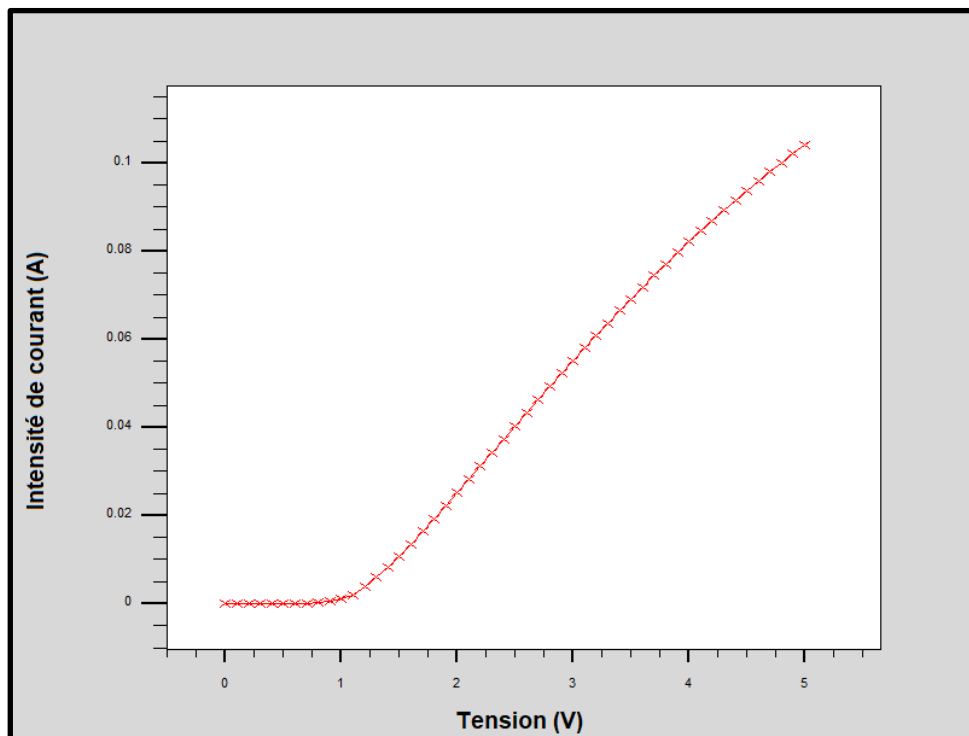


Figure III-11 : Schéma représentant le dopage de la diode laser VCSEL

- **Variation du courant en fonction de la tension**



*Figure III-12 : Graph représentant la variation de l'intensité de courant en fonction de la tension (6 puits quantiques)*

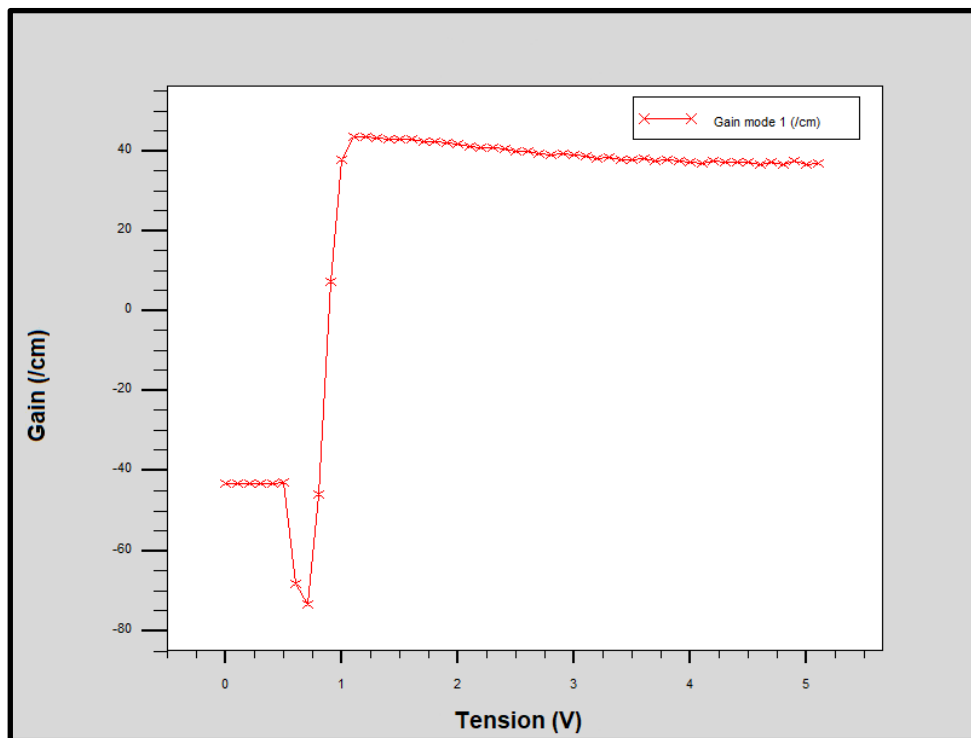
**Commentaires :**

La simulation par SILVACO et la modélisation de cette structure par TONYPLOT, nous ont permis d'obtenir les caractéristiques du courant en fonction de la tension  $I(V)$  comme le montre la figure.

On constate que les valeurs du courant inférieure à 1V sont nulles, après cette valeur le courant évolue de façon linéaire avec la tension.



- **Variation du gain en fonction de la tension**



*Figure III-13 : Graph représentant la variation du gain en fonction de la tension (6 puits quantiques)*

**Commentaires :**

Le gain de la cavité est la capacité de la diode laser à augmenter la puissance émise.

La figure ci-dessus obtenue après simulation nous montre que le gain varie en fonction de la tension en diminuant d'abord un peu puis évoluant exponentiellement de valeurs négatives vers des valeurs positives élevées. Atteignant ainsi son seuil de saturation du gain a une valeur de  $43.5 \text{ cm}^{-1}$  pour une valeur de tension de 1.15V puis stabilise pour des valeurs supérieures à 1.15V.

Ces régimes d'évolution illustrent le mécanisme du gain dans la cavité tel que :

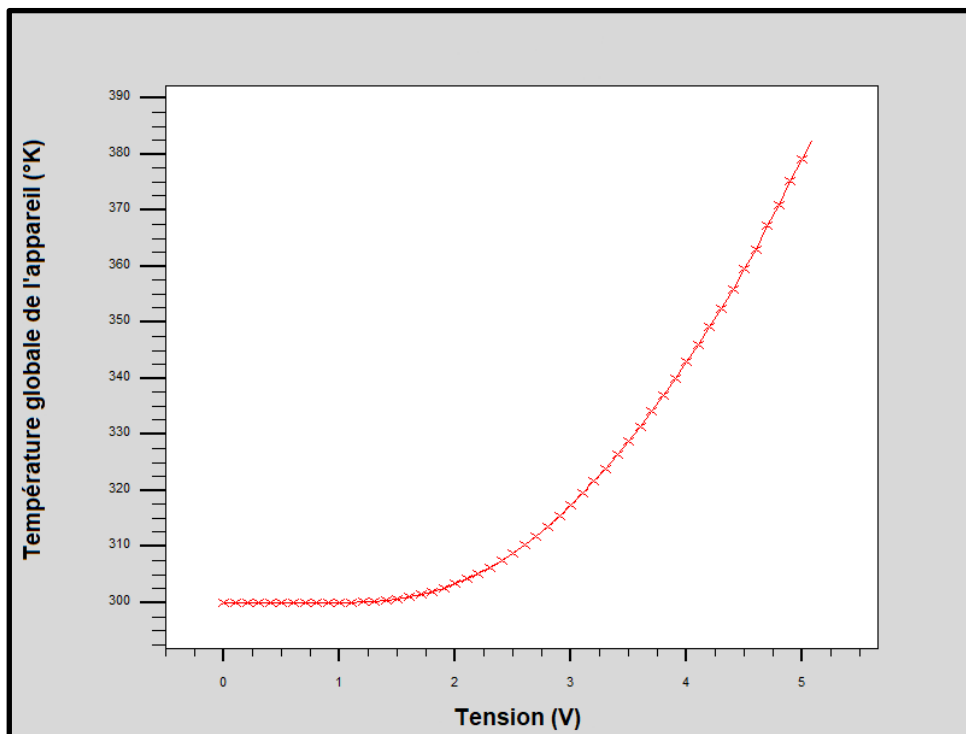
La stabilité du gain est due à la présence des phénomènes d'absorption et de l'émission spontanée avec la même probabilité.

La chute du gain aux valeurs négatives est due aux pertes internes de la cavité au début de la polarisation, c'est-à-dire que le phénomène d'absorption l'emporte sur le phénomène de l'émission spontanée.

La croissance rapide du gain s'explique par la réaction en chaîne induite par le phénomène de l'émission stimulée.

Le gain atteint son seuil de saturation à la valeur de tension de seuil, c'est-à-dire qu'à cette valeur de tension maximale produite de l'émission stimulée les pertes de la cavité sont compensées. Autrement dit, tous les électrons ont rejoint l'état fondamentale, et donc l'observation de la stabilité du gain.

- **Variation de la température en fonction de la tension**

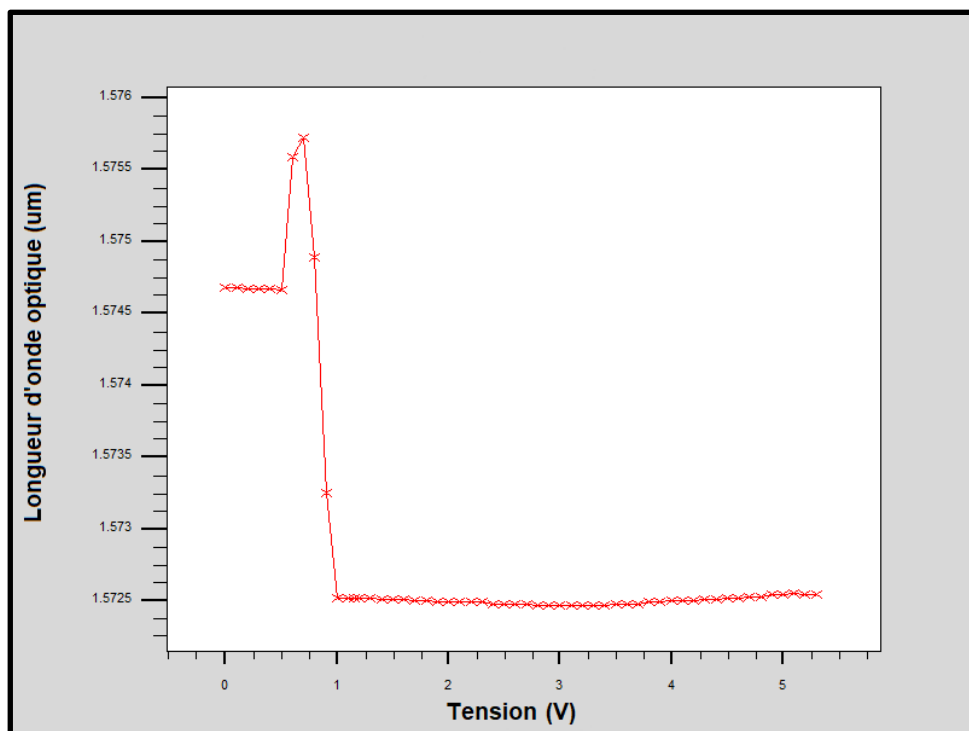


*Figure III-14 : Graph représentant la variation de la température en fonction de la tension (6 puits quantiques)*

**Commentaires :**

La température est l'un des problèmes majeurs qui provoque un auto-échauffement des diodes laser. Cette hausse en température est due en raison du passage des électrons de l'état excité vers l'état fondamentale libérant de la chaleur avant de rejoindre le niveau bas.

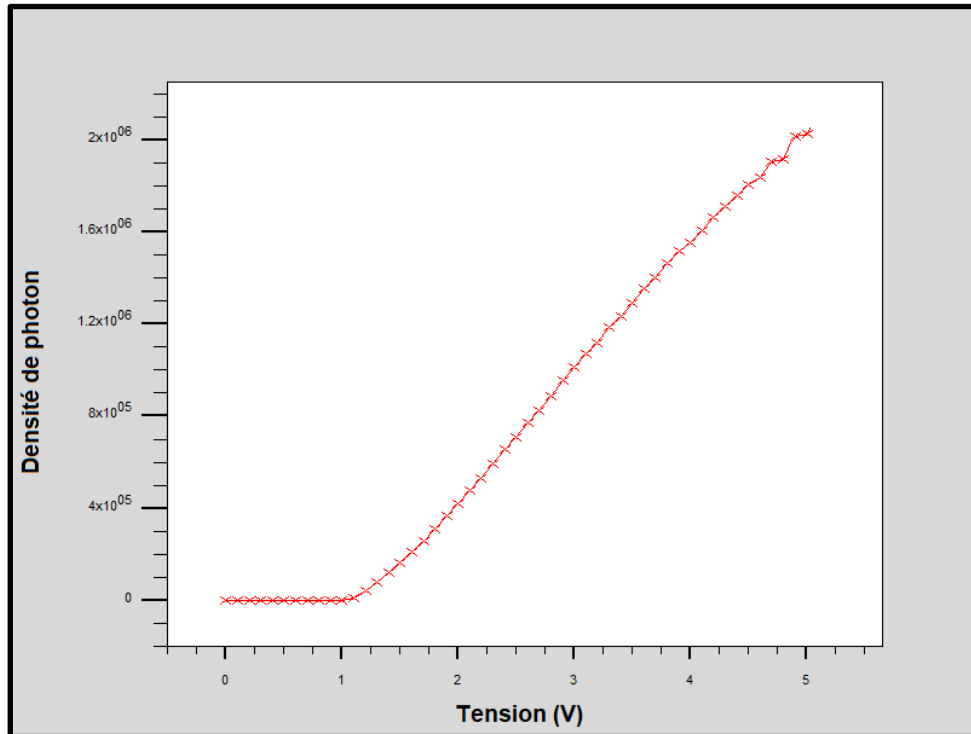
- **Longueur d'onde en fonction de la tension**



*Figure III-15 : Graph représentant la variation de la longueur d'onde en fonction de la tension (6 puits quantiques)*

**Commentaires :** La longueur d'onde de la lumière émise (des photons) à la sortie de la diode est quasiment stable (entre 1572nm et 1576nm). Conséquemment, la tension n'a aucun effet sur la longueur d'onde.

- **Densité de photon en fonction de la tension**



*Figure III-16 : Graph représentant la variation de la densité de photon en fonction de la tension (6 puits quantiques)*

**Commentaires :**

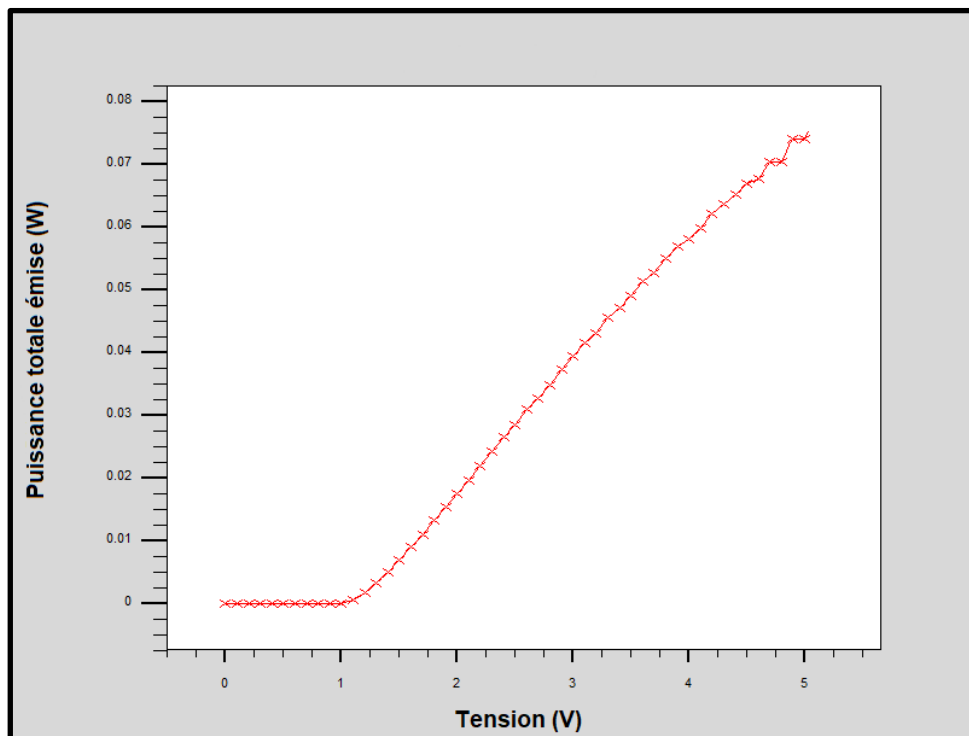
La densité de photon représente le nombre de photons occupant un volume à un moment donné. Cette densité de photon augmente en raison des transitions des électrons de l'état excité vers l'état fondamental (émission spontanée et émission stimulée) donnant vie à des photons.

La densité de photon commence à avoir des valeurs supérieures à 0 à partir d'une valeur de tension de 1V (équivalent à un courant de 1 mA).

La valeur de 1V représente la tension du seuil laser ( $V_{th}$ ), l'évolution positive et rapide de la puissance à travers le dispositif après cette valeur marque l'effet laser.

La valeur  $I = 1 \text{ mA}$  correspond à la valeur du courant de seuil  $I_{th}$ . C'est l'intensité de courant nécessaire pour réaliser l'inversion de population et avoir un effet laser pour ce dispositif.

- **Puissance émise en fonction de la tension**



*Figure III-17 : Graph représentant la variation de la puissance émise en fonction de la tension (6 puits quantiques)*

**Commentaires :** D'après l'allure de la courbe, on constate qu'après la polarisation de la diode laser VCSEL, la puissance émise est nulle avant que la tension n'atteigne 1V (équivalent à un courant de 1 mA), pour  $I > 1 \text{ mA}$  la puissance émise atteint rapidement des valeurs plus élevées.

### III.3.2. Seconde simulation (diode laser VCSEL à 12 puits quantiques)

#### III.3.2.1. Différence entre les deux simulations

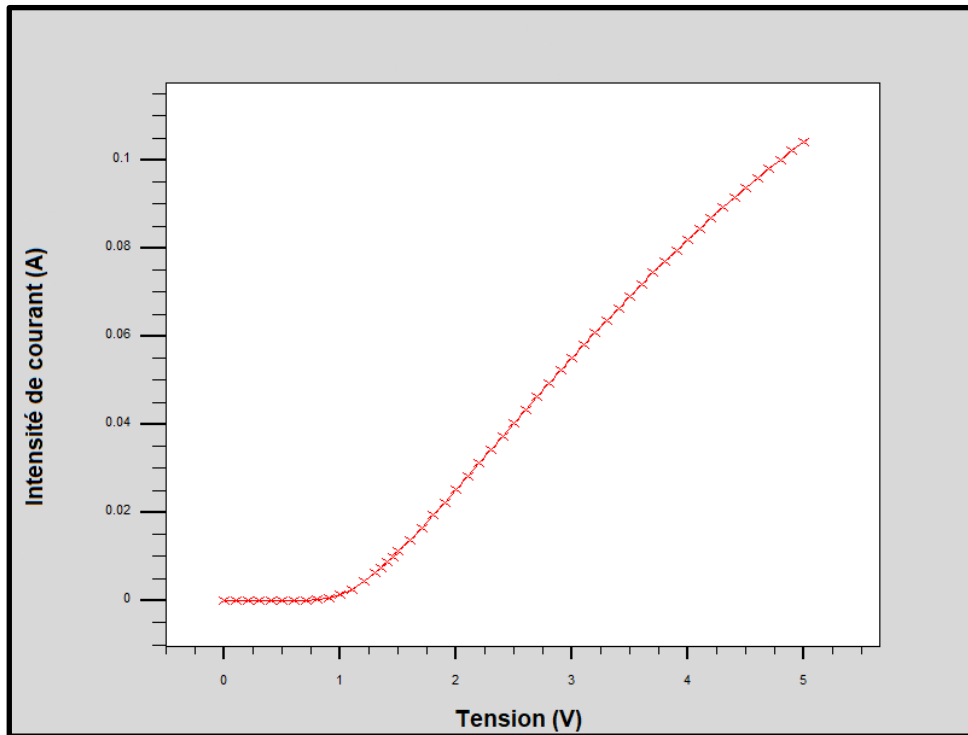
Il existe plusieurs façons d'améliorer les caractéristiques d'une diode laser VCSEL, par exemple : une meilleure définition du maillage, le type et épaisseur des matériaux, un meilleur dopage... Ainsi, nous allons dans cette partie, étudier si l'ajout du nombre de puits quantiques dans une diode améliore (ou pas) les caractéristiques de cette dernière.

Dans cette simulation, la structure du dispositif VCSEL à 12 puits quantique émettant à  $1,55 \mu\text{m}$  que nous simulerons est identique à celle du dispositif VCSEL à 6 puits quantique simulé précédemment à l'exception du nombre de puits quantiques spécifié.

#### III.3.2.2. Résultats et discussions

Etant donné que nous avons gardé la même structure et n'avons modifier que le nombre de puits quantiques dans notre diode laser VCSEL, nous avons découvert que plusieurs résultats sont identiques (Le schéma de la structure de la diode, le schéma du maillage, le schéma de la distribution du dopage au sein de la diode, le graph du gain et de la longueur d'onde en fonction de la tension). Nous allons révéler les résultats obtenus dans ce qui suit.

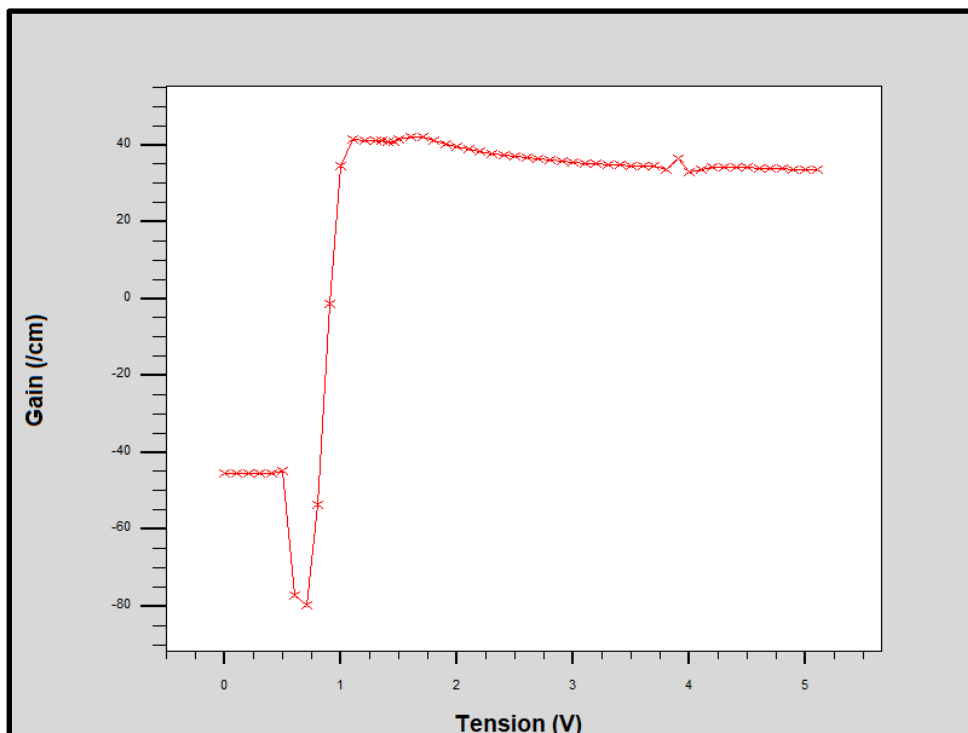
- **Variation du courant en fonction de la tension**



*Figure III-18 : Graph représentant la variation de l'intensité de courant en fonction de la tension (12 puits quantiques)*

**Commentaires :** On constate que les valeurs du courant inférieur à 0.95V sont nulles, après cette valeur le courant évolue de façon linéaire avec la tension.

- **Variation du gain en fonction de la tension**



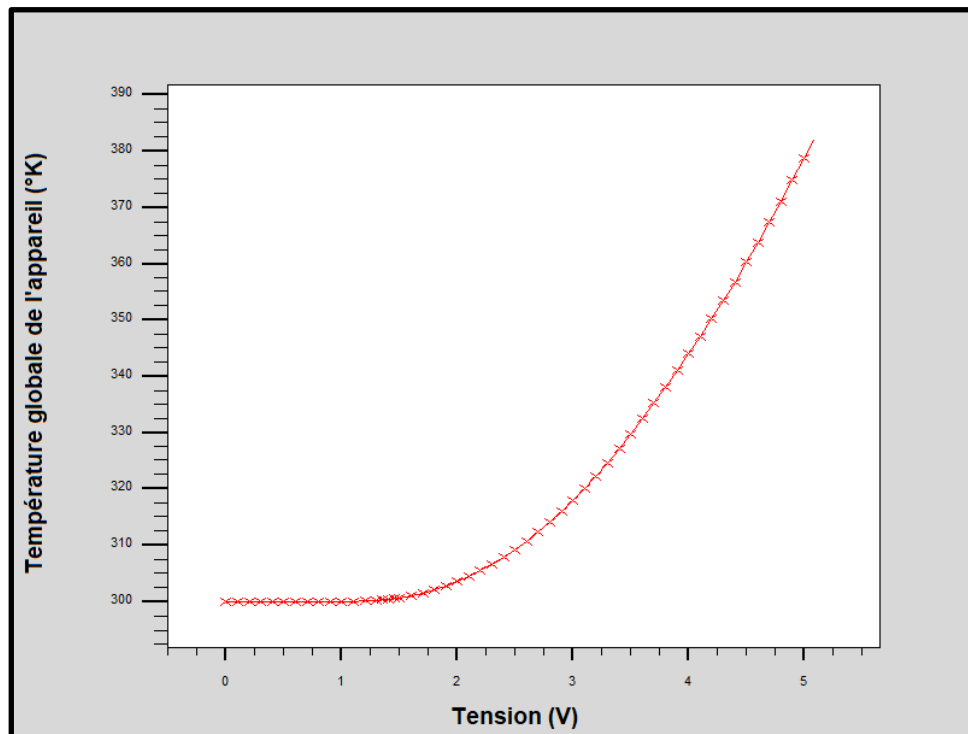
*Figure III-19 : Graph représentant la variation du gain en fonction de la tension (12 puits quantiques)*

**Commentaires :**

La figure ci-dessus obtenue après simulation nous montre que le gain varie en fonction de la tension en diminuant d'abord un peu puis évoluant exponentiellement de valeurs négatives vers des valeurs positives élevées. Atteignant ainsi son seuil de saturation du gain a une valeur de  $41.5 \text{ cm}^{-1}$  pour une valeur de tension de  $1.1\text{V}$  puis stabilise pour des valeurs supérieures à  $1.1\text{V}$ .

L'ajout de puits quantiques fournit un seuil de saturation du gain  $41.5 \text{ cm}^{-1}$  qui est inférieur au seuil de saturation de la diode laser VCSEL à 6 puits quantiques qui est de  $43.5 \text{ cm}^{-1}$ .

- **Variation de la température en fonction de la tension**



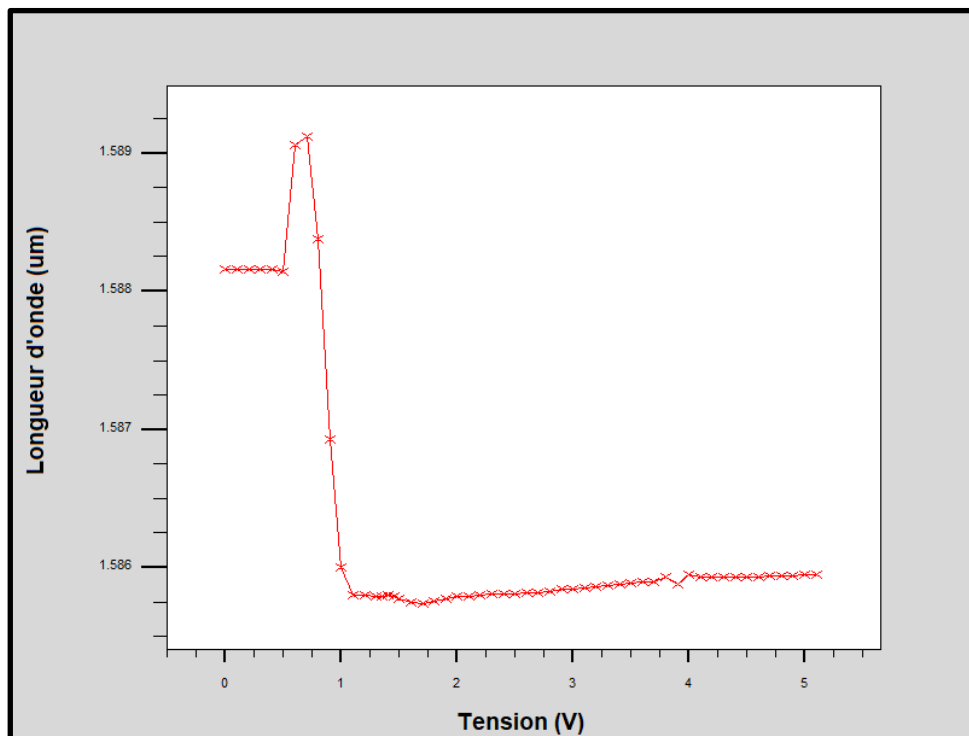
*Figure III-20 : Graph représentant la variation de la température en fonction de la tension (12 puits quantiques)*

**Commentaires :**

La variation de la température en fonction de la tension est similaire à celle de la diode laser VCSEL à 6 puits quantiques.

L'ajout de puits quantiques dans une diode laser VCSEL n'a aucune influence sur l'auto-échauffement de cette dernière.

- **Longueur d'onde en fonction de la tension**



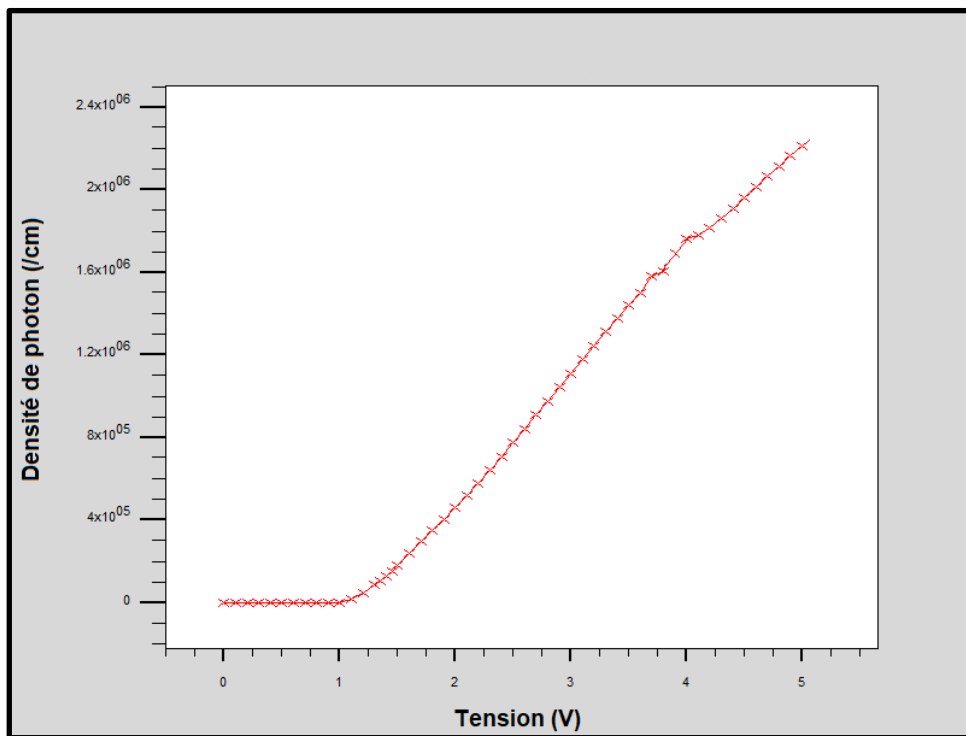
*Figure III-21 : Graph représentant la variation de la longueur d'onde en fonction de la tension (12 puits quantiques)*

**Commentaires :**

La longueur d'onde de la lumière émise (des photons) à la sortie de la diode est quasiment stable (entre 1586nm et 1589nm).

L'ajout de puits quantiques a légèrement modifier la longueur d'onde de la lumière émise de quelques dizaines de nanomètre (entre 1572nm et 1576nm pour la diode laser VCSEL à 6 puits quantiques).

- **Densité de photon en fonction de la tension**



*Figure III-22 : Graph représentant la variation de la densité de photon en fonction de la tension (12 puits quantiques)*

**Commentaires :**

La densité de photon commence à avoir des valeurs supérieures à 0 à partir d'une valeur de tension de 0.95V (équivalent à un courant de 0.7 mA).

La valeur de 0.95V représente la tension du seuil laser ( $V_{th}$ ), l'évolution positive et rapide de la puissance à travers le dispositif après cette valeur marque l'effet laser.

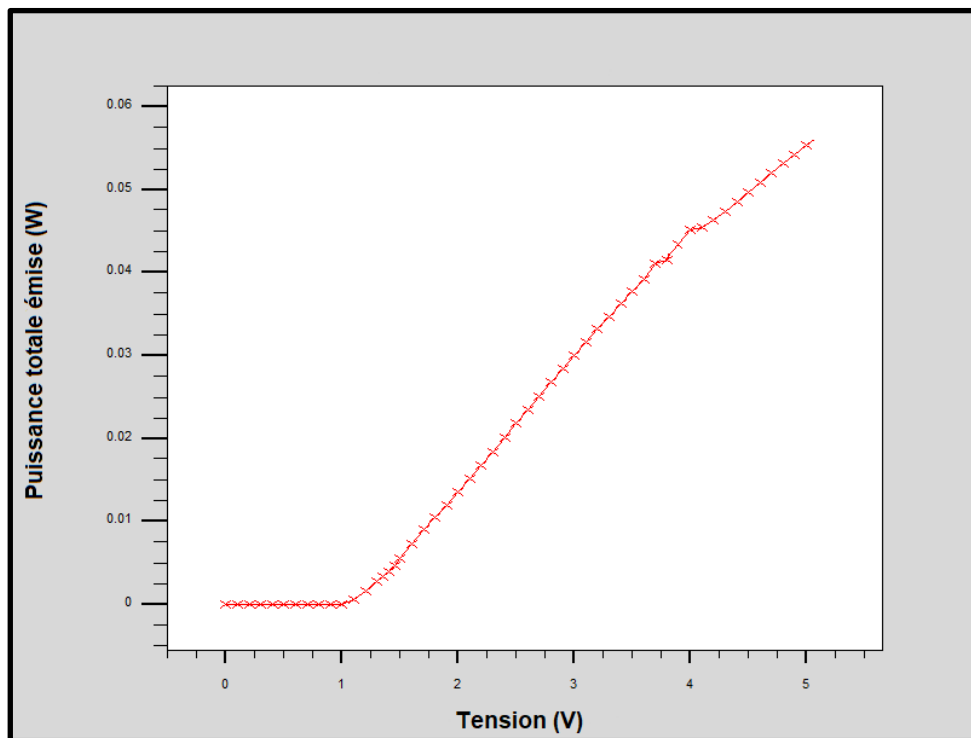
La valeur  $I = 0.7 \text{ mA}$  correspond à la valeur du courant de seuil ( $I_{th}$ ). C'est l'intensité de courant nécessaire pour réaliser l'inversion de population et avoir un effet laser pour ce dispositif.

L'ajout de puits quantiques a permis d'avoir une valeur de la tension et du courant de seuil ( $V_{th}$  et  $I_{th}$ ) plus petite.

L'ajout de puits quantiques a aussi permis d'avoir une densité de photon supérieur qu'à celle de la diode laser VCSEL à 6 puits quantiques.



- Puissance émise en fonction de la tension



*Figure III-23 : Graph représentant la variation de la puissance émise en fonction de la tension (12 puits quantiques)*

**Commentaires :**

D'après l'allure de la courbe, on constate qu'après la polarisation de la diode laser VCSEL, la puissance émise est nulle avant que la tension n'atteigne 0.95V (équivalent à un courant de 0.6 mA), pour  $I > 0.6 \text{ mA}$  la puissance émise atteint rapidement des valeurs plus élevées.

L'ajout de puits quantiques a permis à la diode d'émettre une puissance à partir d'une valeur de tension (et courant) plus petite par rapport à la diode laser VCSEL à 6 puits quantiques.

### III.4. Conclusion

Le simulateur SILVACO-TCAD offre un avantage certain à la modélisation des dispositifs optoélectroniques et des dispositifs semi-conducteurs en générale, grâce à ses algorithmes puissants couvrants la quasi-totalité des aspects physiques intervenant dans ces composants aussi complexes soient-ils.

La conception d'un dispositif VCSEL à multi-puits quantiques à l'aide de ce logiciel nous a permis d'extraire ses caractéristiques principales. La région active structurée en MQW, offre un confinement efficace des porteurs de charges. Permettant ainsi d'avoir un courant de seuil laser faible comparé à d'autres lasers émettant à la même longueur d'onde et ayant la même puissance d'émission.

Bien qu'il existe plusieurs solutions afin d'améliorer les caractéristiques d'une diode laser VCSEL, la simulation a révélé que l'ajout de puits quantiques dans la zone active d'une diode est aussi une solution pour cela.

# Conclusion Générale

Ce travail a porté sur l'étude et la réalisation de diodes laser à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) pour les applications dans les réseaux de télécommunications optiques exploitées dans la troisième fenêtre des transmissions optiques.

Ce nouveau type de diode laser s'est développé très rapidement pour devenir un composant clé dans les systèmes de transmission. Par ailleurs, grâce aux avancées technologiques des vingt dernières années, les VCSEL à grande longueur d'onde font l'objet d'un intérêt croissant dans de nombreux domaines d'application dont naturellement les télécommunications optiques.

Dans le premier chapitre, nous avons évoqué la théorie des bandes, des généralités sur les semi-conducteurs, des généralités sur les lasers et celles sur les VCSEL.

Dans le second chapitre, nous nous sommes focalisés sur les paramètres fondamentaux des VCSEL comme le courant de seuil, la puissance optique et la fréquence de modulation. Ensuite, à l'aide du logiciel Optisystem, nous avons simulé une chaîne de transmission optique utilisant une diode laser VCSEL comme émetteur puis une autre chaîne de transmission en utilisant cette fois-ci une diode laser conventionnelle afin de faire une comparaison en se basant sur leurs diagrammes de l'œil, leurs BER et leurs facteurs de qualité. Enfin, nous avons montré l'intérêt d'utiliser la diode VCSEL en citant quelques avantages de cette dernière.

Le troisième et dernier chapitre représente la partie principale de notre travail. Nous avons d'abord présenté le simulateur SILVACO. Ensuite, nous sommes passé à la conception de notre dispositif VCSEL comportant une structure multi-puits quantiques émettant à une longueur d'onde de  $1.55 \mu\text{m}$ . Nous avons proposé de croître le nombre de puits quantiques dans la zone active de six à douze puits pour voir l'impact sur les caractéristiques de notre dispositif. A la fin, nous avons constaté que l'augmentation du nombre de puits quantiques permet d'améliorer le courant et la tension de seuil ainsi que la densité de photons. Par contre, perdre en puissance émise.

En perspective, nous proposons tout simplement de concevoir une diode laser VCSEL dans une autre fenêtre de transmission optique (C'est-à-dire d'exploiter une longueur d'onde différente).

# Références Bibliographiques et Webographiques

## • Références Bibliographiques

- [1] H. Hakima, « Propriétés structurales et électriques de transistor de puissance de type LD-MOS », (thèse de doctorat), Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie, 2016.
- [2] Elham Heidari, Hamed Dalir, Moustafa Ahmed, Volker J. Sorger and Ray T. Chen « Hexagonal transverse-coupled-cavity VCSEL redefining the high-speed lasers », journal Nanophotonics, Vol 09, published by D. Gruyter, Berlin (Germany) / Boston (USA), October 15, 2020, Page 4743-4748.
- [3] I. Micheline & D. Martial, "Le laser 50 ans de découvertes", Revue de société française de physique, N°927, 2010, 92 p.
- [4] R. Saïda, "Composants optoélectroniques", (Cours), Département d'électronique, Université de Constantine, Algérie, 2016.
- [5] R. Stern and J. Perry, "Low-energy electron-diffraction dispersion surfaces and band structure in three-dimensional mixed laue and bragg reflections", Reviews of Modern Physics, Vol 41, N°2, 1969, 21p.
- [6] H. Walter, "Electronic structure and the properties of solids : the physics of the chemical bond", Journal of Molecular Structure, Vol 71, Freeman and Company, San Francisco, USA, 1980, 582p.
- [7] V. Vincent, "Etude et développement d'un imageur TEP ambulatoire pour le suivi thérapeutique individualisé en cancérologie", (Thèse), Université Paris-Sud, Paris, France, 2014.
- [9] S. Abdelhafid, "Physique des semi-conducteur", (Cours), Faculté des Sciences Exactes, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 2013.
- [13] A. Chovet & P. Masson, "PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS", (Cours), Département Micro-électronique et Télécommunications, Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, France, 2005.
- [15] K. Abdelkarim, "Analyse du transport électronique dans les dispositifs micro-électroniques par les méthodes particulières Monte Carlo : Application aux matériaux InSb et SiC", (Mémoire de Magister), Physique énergétique et matériaux, Université de Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 2009.
- [17] F. Mark, "Quantum optics: An introduction", (Thèse), Département de physique et d'astronomie, Université de Sheffield. Sheffield, UK, 2006.

- [25] G. Margarita, "Étude et réalisation d'un oscillateur opto-microonde à base de VCSEL pour la génération harmonique de signaux microondes", (Thèse), Optoélectronique et hyperfréquence, Université de Toulouse, France, 2008.
- [26] A. Bacou, "Caractérisation et modélisation optoélectronique de VCSELs à grande longueur d'onde pour sous-ensembles optiques intégrés", (Thèse), Optoélectronique et hyperfréquence, Université de Toulouse, France, 2006.
- [27] H. Mounir, "Modélisation des pertes dans les liaisons optiques", (Thèse), Département de Génie électrique, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Algérie, 2012.
- [28] D. Massoubre, "Composant passif à absorbants saturables sur InP pour la régénération tout-optique à très hauts-débits", (Thèse), Spécialité en Optique et Photonique, Université de Paris XI, France, 2006.
- [30] A. Rissons. "Caractérisation et modélisation optoélectronique des diodes laser à cavité verticale émettant par la surface", (Thèse), Optoélectronique et hyperfréquence, Université de Toulouse, France, 2003.
- [31] M. Fadila, "Optimisation par la Simulation Système d'une Chaîne de Transmission Numérique par Fibre Optique Haut Débit", (Mémoire de Magister), Département des Télécommunications, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2010.
- [32] P. Scalart, 2016, "COMMUNICATIONS NUMÉRIQUES – FONDAMENTAUX", (Cours), Spécialité Electronique, Ecole Nationale Supérieure des Sciences Appliquées et Technologie, France, 2017.
- [33] K. Ahmed, "Initiation à l'utilisation du logiciel OptiSystem", (Manuel), Systèmes des Télécommunications, Université de Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie, 2019.
- [34] G. Adam & R. Modeling, "Heterogeneous carbon nanotube networks for photovoltaic application using silvaco atlas software", (Thèse), École supérieure navale de Monterey, Californie, USA, 2012.
- [35] B. Garcia, "Indium gallium nitride multijunction solar cell simulation using silvaco atlas", (Thèse), École supérieure navale de Monterey, Californie, USA, 2007.
- [36] J. Lavery, "Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco", (Thèse), École supérieure navale de Monterey, Californie, USA, 2008.
- [37] S. Daniel, "Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas", (Thèse), École supérieure navale de Monterey, Californie, USA, 2012.
- [38] P. Henry, "ATLAS User's Manuel, Device simulation software", (Manuel), SILVACO International, Californie, USA, 2004, 740p.

[39] D. Vasileska & G. Stephen, "Computational Electronics", (Revue), Département de l'ingénierie électrique, Université de l'Arizona, Californie, USA, 2010, 782p.

[40] P. Henry, "TonyPlot User's Manual, Device simulation software", (Manuel), SILVACO International, Californie, USA, 2015, 161p.

[41] P. Henry, "DeckBuild User's Manual, Device simulation software", (Manuel), SILVACO International, Californie, USA, 2015, 225p.

[42] S. MOSTEFA, "Etude et Simulation de Cellules Photovoltaïques à Couches Minces à Base de CIS et CIGS", (Mémoire magistère), Université Abou Bakr Belkid, Tlemcen, Algérie, 2012.

[43] D. Wassila, "Modélisation des Structures Photovoltaïques : Aspects Fondamentaux et Appliqués", (Thèse Doctorat), Université Abou Bakr Belkid, Tlemcen, Algérie, 2011.

[44] A. Ziabari, "Getting Started with Atlas", (Manuel), Université de Saskatchewan, Canada, 2011, 12p.

[45] P. Henry, "Atlas users's manuel : device simulation software", (Manuel), SILVACO international, Santa Clara, USA, 2006, 878p.

[46] D. Vasileska, "Introduction to Silvaco ATLAS Tool", (Manuel) Département de génie électrique Université, Arizona, Californie, USA, 2001, 10p.

[47] A. Ziabari, "Step by step with ATLAS Silvaco", (Manuel), Université de Saskatchewan, Canada, 2018, 12p.

### • Références Webographiques

[8] Journal du net, 2021, "Semi-conducteur : définition", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1440700-semi-conducteur-definition-usages-et-raisons-de-la-penurie-de-ce-materiau/#:~:text=Le%20semi%2Dconducteur%20est%20un,comme%20les%20m%C3%A9taux,%20et%20isolant>

[10] N. Connor, Radiation dosimetry, 2020, "Qu'est-ce que le semi-conducteur extrinsèque, semiconducteur dopé, Définition" (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : <https://www.radiation-dosimetry.org/fr/quest-ce-que-le-semi-conducteur-extrinseque-semi-conducteur-dope-definition/>

[11] M. Valérie, Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Limoges, "Les semi-conducteurs – Jonction PN", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : [https://www.unilim.fr/pages\\_perso/valerie.madrangas/Jonction-P-N.pdf](https://www.unilim.fr/pages_perso/valerie.madrangas/Jonction-P-N.pdf)

[12] Centre universitaire Nous Bachir El-bayadh, 2020, "Notions de physiques des semi-conducteurs", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : <https://www.cu-elbayadh.dz/ar/wp-content/uploads/2020/03/elem.pdf>

- [14] J. Marc, Apprendre et comprendre, 2016, "Vers le LASER à semi-conducteur", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : <https://emrecmic.wordpress.com/2016/07/19/vers-le-laser-a-semi-conducteur/#:~:text=Une%20jonction%20constitu%C3%A9e%20de%20,un%20a%20une%20h%C3%A9t%C3%A9rojonction%20anisotype>
- [16] Maxicours, "Emission et absorption quantique", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : <https://www.maxicours.com/se/cours/emission-et-absorption-quantiques/#:~:text=L'%C3%A9nergie%20d'un%20l,des%20particules%20lumineuses%2C%20les%20photons>
- [18] C. Camille & C. Cédric, "Refroidissement Laser", L'observatoire de Paris, 2009, (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : [https://media4.obspm.fr/public/M2R/appiquettes/refroidissement/applets/AtomeUnique\\_doc.html#interaction](https://media4.obspm.fr/public/M2R/appiquettes/refroidissement/applets/AtomeUnique_doc.html#interaction)
- [19] F. Balembois & S. Forget, Optique pour l'ingénieur, "Le laser : Fondamentaux", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M01\\_C01/co/Contenu\\_06.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Contenu_06.html)
- [20] F. Balembois & S. Forget, Optique pour l'ingénieur, "Le laser : Fondamentaux", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/pdf/OPI\\_fr\\_M01\\_C01.pdf](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/pdf/OPI_fr_M01_C01.pdf)
- [21] Physique quantique wikibis, "Pompage optique", 2009, (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : [http://www.physique-quantique.wikibis.com/pompage\\_optique.php](http://www.physique-quantique.wikibis.com/pompage_optique.php)
- [22] F. Balembois & S. Forget, Optique pour l'ingénieur, "Le laser : Fondamentaux", (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : [http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI\\_fr\\_M01\\_C01/co/Grain\\_OPI\\_fr\\_M01\\_C01\\_13.html](http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M01_C01/co/Grain_OPI_fr_M01_C01_13.html)
- [23] J. Cornillault, "LE PRINCIPE DU LASER", Compagnie Industrielle des Lasers, Marcoussis, France, (En ligne, Consulté en juin 2022), URL : <https://dossier.univ-st-etienne.fr/ltsi/www/slaser/PFfemto/principe/Cestquoi2.htm>
- [24] Le site physique d'Arsonval, (en ligne, Consulté en juin 2022), URL : <http://www.csvinternational.fr/Physique/TD - AD.html>
- [29] Edmundoptics, "Comprendre les fenêtres optiques", (En ligne, Consulté en Juin 2022), URL : <https://www.edmundoptics.fr/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-optical-windows/>

# Résumé

Aujourd'hui, les diodes lasers à cavité verticale émettant par la surface (VCSEL) sont utilisées dans des secteurs très variés tel que la médecine, la biologie ou les divertissements. L'application principale reste cependant dans le domaine des télécommunications optiques et le stockage des données (lecture et écriture optique).

L'objectif principal de notre travail est l'étude des diodes lasers à semi-conducteurs, plus particulièrement les diodes lasers à cavité verticale émettant par la surface. Après avoir présenté la structure du VCSEL, nous nous sommes intéressés à la conception et à la simulation de cette dernière en utilisant le logiciel 'SILVACO-TCAD'.

Parmi, plusieurs stratégies permettant l'optimisation des caractéristiques des diodes lasers VCSEL, nous avons décidé de faire varier le nombre de puits quantique dans la zone active, dans l'objectif de prouver que ses caractéristiques peuvent être en relation avec le nombre des puits quantiques. A travers les résultats que nous avons obtenus, nous avons pu confirmer que l'ajout de puits quantique dans la cavité d'une diode laser VCSEL est bien une solution, afin d'optimiser les caractéristiques de cette dernière.

**Mots clés :** Semi-conducteurs, VCSEL, SILVACO, Puits quantiques, Miroir de Bragg.

# Abstract

Nowadays, Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes (VCSELs) are used in a wide variety of industries such as medicine, biology, and entertainment. However, the main application remains in the field of optical telecommunications and data storage (optical reading and writing).

The main objective of our work is the study of semiconductor laser diodes, more particularly vertical cavity laser diodes emitting from the surface. After presenting the structure of the VCSEL, we are interested in the design and simulation of the latter using the software 'SILVACO-TCAD'.

Among several strategies allowing the optimization of the characteristics of VCSEL laser diodes, we decided to vary the number of quantum wells in the active zone, with the aim of proving that its characteristics can be related to the number of quantum wells. Through the results we obtained, we were able to confirm that the addition of quantum wells in the cavity of a VCSEL laser diode is indeed a solution, in order to optimize the characteristics of the latter.

**Keywords:** Semiconductors, VCSEL, SILVACO, Quantum wells, Bragg mirror.