

# Table de matières

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

## Chapitre I : Présentation des composants optoélectroniques constituant une liaison optique

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction.....                                               | 6  |
| I.2 Objectifs de la modélisation .....                              | 7  |
| I.2.1 Objectifs de la modélisation du VCSEL.....                    | 8  |
| I.2.2 Objectifs de la modélisation de la fibre optique.....         | 8  |
| I.2.3 Objectifs de la modélisation de la photodiode PIN.....        | 8  |
| I.3 Bloc d'émission .....                                           | 8  |
| I.3.1 Avantages du VCSEL.....                                       | 9  |
| I.3.2 Principe de fonctionnement d'un laser à semi-conducteur ..... | 10 |
| I.3.2.1 Un milieu amplificateur .....                               | 10 |
| I.3.2.2 Condition de gain .....                                     | 10 |
| I.3.2.3 La condition de phase .....                                 | 11 |
| I.3.3 Fonctionnement du VCSEL .....                                 | 11 |
| I.3.3.1 Processus optiques d'un VCSEL .....                         | 12 |
| I.4 Les fibres optiques .....                                       | 13 |
| I.4.1 Propagation de la lumière à travers la fibre optique .....    | 15 |
| I.4.1.1 L'angle critique $\varphi_c$ .....                          | 15 |
| I.4.1.2 L'ouverture numérique .....                                 | 16 |
| I.4.2 Avantage de la fibre optique .....                            | 16 |
| I.4.3 Types de fibres optiques .....                                | 17 |
| I.4.3.1 Fibre optique multimode .....                               | 17 |
| A. Fibre multimode à gradient d'indice.....                         | 18 |
| B. Fibre multimode à saut d'indice.....                             | 19 |
| I.4.3.2 Fibre optique monomode .....                                | 20 |
| I.4.4 Atténuation dans les fibres optiques .....                    | 21 |
| I.4.4.1 L'atténuation intrinsèque (liée au matériau utilisé) .....  | 21 |
| I.4.4.2 L'absorption .....                                          | 21 |
| I.4.4.3 La diffusion de Rayleigh .....                              | 21 |
| I.4.4.4 La dispersion .....                                         | 22 |
| A. La dispersion modale ( $D_{\text{mod}}$ ).....                   | 22 |
| B. La dispersion chromatique ( $D\lambda$ ).....                    | 22 |

## Table de matières

---

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| I.4.4.5 Atténuations extrinsèques.....                          | 22 |
| I.4.4.6 Pertes par courbures et micro-courbure .....            | 23 |
| A. Pertes par courbure.....                                     | 23 |
| B. Pertes par micro-courbure.....                               | 23 |
| I.4.4.7 Perte par raccordement.....                             | 24 |
| I.4.5 Fenêtre optimale d'une fibre optique.....                 | 25 |
| I.5 Bloc de réception .....                                     | 26 |
| I.5.1 Le photodétecteur .....                                   | 26 |
| I.5.1.1 Principe de la photodétection .....                     | 27 |
| I.5.1.2 Caractéristiques d'un photodétecteur .....              | 27 |
| I.5.1.3 Les photodiodes PIN .....                               | 28 |
| I.6 Les méthodes d'inscription et de détection de données ..... | 30 |
| I.6.1 Les techniques de modulation.....                         | 30 |
| II.6.1.1. La modulation directe d'amplitude .....               | 30 |
| I.6.2 La détection directe .....                                | 30 |
| I.7 Conclusion .....                                            | 30 |
| I.8 Références bibliographiques .....                           | 31 |

## Chapitre II : VHDL-AMS et méthodologie de simulation des systèmes multidisciplinaires

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction.....                                             | 35 |
| II.2 Choix du langage de modélisation .....                        | 36 |
| II.2.1 Langage de modélisation numérique.....                      | 36 |
| II.2.2 Langage de modélisation analogique.....                     | 37 |
| II.2.2.1 VHDL .....                                                | 37 |
| II.2.2.2 Types de description utilisables en VHDL.....             | 38 |
| II.2.3 Langage de modélisation mixte multi-domaines.....           | 39 |
| II.2.3.1 VHDL-AMS.....                                             | 40 |
| II.2.3.2 Pourquoi le choix de VHDL-AMS ? .....                     | 41 |
| II.3 Choix d'outils de simulation.....                             | 42 |
| II.3.1 Les simulateurs de première génération à code apparent..... | 43 |
| II.3.2 SMASH 5.....                                                | 43 |
| II.4 Principaux éléments du langage VHDL-AMS.....                  | 44 |
| II.4.1 Structure d'un modèle VHDL-AMS.....                         | 44 |
| II.4.1.1 L'entité .....                                            | 44 |
| II.4.1.2 L'architecture .....                                      | 46 |
| II.4.1.3 Expressions de conditions initiales .....                 | 47 |
| II.4.2 Classes d'objets [II.10,II.15,II.19] .....                  | 48 |

## Table de matières

---

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.4.2.1 Terminaux et Natures .....                                          | 48 |
| II.4.2.2 Quantités .....                                                     | 49 |
| II.4.3 Sémantique de connexion .....                                         | 51 |
| II.4.4 Les instructions en VHDL-AMS [II.10,II.20] .....                      | 52 |
| II.4.4.1. Instructions séquentielles et concurrentes .....                   | 52 |
| II.4.4.2. Instructions simultanées .....                                     | 52 |
| II.4.5 Types d'analyses .....                                                | 53 |
| II.4.5.1 Calcul du point de fonctionnement (DC) .....                        | 53 |
| II.4.6 Critère de solvabilité .....                                          | 54 |
| II.5 Le prototypage Virtuel Fonctionnel (PVF) .....                          | 55 |
| II.5.1 Avantage du processus PVF .....                                       | 56 |
| II.5.2 La description comportementale globale du système .....               | 56 |
| II.5.3 L'étape structurelle .....                                            | 57 |
| II.5.4 La description physique des composants .....                          | 58 |
| II.6 La modélisation comportementale .....                                   | 58 |
| II.6.1 Obtention d'un modèle comportemental par la méthode ascendante .....  | 59 |
| II.6.2 Obtention d'un modèle comportemental par la méthode descendante ..... | 60 |
| II.7 Conclusion .....                                                        | 62 |
| II.8 Références bibliographiques .....                                       | 62 |

## Chapitre III : Modèles d'une chaîne de transmission optique

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction .....                                                   | 68 |
| III.2 Méthodologie de modélisation VHDL-AMS .....                          | 69 |
| III.3 Etude Structurelle et physique en VHDL-AMS .....                     | 70 |
| III.3.1 Etude structurelle .....                                           | 70 |
| III.3.2 Etude Physique .....                                               | 71 |
| III.4 Développement d'une bibliothèque VHDL-AMS .....                      | 72 |
| III.4.1 Les règles de développement de modèles .....                       | 72 |
| III.4.2 Les fondements du développement de la bibliothèque .....           | 73 |
| III.4.3 Déclaration d'un fichier VHDL-AMS dans la bibliothèque .....       | 73 |
| III.5 Etapes de modélisation VHDL-AMS .....                                | 74 |
| III.6 Modèles élaborés des blocs d'une ligne de transmission optique ..... | 76 |
| III.6.1 Modèles VHDL-AMS du VCSEL .....                                    | 77 |
| III.6.1.1 Modèle électro-optique (comportement optoélectronique) .....     | 78 |
| A. Modèle 1 : VCSEL_Statique (DC) .....                                    | 78 |
| B. Modèle 2 : VCSEL_Dynamique .....                                        | 79 |
| B.1 Modèle_VCSEL_Courant-Sinusoïdal .....                                  | 80 |

## Table de matières

---

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| B.2 Modèle_VCSEL_Courant-Carré.....                                     | 80 |
| B.3 Modèle_VCSEL_Courant-pseudo-aléatoire.....                          | 82 |
| III.6.1.2 Modèle thermo-électro-optique .....                           | 82 |
| III.6.1.3 Modèle VCSEL_Bruit .....                                      | 85 |
| III.6.2 Modélisation VHDL-AMS du canal de transmission .....            | 87 |
| A. Longueur d'onde de coupure.....                                      | 87 |
| B. Effet de dispersion.....                                             | 88 |
| B.1 Dispersion intermodale dans les fibres multimodes.....              | 89 |
| B.2 Dispersion chromatique dans les fibres multimodes.....              | 89 |
| B.3 Dispersion modale dans la fibre optique monomode.....               | 90 |
| B.4 Dispersion chromatique dans la fibre optique monomode.....          | 90 |
| C. Dispersion totale dans une fibre optique.....                        | 90 |
| D. La bande passante de la fibre optique.....                           | 91 |
| D.1 Bande passante des fibres optique multimode.....                    | 91 |
| D.2 Bande passante des fibres optiques monomode.....                    | 91 |
| E. Nombre de modes.....                                                 | 92 |
| III.6.2.1 Modèles de fibre optique multimode .....                      | 92 |
| A. Modèle_FO_GI.....                                                    | 92 |
| B. Modèle_FO_SI.....                                                    | 95 |
| III.6.2.2 Modélisation de la fibre optique monomode .....               | 95 |
| III.6.2.3 Modélisation des couplages VCSEL-Fiber et Fibre1-Fibre2 ..... | 95 |
| III.6.3 Modélisation du bloc de réception .....                         | 96 |
| III.6.3.1 Modélisation du convertisseur courant-tension .....           | 97 |
| III. 6.4 Modélisation de la fonction principale.....                    | 98 |
| III.7 Conclusion .....                                                  | 99 |
| III.8 Références bibliographiques .....                                 | 99 |

## Chapitre IV : Résultats de simulations et analyse

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.1 Introduction.....                                                    | 105 |
| IV.2 Résultat de modélisation du VCSEL.....                               | 105 |
| IV.2.1 Caractéristiques statique du VCSEL (Analyse DC) .....              | 107 |
| IV.2.2 Caractéristiques dynamiques du VCSEL .....                         | 108 |
| IV.2.2.1 Réponse en courant : sinusoïdale, carré et pseudo-aléatoire..... | 108 |
| IV.2.3 Influence de la température sur le VCSEL .....                     | 111 |
| IV.2.3.1 Puissance dissipée .....                                         | 111 |
| IV.2.3.2 Paramètres VCSEL en fonction de la température .....             | 112 |
| IV.2.4 Fréquence de relaxation, forces de Langevin et bruit.....          | 114 |
| IV.2.4.1 Fréquence de relaxation .....                                    | 114 |

## Table de matières

---

|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.2.4.2 Forces de Langevin .....                                            | 116 |
| IV.2.4.3 Influence de bruit .....                                            | 117 |
| IV.3 Résultats de simulation des fibres optiques.....                        | 118 |
| IV.3.1 Résultats de simulation d'une fibre optique à gradient d'indice.....  | 119 |
| IV.3.1.1 Effet de la dispersion modale et chromatique .....                  | 120 |
| IV.3.1.2 La Bande passante.....                                              | 122 |
| IV.3.1.3 Pertes par courbure.....                                            | 122 |
| IV.3.1.4 Vitesse de transmission .....                                       | 123 |
| IV.3.2 Résultats de modélisation d'une fibre optique à Saut d'indice .....   | 124 |
| IV.3.2.1 Dispersion modale et chromatique .....                              | 124 |
| IV.3.2.2 Bande passante .....                                                | 125 |
| IV.3.2.3 Pertes par courbure.....                                            | 126 |
| IV.3.3 Modélisation de la fibre optique monomode .....                       | 126 |
| IV.3.3.1 Dispersion chromatique, bande passante et pertes par courbure ..... | 127 |
| IV.3.4 Puissance optique à la sortie de chaque composant .....               | 127 |
| IV.4 Résultats de simulation d'une photodiode PIN .....                      | 136 |
| III. 4.1 Modèle électrique de la photodiode.....                             | 136 |
| IV.4.1.1 Analyse Statique.....                                               | 138 |
| IV.4.1.2 Photocourant à la sortie du photodiode PIN .....                    | 141 |
| IV.4.1.3 Tension à la sortie de l'amplificateur à transimpédance .....       | 142 |
| IV.5 Conclusion .....                                                        | 143 |
| IV.6 Références bibliographiques .....                                       | 143 |
| Conclusion générale.....                                                     | 146 |
| Glossaire.....                                                               | 149 |
| Annexs.....                                                                  | 150 |