

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade** de **DOCTORAT EN SCIENCES**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Télécommunications

**Par** : IKHLEF Abdallah

**Sujet**

**Nouvelle Topologie d'Additionneur Tout optique à  
base des Cristaux Photoniques pour l'Optique  
Intégrée**

Soutenue publiquement, en Décembre 2024, devant le jury composé de :

|                    |            |                      |                         |
|--------------------|------------|----------------------|-------------------------|
| MOKHTARI Lila      | MCA        | Univ. Tlemcen        | Présidente              |
| BADAOUI Hadjira    | Professeur | Univ. Tlemcen        | Directrice de thèse     |
| ABRI Mehadjji      | Professeur | Univ. Tlemcen        | Co- Directrice de thèse |
| BENDAOUDI Amina    | Professeur | Univ. Sidi Bel-Abbès | Examinatrice            |
| MAHDJOUR Zoubir    | Professeur | Univ. Sidi Bel-Abbès | Examineur               |
| BOUREGAA Mouweffeq | MCA        | Univ. Mascara        | Examineur               |

## Résumé

Les cristaux photoniques bidimensionnels (2DPhC) sont des matériaux diélectriques nanostructures dont l'indice de réfraction change périodiquement dans l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, ce qui a un impact sur la propriété de propagation du milieu. Par conséquent, les 2DPhC sont caractérisés par une bande interdite photonique (PBG), dans laquelle la propagation des ondes lumineuses est interdite. Dans ce cas, la modification de la périodicité de la structure par insertion de défauts ponctuels et/ou de guides d'onde permet de guider la lumière selon une direction choisie, et les fréquences appartenant à la bande interdite peuvent apparaître. Cette caractéristique permet de concevoir de nombreux composants en optique intégrée tels que les additionneurs optiques. Ce travail de thèse présenté dans ce manuscrit, est une étude, conception par simulation et optimisation de nouveau additionneur tout-optique à base 2DPhC dans le domaine non linéaire où l'indice de réfraction change sous l'excitation d'un champ intense ce qui est connu par l'effet Kerr. Dans un premier temps, nous avons simulés un résonateur double anneau basé sur l'effet Kerr, le résonateur est créé par des tiges diélectriques non linéaire de verre dopé et de forme carré à l'intérieur. Ensuite, deux additionneurs (demi et additionneur complet) de base ont été conçu sur une taille de la structure 2DPhC plus petite, et faible intensité de puissance. Dans le but de validation le circuit général à N bit d'addition, deux additionneurs 2 et 4 bits ont été simulés. L'additionneur à N bit est conçu en utilisant en cascade un demi-additionneur et (N-1) additionneurs complets. Les simulations des dispositifs présentées dans cette thèse sont basées sur les méthodes des éléments finis FEM et des ondes planes PWEM à l'aide de logiciel COMSOL Multiphysique.

**Mots clés :** Cristaux photoniques bidimensionnels, additionneur, résonateurs annulaires, effet kerr, non linéarité.

## ملخص

البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد (2DPhC) عبارة عن مواد عازلة ذات بنية نانوية حيث يتغير معامل انكسارها بشكل دوري بترتيب الطول الموجي للضوء، مما يؤثر على خاصية انتشار الضوء في الوسط الشفاف. ولذلك، البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد تتميز بفجوة الحزمة الضوئية، حيث يُمنع انتشار الموجات الضوئية. في هذه الحالة، تغيير دورية البنية البلورة الضوئية عن طريق إدخال ثقوب دائرية و/أو حذف على شكل خط مجموعة من الثقوب دائرية يجعل من الممكن توجيه الضوء في الاتجاه المختار، ويمكن أن تظهر الترددات التي تنتمي إلى فجوة الحزمة الضوئية (BIP). هذه الخاصية تسمح لنا بإمكانية تصميم العديد من المركبات في البصريات المتكاملة مثل الجوامع المنطقية البصرية. إن العمل المقدم في هذه الأطروحة عبارة عن دراسة وتصميم عن طريق المحاكاة وإضافة جديدة لجامع منطقي بصري تعتمد على خاصية اللاخطية حيث يتغير معامل الانكسار تحت تأثير مجال مكثف يُعرف بتأثير كير. أولاً، قمنا بمحاكاة رنانات ذو حلقة مزدوجة بناءً على تأثير كير، حيث يتم تشغيل الرنان بواسطة قضبان عازلة تتميز بمعامل انكسار اللاخطية مصنوعة من الزجاج المخدر ومربعة الشكل من الداخل. بعد ذلك، تم تصميم جامعين أساسيين (نصف جامع وجامع كامل)، يتميز كل جامع بحجم صغير وكثافة طاقة ضعيفة مقارنة مع الأعمال السابقة. اعتمدنا في عمليات محاكاة الدارات المقدمة في هذه الأطروحة على طرق العناصر المحدودة (FEM) والموجات المسطحة (PWEM) باستخدام برنامج المحاكاة كومصول ملتيفيزيك.

**الكلمات الرئيسية:** بلورات ضوئية ثنائية الأبعاد، الجامع، رنانات حلقة، تأثير كير، اللاخطية.

## Abstract

Two-dimensional photonic crystals (2DPhC) are nanostructured dielectric materials whose refractive index changes periodically in the order of the wavelength of light, which impacts the propagation property of the medium. Therefore, 2DPhCs are characterized by a photonic band gap (PBG), in which the propagation of light waves is prohibited. This characteristic makes it possible to design numerous components in integrated optics such as optical adders. The work presented in this manuscript is a study, design by simulation and optimization of a new all-optical adder based on 2DPhC in the nonlinear domain where the refractive index changes under the excitation of an intense field which is known by the Kerr effect. Firstly, we simulated a double ring resonator based on the Kerr effect, the resonator is driven by non-linear dielectric rods doped of glass and square shape. Then, two basic adders (half and full adder) were designed on a smaller 2DPhC structure size, and lower power intensity. To validate the proposal N-bit addition circuit, 2- and 4-bit adders were simulated. The N-bit adder is designed using a cascade of half adder and (N-1) full adders. All simulations presented in this thesis are based on finite element FEM and plane wave PWEM methods using COMSOL Multiphysics software.

**Keywords:** Two-dimensional photonic crystals, adder, ring resonators, kerr effect, nonlinearity.

# Table des matières

|                                                                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Dédicaces.....                                                                                                                | i         |
| Remerciements.....                                                                                                            | ii        |
| Liste des abréviations.....                                                                                                   | iii       |
| Liste des figures .....                                                                                                       | iv        |
| Liste des tableaux.....                                                                                                       | vii       |
| Introduction générale .....                                                                                                   | 1         |
| <b>Chapitre I : Notions sur l'optique non linéaire et les cristaux photoniques.....</b>                                       | <b>6</b>  |
| <b>I.1 Introduction.....</b>                                                                                                  | <b>7</b>  |
| <b>I.2 Optique non linéaire .....</b>                                                                                         | <b>7</b>  |
| I.2.1 Non linéarité du deuxième 2 <sup>ème</sup> ordre en optique .....                                                       | 8         |
| I.2.1.1 Génération de seconde harmonique (GSH) .....                                                                          | 9         |
| I.2.2 Non linéarité du troisième 3 <sup>ème</sup> ordre en optique.....                                                       | 11        |
| I.2.2.1 Génération de troisième harmonique (THG) .....                                                                        | 13        |
| I.2.2.2 Effet Kerr optique .....                                                                                              | 14        |
| <b>I.3 Les cristaux photoniques .....</b>                                                                                     | <b>14</b> |
| I.3.1 Les types des cristaux photoniques .....                                                                                | 15        |
| I.3.1.1 Cristaux photoniques unidimensionnels.....                                                                            | 15        |
| I.3.1.2 Cristaux photoniques bidimensionnels.....                                                                             | 16        |
| I.3.1.3 Cristaux photoniques tridimensionnels .....                                                                           | 17        |
| I.3.2 Diagramme de bande interdite photonique.....                                                                            | 18        |
| I.3.3 Méthodes de modélisation utilisée pour simuler les 2DPhC.....                                                           | 19        |
| I.3.3.1 Méthode de décomposition en onde plane PWEM.....                                                                      | 19        |
| I.3.3.2 Méthode des éléments finis FEM : .....                                                                                | 20        |
| I.3.4 Défauts dans les Cristaux photoniques 2DPhC .....                                                                       | 20        |
| I.3.4.1 Les défauts ponctuels (cavités) .....                                                                                 | 21        |
| I.3.4.2 Les défauts linéaires (Guides d'ondes) .....                                                                          | 21        |
| I.3.5 Résonateur en anneau à 2DPhC .....                                                                                      | 23        |
| I.3.5.1 Résonateur en anneau à 2DPhC en mode linéaire .....                                                                   | 23        |
| I.3.5.2 Résonateur en anneau à 2DPhC en mode non-linéaire .....                                                               | 24        |
| I.3.6 Paramètres d'évaluation les structures à base de 2DPhC.....                                                             | 26        |
| I.3.7 Statistique des structures à des cristaux photoniques.....                                                              | 27        |
| <b>I.4 Conclusion .....</b>                                                                                                   | <b>29</b> |
| <b>Bibliographie .....</b>                                                                                                    | <b>30</b> |
| <b>Chapitre II : Revue de littérature sur les techniques de conception des additionneurs tout optiques à base 2DPhCs.....</b> | <b>32</b> |
| <b>II.1 Introduction .....</b>                                                                                                | <b>33</b> |
| <b>II.2 Principes et techniques de conception des structures à base des cristaux photoniques bidimensionnels .....</b>        | <b>33</b> |
| II.2.1 Structures cristaux photoniques à base des interférences.....                                                          | 33        |

|                                                                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| II.2.2 Structures cristaux photoniques à base d'auto-collimation .....                                                             | 34         |
| II.2.3 Structures cristaux photoniques à base de résonance (à effet de Kerr) .....                                                 | 34         |
| II.2.4 Structures cristaux photoniques à base de graphène .....                                                                    | 35         |
| <b>II.3 Additionneurs à base des cristaux photoniques : Revue de littérature. ....</b>                                             | <b>35</b>  |
| II.3.1 Additionneur tout optique à base des interférences .....                                                                    | 36         |
| II.3.2 Additionneur tout optique à base auto-collimation .....                                                                     | 40         |
| II.3.3 Additionneur tout optique à base de résonance (effet de Kerr non linéaire) .....                                            | 42         |
| II.3.3.1 Cavités résonante .....                                                                                                   | 42         |
| II.3.3.2 Résonateurs en anneau.....                                                                                                | 47         |
| II.3.4 Structures cristaux photoniques à base de graphène .....                                                                    | 51         |
| <b>II.4 Analyse et synthèse bibliographique.....</b>                                                                               | <b>52</b>  |
| <b>II.5 Conclusion .....</b>                                                                                                       | <b>55</b>  |
| <b>Bibliographies.....</b>                                                                                                         | <b>56</b>  |
| <b>Chapitre III : Conception des additionneurs à 1-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires .....</b> | <b>60</b>  |
| <b>III.1 Introduction .....</b>                                                                                                    | <b>61</b>  |
| <b>III.2 Diagramme de bande interdite photonique .....</b>                                                                         | <b>61</b>  |
| <b>III.3 Résonateur en anneau à crystal photonique non-linéaire.....</b>                                                           | <b>62</b>  |
| III.3.1 Résonateur à simple anneau .....                                                                                           | 62         |
| III.3.2 Résonateur à double anneau.....                                                                                            | 64         |
| <b>III.4 Conception demi-additionneur à base des résonateurs en anneau non-linéaires .....</b>                                     | <b>66</b>  |
| III.4.1 Comparaison demi additionneur proposé avec les structures existantes.....                                                  | 71         |
| <b>III.5 Conception additionneur complet à base des résonateurs en anneau non-linéaire .....</b>                                   | <b>73</b>  |
| III.5.1 Comparaison additionneur complet proposé avec les structures existantes .....                                              | 82         |
| <b>III.6 Conclusion .....</b>                                                                                                      | <b>85</b>  |
| <b>Bibliographies.....</b>                                                                                                         | <b>86</b>  |
| <b>Chapitre IV : Conception des additionneurs à N-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires .....</b>  | <b>89</b>  |
| <b>IV.1 Introduction .....</b>                                                                                                     | <b>90</b>  |
| <b>IV.2 Proposition additionneur tout optique 2 bit à base 2DPhCs non linéaire.....</b>                                            | <b>90</b>  |
| IV.2.1 Simulations et résultats .....                                                                                              | 92         |
| IV.2.2 Comparaison additionneur 2 bit proposé avec les structures existantes .....                                                 | 105        |
| <b>IV.3 Conception additionneur tout optique 4-bit à base 2D PhC non linéaires.....</b>                                            | <b>106</b> |
| IV.3.1 Simulation et résultats.....                                                                                                | 107        |
| <b>IV.4 Additionneur tout optique à N-bit 2DhC à base de RAs non linéaires .....</b>                                               | <b>115</b> |
| <b>IV.5 Conclusion.....</b>                                                                                                        | <b>115</b> |
| <b>Bibliographies.....</b>                                                                                                         | <b>117</b> |
| <b>Conclusion générale et perspectives .....</b>                                                                                   | <b>118</b> |
| <b>Annexe A.....</b>                                                                                                               | <b>120</b> |
| <b>Publications et conférences.....</b>                                                                                            | <b>123</b> |

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail À TOUTE ma famille,  
À mes parents, à mes frères et à mes sœurs,  
À ma femme, ma petite-fille **MARIEM BATOUL** et mon petit-fils **MOHAMMED HOUSSEM***

## **Remerciements**

*Cette thèse de doctorat a été effectuée au sein du Laboratoire des Systèmes, et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) de l'université Abou Bekr BELKAID de Tlemcen.*

*Je remercie vivement Madame ABRI BADAoui Hadjira, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, pour m'avoir proposé et dirigé ce travail, pour l'aide, le suivie et les précieux conseils qu'elle m'a prodigué pendant la période de thèse. Je la remercie chaleureusement.*

*J'exprime ma vive gratitude à Monsieur ABRI Mehadji, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, pour sa disponibilité et ses explications toujours enrichissantes. Merci surtout pour ses encouragements et ses remarques pertinentes, qui m'ont permis jusqu'au bout de ce travail.*

*Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de se pencher sur mes travaux ; et en premier lieu je cite Madame MOKHTARI Lila, Maître de conférences A à l'université de Tlemcen pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail en faisant l'honneur de présider le jury de ma soutenance.*

*Monsieur MAHDJoub Zoubir, Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbes, a bien voulu faire partie du jury et a eu la gentillesse d'examiner le travail présent, qu'il accepte mes sincères remerciements pour sa présence et son intérêt.*

*Mes remerciements vont aussi à Madame BENDAoudi Amina, Professeur à l'Université de Sidi Bel Abbes, qui a accepté de participer au jury et d'examiner la présente thèse, qu'elle accepte aussi mes sincères remerciements. Son avis sera certainement enrichissant.*

*Je remercie Monsieur BOUREGAA Mouweffeq, maître de conférences A à l'Université de Mascara qui a bien voulu participer à ce jury.*

## Liste des abréviations

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$a$  : Période du cristal photonique.

$r$  : Rayon du cristal photonique.

$n$  : Indice de réfraction.

$K$  : Vecteur d'onde.

$c$  : Célérité de la lumière dans le vide.

**BIP** : Bande Interdite Photonique.

**2DPhC** : Bidimensionnel Photonics Crystal.

**PhCs**: Cristaux Photoniques.

**PBG**: Photonic Band Gap.

**PWE**: Plane Wave Expansion.

**FEM**: Finite-Element Method.

**TE** : Transverse Electric.

**TM** : Transverse Magnetic.

**RA** : Résonateur en anneau

**SNR** : Signal noise ratio

$P_1(\mathbf{t})$  : Polarisation non linéaire de deuxième ordre.

$P_2(\mathbf{t})$ : Polarisation non linéaire de troisième ordre.

$\chi_2$ : Susceptibilité optique non linéaires de deuxième ordre

$\chi_3$  Susceptibilité optique non linéaires de troisième ordre

**DATO** : Demi Additionneur Tout Optique

**ACTO** : Additionneur Complet Tout Optique

# Liste des figures

## Chapitre I : Notions sur l'optique non linéaire et les cristaux photoniques

|                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I-1</b> : Géométrie et diagramme d'énergie de la génération de second harmonique. ....                                                                                                                                             | 9  |
| <b>Figure I-2</b> : Schéma explicatif du doublage de fréquence (GSH).....                                                                                                                                                                    | 10 |
| <b>Figure I-3</b> : Géométrie et diagramme d'énergie de la génération de troisième harmonique. ....                                                                                                                                          | 13 |
| <b>Figure I-4</b> : Représentation schématique de cristaux photoniques 1D, 2D et 3D. ....                                                                                                                                                    | 15 |
| <b>Figure I-5</b> : Cristaux photoniques unidimensionnels. ....                                                                                                                                                                              | 15 |
| <b>Figure I-6</b> : Cristaux photoniques bidimensionnels (a) connectée, (b) déconnectée. ....                                                                                                                                                | 16 |
| <b>Figure I-7</b> : Structure 2D : (a) carrée, (b) triangulaire, (c) hexagonale. ....                                                                                                                                                        | 17 |
| <b>Figure I-8</b> : Structure 3D "la Yablonovite". ....                                                                                                                                                                                      | 17 |
| <b>Figure I-9</b> : Diagrammes de bandes des CP2Ds de trous d'air dans une matrice de diélectrique ayant l'indice du silicium, polarisations TE (lignes bleus) et TM (lignes rouges) : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire. ....       | 18 |
| <b>Figure I-10</b> : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions, (d) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule tige. ....                                                                           | 21 |
| <b>Figure I-11</b> : Défauts linéaires dans un cristal photonique 2D : (a) en enlevant une seule rangée, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée, (c) et (d) en variant le rayon d'une seule rangée de la structure. .... | 22 |
| <b>Figure I-12</b> : Illustration de la propagation du champ dans un cristal 2DPhC de forme d'un virage de 90° à défaut linéaire. ....                                                                                                       | 22 |
| <b>Figure I-13</b> : Résonateur en anneau à 2DPhC en mode linéaire. ....                                                                                                                                                                     | 23 |
| <b>Figure I-14</b> : Le champ électrique dans le résonateur en anneau, (a) 1500 nm, (b) 1516,2 nm. ....                                                                                                                                      | 24 |
| <b>Figure I-15</b> : Transmission normalisée de résonateur linéaire pour différent rayon rin. ....                                                                                                                                           | 24 |
| <b>Figure I-16</b> : Résonateur en anneau à 2DPhC en mode non linéaire (b), et (a) la longueur d'onde de résonance à 1,55 $\mu\text{m}$ . ....                                                                                               | 25 |
| <b>Figure I-17</b> : Transmission normalisée de résonateur non linéaire (1,55 $\mu\text{m}$ ) pour (a) $I_0$ , (b) $2 \times I_0$ . ....                                                                                                     | 25 |
| <b>Figure I-18</b> : Statistiques des travaux publiés sur 2DPhC (a) articles par année, (b) nombres des structures 2DPhC, (c) configuration 2DPhC, et (d) matériel utilisé dans la conception. ....                                          | 28 |
| <b>Figure I-19</b> : Nombre des articles publiés sur 2DPhC entre 1988-2021. ....                                                                                                                                                             | 29 |

## Chapitre II : Revue de littérature sur les techniques de conception des additionneurs tout optiques à base 2DPhCs

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II-1</b> : Les interférences constructives et destructives. ....                                    | 34 |
| <b>Figure II-2</b> : Demi additionneur proposé par M. Mohamad Abdollahi et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11. ....  | 36 |
| <b>Figure II-3</b> : Demi additionneur proposé par M. Seifouri et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11. ....           | 37 |
| <b>Figure II-4</b> : Demi additionneur proposé par Keivan Saadi et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11. ....          | 38 |
| <b>Figure II-5</b> : Demi additionneur proposé par Somaye Serajmohammadi et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11. .... | 39 |
| <b>Figure II-6</b> : Additionneur complet proposé par Aziz-Morad Vali-Nasab et al. ....                       | 40 |
| <b>Figure II-7</b> : Demi additionneur proposé par Susan C. Xavier et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11. ....       | 41 |
| <b>Figure II-8</b> : Demi additionneur proposé par Mohammad Reza et al. (b) 10, (c) 01 et (d) 11. ....        | 42 |
| <b>Figure II-9</b> : Demi additionneur proposé par Mona Neisy et al. (b) 10, (c) 01 et (d) 11. ....           | 43 |
| <b>Figure II-10</b> : Additionneur complet proposé par S. Naghizade et al. ....                               | 44 |
| <b>Figure II-11</b> : Additionneur complet proposé par F. Cheraghi et al. ....                                | 45 |
| <b>Figure II-12</b> : Additionneurs complet tout optiques proposés par Maliki et al. ....                     | 46 |
| <b>Figure II-13</b> : Demi-additionneur tout optique proposé par Keivan Saadi et al. ....                     | 47 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II-14</b> : Additionneur complet proposé par Hamed Alipour-Banaei et al.....  | 48 |
| <b>Figure II- 15</b> : Additionneur complet proposé par Marziyeh Moradi et al.....      | 49 |
| <b>Figure II-16</b> : Additionneur complet proposé par Mohammad Reza Geraili et al..... | 50 |
| <b>Figure II-17</b> : Additionneur complet proposé par Saleh Naghizade et al.....       | 50 |
| <b>Figure II-18</b> : Additionneur complet proposé par Saleh Naghizade et al.....       | 51 |

### **Chapitre III : Conception des additionneurs à 1-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III-1</b> : Diagramme de bande interdite de photonique.....                                                                                                                                                                                                           | 62 |
| <b>Figure III-2</b> : Le résonateur en anneau non-linéaire à crystal photonique proposé. ....                                                                                                                                                                                   | 63 |
| <b>Figure III-3</b> : Simulation le résonateur en anneau ( $I=10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ , $r_2=90 \text{ nm}$ et $I=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ , $r_2=80 \text{ nm}$ ), distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée (à droite). .... | 64 |
| <b>Figure III-4</b> : Double résonateur en anneau à crystal photonique proposé. ....                                                                                                                                                                                            | 65 |
| <b>Figure III-5</b> : Simulation double résonateur en anneau à crystal photonique (cas 1 : $I_0=10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ), distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée (à droite). ....                                             | 65 |
| <b>Figure III-6</b> : Simulation double résonateur en anneau à crystal photonique (cas 2 : $2 \times I_0=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ), distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée (à droite). ....                                    | 66 |
| <b>Figure III-7</b> : La structure de demi-additionneur proposé.....                                                                                                                                                                                                            | 67 |
| <b>Figure III-8</b> : Le schéma et la table de vérité du circuit demi-additionneur.....                                                                                                                                                                                         | 68 |
| <b>Figure III-9</b> : La structure du demi-additionneur dans le cas initial (Cas#1 : $A_0=0$ et $B_0=0$ ).....                                                                                                                                                                  | 68 |
| <b>Figure III- 10</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#2 : $A_0=1$ et $B_0=0$ ). ....                                                                       | 69 |
| <b>Figure III-11</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#3 : $A_0= 0$ et $B_0=1$ ). ....                                                                       | 69 |
| <b>Figure III-12</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#4 : $A_0=B_0=1$ ). ....                                                                               | 70 |
| <b>Figure III-13</b> : Additionneur complet à base des PhCs utilisant les résonateurs en anneau.....                                                                                                                                                                            | 73 |
| <b>Figure III-14</b> : La structure de l'additionneur complet dans le cas initial (Cas #1 : $A_1=0$ , $B_1=0$ et $C_{in}=0$ ). ....                                                                                                                                             | 74 |
| <b>Figure III-15</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#2 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in}=1,0,0$ ).....                                                             | 75 |
| <b>Figure III-16</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#3 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in} =0,1,0$ ).....                                                            | 76 |
| <b>Figure III-17</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#4 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in} =1,1,0$ ).....                                                            | 77 |
| <b>Figure III-18</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#5 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in} =0,0,1$ ).....                                                            | 78 |
| <b>Figure III-19</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#6 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in} =1,0,1$ ).....                                                            | 79 |
| <b>Figure III-20</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#7 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in} =0,1,1$ ).....                                                            | 80 |
| <b>Figure III- 21</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#8 : $A_1$ , $B_1$ , $C_{in} =1,1,1$ ).....                                                           | 81 |

### **Chapitre IV : Conception des additionneurs N-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires**

|                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure IV-1</b> : Schéma-bloc et la table de vérité du circuit d'additionneur 2-bit proposé.....                                                                                                                                                                | 91  |
| <b>Figure IV-2</b> : Additionneur tout optique 2-bit à base 2DPhCs.....                                                                                                                                                                                            | 91  |
| <b>Figure IV-3</b> : La structure de l'additionneur 2 bit dans le cas initial (Cas#1 : $A_0B_0=00/ A_1B_1=00$ ).....                                                                                                                                               | 93  |
| <b>Figure IV-4</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#1 : $A_0B_0=00$ & a) $A_1B_1=10$ , c) $A_1B_1=01$ et d) $A_1B_1=11$ . ....                 | 95  |
| <b>Figure IV-5</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#2 : $A_0B_0=10$ & a) $A_1B_1=00$ , b) $A_1B_1=10$ , c) $A_1B_1=01$ et d) $A_1B_1=11$ ..... | 98  |
| <b>Figure IV-6</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#3 : $A_0B_0=01/$ a) $A_1B_1=00$ , b) $A_1B_1=10$ , c) $A_1B_1=01$ et d) $A_1B_1=11$ .....  | 101 |
| <b>Figure IV-7</b> : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#4 : $A_0B_0=11$ &a) $A_1B_1=00$ , b) $A_1B_1=10$ , c) $A_1B_1=01$ et d) $A_1B_1=11$ . .... | 104 |
| <b>Figure IV-8</b> : Schéma-blocs général de l'additionneur 4-bit.....                                                                                                                                                                                             | 107 |
| <b>Figure IV-9</b> : Additionneur tout optique 4-bit à base 2D cristal photonique 2DPhC. ....                                                                                                                                                                      | 107 |
| <b>Figure IV-10</b> : Distribution du champ électrique de l'additionneur 4-bit Cas#1 : $A=1111$ and $B=1111$ ). ....                                                                                                                                               | 109 |
| <b>Figure IV-11</b> : Diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue de l'additionneur 4-bit Cas#1 : $A=1111$ and $B=1111$ ).....                                                                                             | 110 |
| <b>Figure IV-12</b> : Distribution du champ électrique de l'additionneur 4-bit Cas#2 : $A=1010$ and $B=1111$ ). ....                                                                                                                                               | 111 |
| <b>Figure IV-13</b> : Diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue de l'additionneur 4-bit Cas#2 : $A=1010$ and $B=1111$ ).....                                                                                             | 112 |
| <b>Figure IV-14</b> : Distribution du champ électrique de l'additionneur 4-bit Cas#3 : $A=0101$ and $B=1010$ ). ....                                                                                                                                               | 114 |
| <b>Figure IV- 15</b> : Diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue de l'additionneur 4-bit Cas#2 : $A=0101$ and $B=1010$ ).....                                                                                            | 114 |
| <b>Figure IV- 16</b> : Additionneur tout optique à N-bit 2DPhC à base de RAs non linéaires. ....                                                                                                                                                                   | 115 |

## **Annexe A : Technique de fabrication**

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure A- 1</b> : Schéma de structure 2DPhC à base de la technologie SOI.....              | 120 |
| <b>Figure A- 2</b> : Schéma des étapes de fabrication des structure 2DPhC. ....               | 121 |
| <b>Figure A- 3</b> : Fabrication un résonateur en anneau à base SOI et la technique EBL. .... | 122 |

# Liste des tableaux

## Chapitre I : Notions sur l'optique non linéaire et les cristaux photoniques

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau I-1</b> : Inventaire des principaux processus non-linéaires du second ordre. ....   | 9  |
| <b>Tableau I-2</b> : Inventaire des principaux processus non-linéaires du troisième ordre..... | 13 |

## Chapitre II : Revue de littérature sur les techniques de conception des additionneurs tout optiques à base 2DPhCs

|                                                                                                                            |                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Tableau II-1</b> : Avantages et inconvénients des différentes techniques de conception des structures à base 2DPhC..... | 53                                  |
| <b>Tableau II-2</b> : Comparaison des différentes techniques pour construire des additionneurs à base 2DPhC .....          | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |

## Chapitre III : Conception des additionneurs à 1-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III-1</b> : Table de vérité de demi-additionneur. ....                                                                               | 71 |
| <b>Tableau III-2</b> : Comparaison les caractéristiques de demi-additionneur proposé avec les structures publiées récemment .....               | 72 |
| <b>Tableau III-3</b> : Table de vérité de l'additionneur complet.....                                                                           | 82 |
| <b>Tableau III-4</b> : Comparaison des caractéristiques de l'additionneur complet proposé avec les structures trouvées dans la littérature..... | 84 |

## Chapitre IV : Conception des additionneurs N-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tableau IV-1</b> : Résultats de simulation pour les différents cas de l'additionneur 2-bit..... | 105 |
| <b>Tableau IV-2</b> : Comparaison l'additionneur proposé avec les structures précédentes. ....     | 106 |
| <b>Tableau IV-3</b> : Les résultats de simulation des trois cas étudiés. ....                      | 115 |

## **Introduction générale**

Les réseaux de système de communication par fibre optique et la conversion électrique-optique-électrique proposent des limitations des composants optoélectroniques aux blocs d'émission et de réception, tels que : la bande passante, signal/bruit SNR, débit, et vitesse de transmission des données. Ces dernières années, et avec la découverte de l'optique non linéaire, qui sera possible de commander la lumière par la lumière elle-même. Les chercheurs s'intéressent de trouver un moyen d'effectuer un traitement tout-optique de l'information sans passer par la conversion électrique-optique et vice versa. Ils sont orientés vers la conception de composants tout optiques à base des cristaux photoniques PhCs, dans le but d'augmentation de la bande passante, le débit de données maximal, diminution du bruit (signal/bruit SNR), transmission à grande vitesse et ultra traitement rapide.

Les cristaux photoniques (PhCs) sont des matériaux diélectriques nanostructures dont l'indice de réfraction change périodiquement dans l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, ce qui a un impact sur la propriété de propagation du milieu. Par conséquent, les PhCs sont caractérisés par une bande interdite photonique (PBG), dans laquelle la propagation des ondes lumineuses est interdite et ceci quel que soit l'angle d'incidence. Pour les longueurs d'ondes situées à l'intérieur de la bande interdite photonique, le cristal photonique réfléchit totalement la lumière.

La modification de la périodicité de de la structure (insertion de défauts ponctuels et/ou des guide d'onde) permet de guider la lumière selon une direction choisie, et dans ce cas, les fréquences appartenant à la bande interdite peuvent apparaître. Les PhC peuvent être divisés en trois principaux groupes, unidimensionnelle (1DPhCs), bidimensionnelle (2DPhCs) ou encore tridimensionnelles (3DPhCs), et chacune de ces structures peut être utilisée pour différentes applications optiques.

Plusieurs types de dispositifs optiques ont été conçus autour de la longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$  en utilisant des cristaux bidimensionnelle 2DPhC, tels que : multiplicateurs [1], démultiplexeurs [2], multiplexeurs [3], encodeurs [4], décodeurs [5], comparateurs [6], portes logiques [7], soustracteurs [8], gyroscope optique [9], capteurs [10], analogues à convertisseurs numériques [11], additionneurs/soustracteurs [12], et additionneurs [13].

La conception d'un additionneur complet est essentielle pour effectuer des opérations arithmétiques efficaces dans divers domaines de l'électronique et de l'informatique. Ce

composant fondamental permet d'ajouter plusieurs éléments d'information rapidement et avec précision.

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle conception d'additionneur tout optique à base des cristaux Photoniques pour effectuer l'addition des nombres binaires à N bits, qui fonctionne dans la bande des longueurs d'onde des télécommunications autour de 1,55  $\mu\text{m}$ . Comme élément de base, nous utiliserons un résonateur en anneau non linéaire à effet kerr dans lequel l'indice de réfraction d'un carré de tiges diélectriques est modifié et remplacé par des tiges à un indice de réfraction non linéaire.

En s'appuyant sur les méthodes des éléments finis FEM et des ondes planes PWEM comme des outils numériques pour étudier de diagramme de bande et la distribution du champ électromagnétique à l'intérieur de la structure sous le logiciel COMSOL Multiphysique.

Cette thèse s'articule autour de quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre de ce manuscrit portera sur la présentation des notions sur l'optique non-linéaire et les cristaux photoniques. Dans une première partie, nous expliquerons les notions de base de l'optique non linéaire plus particulièrement les méthodes non linéaires du second ordre, et troisième ordre. Ainsi que, l'effet Kerr qui sera le phénomène non linéaire de troisième ordre essentielle pour la conception l'additionneur tout optique proposé dans cette thèse. Dans une deuxième partie, nous présenterons une introduction aux concepts de base liés aux cristaux photoniques, leurs différents types, et le principe de bande interdite photonique BIP dans les cristaux de type 2DPhC. Ensuite, nous allons rappeler les méthodes de calcul qui seront utilisées pour la modélisation numérique des caractéristiques d'une structure 2DPhC afin de concevoir un composant optimal qui répond aux critères de conception. La méthode des ondes planes PWEM sera adaptée pour le calcul des bandes de fréquences permises et interdites, quant à la méthode des éléments finis FEM, elle sera exploitée pour modéliser la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur de la structure proposée à l'aide de logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Nous traiterons également les principes de défaut ponctuels et à guide d'ondes qui existent au sein des 2DPhC. Après, nous passerons à présenter le résonateur en anneau dans le domaine linéaire et non linéaire. Nous clôturerons ce chapitre par une étude de tous les paramètres d'évaluation et les statistiques de l'évolution rapide sur la conception des structures à base des cristaux photoniques.

Le deuxième chapitre sera consacré à une brève présentation de principe des différentes techniques pour la conception d'une manière générale des dispositifs à cristaux photoniques 2DPhC, et en particulier les additionneurs tout optique. Ensuite, nous présenterons les

différentes recherches sur les additionneurs à base 2DPhC réalisées au cours des dernières années par plusieurs auteurs. A la fin de ce chapitre, nous effectuerons une synthèse bibliographique, et une comparaison des travaux sur les additionneurs tous optiques où nous introduirons les méthodes de conception, avantages, désavantages et, leurs possible d'applications.

La conception des additionneurs tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires de 1 bit, 2 bits, 4 bits et N bits d'addition sera démontrés par simulation dans le troisième et quatrième chapitre. Nous allons commencer dans le troisième chapitre par la conception de résonateur en anneau à crystal photonique non linéaire à base de l'effet kerr adapté à la longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$ , qui est un dispositif clé à la conception des additionneurs tous optiques été proposés. Nous allons donc étudier en premier lieu la conception d'un demi additionneur, puis un additionneur complet tout optique. Ce sont deux dispositifs de base pour la conception d'additionneur de N bits d'addition. Les diagrammes de puissances normalisée ainsi que la distribution du champ électrique seront discutés en utilisant la méthode FEM. Dans le but d'évaluation l'efficacité de nos additionneurs une étude comparative avec les travaux existants, sera exposée.

Le quatrième chapitre sera réservé pour la conception d'additionneur à N bits. Tout d'abord, nous allons simuler les structures 2 bits, et 4 bits d'addition, qui sont basés sur les deux dispositifs précédents (demi et additionneur complet). Enfin, nous allons généraliser la conception d'additionneur de N bits à base de 2DPhC. Ce sont des dispositifs clés de l'optique intégrée qui ont proposé pour application dans les systèmes de communication des circuits photoniques.

Nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale, des recommandations et des perspectives.

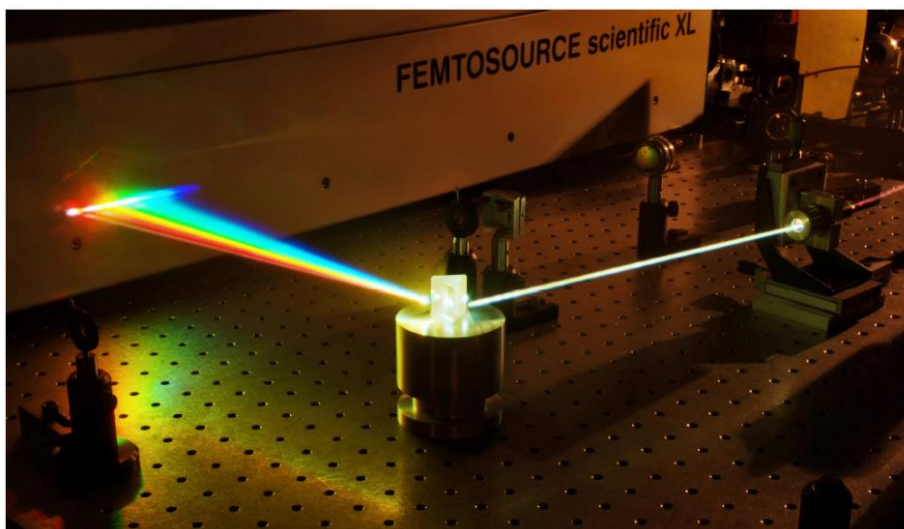
**Bibliographie :**

1. Liaghati-Rad, M., Soroosh, M. & Kosarian, A. High-speed all-optical 2-bit multiplier based on photonic crystal structure. *Photon Netw Commun* 43, 193–203 (2022).
2. B. Rahmi, H. Badaoui, M. Abri. Design of a 8-channel demultiplexer with ultra-highly quality factor and low crosstalk for DWDM applications. *Opt Quant Electron* 53, 363 (2021).
3. Maleki, M.J., Soroosh, M. An ultra-fast all-optical 2-to-1 digital multiplexer based on photonic crystal ring resonators. *Opt Quant Electron* 54, 397 (2022).
4. Veisi, E., Mohammadi, et al. Design and numerical analysis of high-performance all-optical  $4 \times 2$  encoder using photonic crystal ring resonator. *Opt Quant Electron* 55, (2023).
5. Rahmi, B., Badaoui, H., Abri, M. et al. High-performance all-optical  $3 \times 8$  photonic crystal decoder using nonlinear micro-ring resonators. *Appl. Phys. B* 129, 35 (2023).
6. Askarian, A. Design and implementation of all optical  $4 \times 2$  encoder based on 2D-PhC platform and optical Kerr effect. *Opt Quant Electron* 55, 822 (2023).
7. L. Mokhtari, H. Badaoui, M. Abri, A. Mounqar, F. Lallam, and B. Rahmi, "Proposal of a New Efficient OR/XOR Logic Gates and All-Optical Nonlinear Switch in 2D Photonic Crystal Lattices," *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 106, 187-197, 2020.
8. A. Askarian, G. Akbarizadeh, M. Fartash, "An all-optical half subtractor based on Kerr effect and photonic crystals", *Optik*, Vol. 207, (2020),
9. Mohammadi, M., Olyaei, S. & Seifouri, M. Design and optimization of passive optical gyroscope, based on nanostructures ring resonators for rotation sensing applications. *Opt Quant Electron* 54, 696 (2022).
10. B. Mohebzadeh Ahmad, O. Saeed, A. Hassan, Optical Biochemical Sensor Using Photonic Crystal Nano-ring Resonators for the Detection of Protein Concentration, *Current Nanoscience*; 13(4), 2017.
11. S.I. Shelash, A.A. Alkhayyat, M. M. Shafieezadeh, N.K. Acwin Dwijendra, E. Khalaf, I. Muda, "A Novel Microstructure of 2-Bit Optical Analog to Digital Converter Based on Kerr Effect Nonlinear Nanocavities in 2D Photonic Crystal", *Journal of Sensors*, 2023.
12. Saghar Sadegh-Bonab, Hamed Alipour-Banaei, A novel proposal for an all-optical 2-bit adder/subtractor based on photonic crystal ring resonators, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, V. (39), 2020.

13. H. Alipour-Banaei, H. Seif-Dargahi, Photonic crystal based 1-bit full-adder optical circuit by using ring resonators in a nonlinear structure, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Vol. 24, pp.29-34, May 2017.

# Chapitre I :

## Notions sur l'optique non linéaire et les cristaux photoniques



## I.1 Introduction

Les cristaux photoniques tridimensionnels (3DPhCs) permettent un contrôle de la lumière dans toutes les directions de l'espace et c'est ce qui fait leur principal intérêt. Cependant, leurs méthodes de modélisation et de fabrication restent très délicates. Pour cela, les chercheurs de ce domaine sont dirigés vers les cristaux photoniques 1D et 2D. Plus précisément, les 2DPhCs qui ont connu un développement considérable pour la conception de composants optiques. L'adaptation de ces derniers à l'optique non-linéaire, permet d'envisager de nouvelles perspectives telles que la réalisation de composants tout optique ayant des dimensions très petites. Le traitement ultra-rapide des phénomènes optiques non linéaires pour le traitement du signal et informatique est réalisé sur les signaux analogiques et numériques directement dans le domaine tout optique et sans passer à la conversion de signal (E-O-E) électrique-optique et vice versa [1].

Ce chapitre est organisé de la façon suivante : nous commençons par des notions sur l'optique non linéaire plus particulièrement les phénomènes non linéaires du second ordre, troisième ordre, et l'effet Kerr non linéaire.

Ensuite, une deuxième partie sur les cristaux photoniques, pour objectif de présenter les concepts de base liés aux cristaux photoniques (PhCs). En premier lieu, nous présentons brièvement les différents types de cristaux photoniques, le principe de bande interdite photonique BIP, et les méthodes de modélisation des cristaux photoniques à bidimensionnelle. Après, nous passons à présenter le résonateur en anneau dans le domaine linéaire et non linéaire. Enfin, Nous détaillons par la suite les paramètres d'évaluation des structures 2DPhC. Dans la dernière section nous présentons l'évolution rapide de la recherche scientifique sur la conception des structures à base des cristaux photoniques.

## I.2 Optique non linéaire

La non linéarité du domaine de l'optique est l'étude de l'ensemble des phénomènes qui se produisent des modifications des propriétés optiques dans les matériaux non linéaires par la présence d'une source des faisceaux de la lumière intense [2]. Les expériences de la pratique de l'optique linéaire n'est pu être réalisé qu'à partir de l'année 1962 avec le développent des sources lasers capables d'émettre de la lumière intense pour changer ou modifier les propriétés optiques d'un matériau. Dans le cas où le champ appliqué est faible, la polarisation est caractérisée par la susceptibilité linéaire  $\chi_1$  du milieu :

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi_1 E(t) \quad (\text{I.1})$$

Lorsqu'une onde lumineuse se propage dans un milieu matériel avec une intensité de puissance plus élevée, donc il est maintenant nécessaire de tenir compte d'autres termes dits non linéaires qui apparaissent dans l'équation de polarisation  $P(t)$ . Ceci est accompli par l'écriture de la nouvelle expression de la polarisation qui dépend du champ électrique  $E$ . la nouvelle équation de polarisation est exprimée par la relation [3]:

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi_1 E(t) + \chi_2 E^2(t) + \chi_3 E^3(t) + \dots] = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) \dots \quad (\text{I.2})$$

Où :  $\chi_2$  et  $\chi_3$  sont appelées la susceptibilité optique non linéaires de deuxième et troisième ordre, respectivement.

$$P_2(t) = \varepsilon_0 \chi_2 E(t) ; \quad P_3(t) = \varepsilon_0 \chi_3 E(t) \quad (\text{I.3})$$

$P_2(t)$  : Polarisation non linéaire de deuxième ordre.

$P_3(t)$  : Polarisation non linéaire de troisième ordre.

### I.2.1 Non linéarité du deuxième 2<sup>ème</sup> ordre en optique

La non linéarité en optique est basée sur des processus mettant en jeu dans la matière des phénomènes apparaissant lorsqu'on utilise des sources lumineuses intenses. Avec de telles intensités, la matière peut produire des processus non linéaires. Les processus non-linéaires du deuxième ordre résultent de la polarisation d'ordre deux induite dans le matériau. Les effets non-linéaires du second ordre consistent essentiellement en des phénomènes de *mélange d'ondes*, incluant l'addition et la différence de fréquences, mais peuvent prendre des formes très variées.

Les principaux processus non-linéaires du deuxième ordre, On peut notamment citer les effets suivants [3] :

- ✓ Doublage de fréquence : (Génération de second harmonique, SHG : Second Harmonic Generation)
- ✓ Somme de fréquences : (Génération de fréquence somme, SFG Sum-Frequency Generation)
- ✓ Différence de fréquences : (DFG : Différence Frequency Generation).
- ✓ Redressement optique : (OR : Optical Rectification).
- ✓ Effet électro-optique (Pockels).

Le **tableau I-1** ci-dessous fait l'inventaire des principaux processus non-linéaires du second ordre (les fréquences sont ici supposées toutes positives).

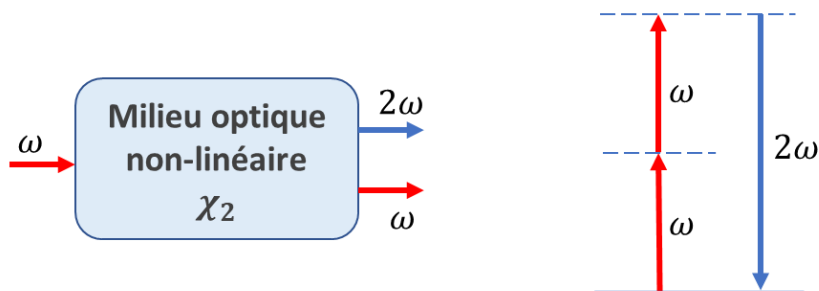
|                                                                                                                                      |                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\chi_2(-2\omega; \omega; \omega)$<br>$P_2(2\omega) = (1/2)\varepsilon_0\chi_2(2\omega)E_1^2$                                        | Doublement de fréquence : (Génération de seconde harmonique,<br><b>SHG</b> : Second Harmonic Generation) |
| $\chi_2(-(\omega_1 + \omega_2); \omega_1; \omega_2)$<br>$P_2(\omega_1 + \omega_2) = \varepsilon_0\chi_2(\omega_1 + \omega_2)E_1E_2$  | Somme de fréquences :<br><b>(SFG Sum-Frequency Generation)</b>                                           |
| $\chi_2(-(\omega_1 - \omega_2); \omega_1; -\omega_2)$<br>$P_2(\omega_1 - \omega_2) = \varepsilon_0\chi_2(\omega_1 - \omega_2)E_1E_2$ | Différence de fréquences :<br><b>DFG</b> Différence Frequency Generation                                 |
| $\chi_2(0; \omega; -\omega)$<br>$P_2(0) = (1/2)\varepsilon_0\chi_2(0)(E_1^2 + E_2^2)$                                                | Redressement optique :<br><b>OR</b> Optical Rectification.                                               |
| $\chi_2(-\omega; \omega; 0)$<br>$P(\omega) = \varepsilon_0\chi_2(\omega)E^2$                                                         | Effet électro-optique ( <b>Pockels</b> )                                                                 |

**Tableau I-1** : Inventaire des principaux processus non-linéaires du second ordre.

### I.2.1.1 Génération de seconde harmonique (GSH)

La génération de seconde harmonique (également appelé doublement de fréquence) est un processus d'optique non linéaire dans lequel des photons interagissant avec un matériau non linéaire possédant une  $\chi_2$  sont combinés pour former de nouveaux photons avec le double de l'énergie, donc avec le double de la fréquence ou la moitié de la longueur d'onde des photons initiaux. Le **figure I-1** montre la géométrie et le diagramme d'énergie de GSH.

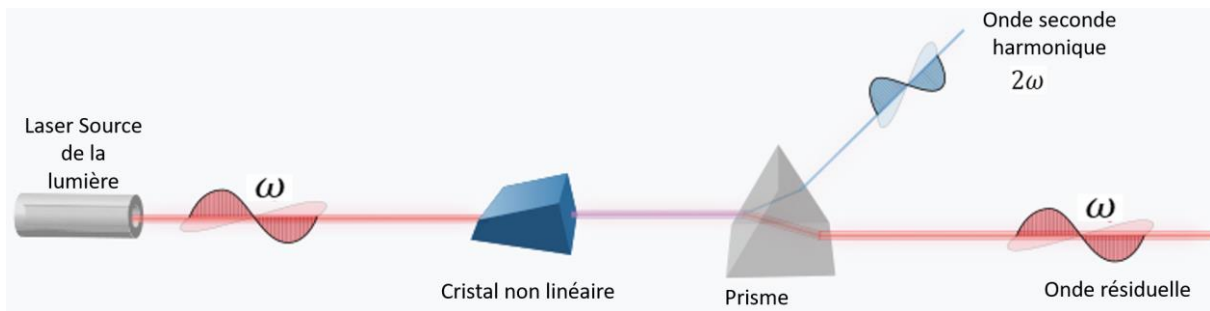
Après la première mise en œuvre d'une source laser par Maiman en 1960, Franken et ses collaborateurs réalisent la première démonstration de la génération de la seconde harmonique à  $2\omega$  à partir d'un faisceau laser à la fréquence  $\omega$ . Ils propagent le faisceau d'un laser à rubis à 694,2 nm à travers un cristal de quartz et observent la création d'un faisceau de lumière à 347,1 nm. Le rendement de conversion ne dépassait pas quelques  $10^{-8}$ , mais cette expérience a été la première à démontrer la génération de seconde harmonique ; elle marque la naissance de l'optique non linéaire.



**Figure I-1** : Géométrie et diagramme d'énergie de la génération de second harmonique.

Considérons un faisceau laser de fréquence  $\omega$  et d'intensité  $I_1$  (fondamental), incident sur un milieu non-linéaire sans perte parallèlement à l'axe Oz (voir la **figure I-2**). La polarisation du second ordre induit tout au long du cristal une onde laser cohérente de fréquence  $2\omega$  et d'intensité  $I_2$ .

Lorsqu'un faisceau laser de fréquence  $\omega$  est incident sur un matériau non linéaire possédant un  $\chi_2$  non nul, il donne naissance à une polarisation non linéaire de fréquence  $2\omega$ . Cette polarisation rayonne une onde de fréquence  $2\omega$  : ce qu'on appelle *la génération de seconde harmonique*.



**Figure I-2** : Schéma explicatif du doublage de fréquence (GSH).

En pratique, plusieurs phénomènes limitent l'efficacité de ce doublage. Il existe en effet un problème de désaccord de phase au sein du matériau entre les ondes  $\omega$  et  $2\omega$  car celles-ci ne progressent pas avec les mêmes indices de réfractifs, ce qui empêche les conservations de la quantité de mouvement et de l'énergie. D'autre part, du fait de la double réfraction, les deux faisceaux ne sont pas parfaitement superposés ce qui influe sur le rendement du couplage.

Donc, pour obtenir un taux de conversion maximal, il faut vérifier les conditions d'accord de phase, cette condition est remplie lorsque le vecteur somme des vecteurs d'onde des ondes incidentes est égal au vecteur d'onde de l'onde émise. Dans le cas d'une seule onde incidente, la relation d'accord de phase est vectorielle et peut s'écrire :

$$2\vec{k}(\omega) - \vec{k}(2\omega) = 0 \quad (\text{I.4})$$

$\vec{k}(\omega)$ , et  $\vec{k}(2\omega)$  sont les vecteurs d'onde des ondes fondamentale de pulsation  $\omega$  et doublée de pulsation  $2\omega$  respectivement.

Ainsi, pour le doublement de fréquence, l'accord de phase se traduit par une condition sur les indices de réfraction aux fréquences  $\omega$  et  $2\omega$ . En écrivant les modules des vecteurs en fonction des fréquences et des indices vus par les ondes, on a :

$$\left| \vec{k}_\omega \right| = \frac{\omega \cdot n_\omega}{c} \quad (\text{I.5})$$

$$\left| \vec{k}_{2\omega} \right| = \frac{2\omega \cdot n_{2\omega}}{c} \quad (\text{I.6})$$

Où  $n_\omega = n(\omega)$ ,  $n_{2\omega} = n(2\omega)$  sont les indices vus par les ondes fondamentale et doublée et « c » est la vitesse de la lumière dans le vide. Ceci implique que la condition d'accord de phase aura lieu lorsque :

$$n(2\omega) = n(\omega) \quad (\text{I.7})$$

Si on travaille dans la région de transparence des matériaux, la condition des indices n'est jamais vérifiée à cause de la dispersion normale  $n_\omega < n_{2\omega}$ . L'utilisation de matériaux anisotropes biréfringents se révèle donc nécessaire si l'on veut remplir les conditions d'accord de phase.

### I.2.2 Non linéarité du troisième 3<sup>ème</sup> ordre en optique

Les matériaux qui ont une susceptibilité dominante de troisième ordre  $\chi_3$  présentent plusieurs des phénomènes non linéaires. Ces phénomènes sont a priori d'amplitude plus faible que ceux du deuxième ordre. Ils jouent cependant un rôle très important en optique non-linéaire pour deux raisons :

- Dans le cas des matériaux isotropes comme le verre (centro-symétriques), la non linéarité du second ordre n'existait pas ( $\chi_2 = 0$ ). La non-linéarité du troisième ordre correspond dans ce cas au premier effet non-linéaire observable. La polarisation en fonction du temps devient :

$$P(t) = \varepsilon_0 [\chi_1 E(t) + \chi_3 E^3(t)] \quad (\text{I.8})$$

La génération de seconde harmonique (GSH) et le mélange à trois ondes ne peuvent se produire que dans un milieu de matériel non linéaire à une susceptibilité de  $\chi_2$ , qui n'a pas de centre de symétrie d'inversion (non-centrosymmetric medium).

- La seconde raison, contrairement aux phénomènes du second ordre, certains processus du troisième ordre obéissent automatiquement à l'accord de phase. Dans ce cas, l'effet de la non linéarité optique pourra se cumuler sur de très grandes distances, voire sur des milliers de kilomètres dans le cas de la propagation d'une impulsion courte le long d'une fibre optique.

On considère une onde incidente de fréquence  $\omega$  dans un milieu de matériel, avec un champ électrique  $E$  dépend du temps exprimé par :

$$E(t) = A \cdot \cos(\omega t) \quad (\text{I.9})$$

En remplaçant cette expression dans l'équation (I.4), et on utilise la dentité trigonométriques :

$\cos^3 \omega t = (\cos 3\omega t + 3 \cos \omega t)/4$ , on obtient :

$$P(t) = P_0 + P_\omega \cos \omega t + P_{2\omega} \cos 2\omega t + P_{3\omega} \cos 3\omega t \quad (\text{I.10})$$

Où :

$$\begin{aligned} P_0 &= 0 \\ P_\omega &= \varepsilon_0 A \cdot [\chi_1 + (3/4) \chi_3 A^2] \end{aligned} \quad (\text{I.11})$$

$$\begin{aligned} P_{2\omega} &= 0 \\ P_{3\omega} &= \frac{1}{4} \varepsilon_0 \chi_3 A^3 \end{aligned} \quad (\text{I.12})$$

On a  $P_0 = P_2 = 0$ , il n'y a pas de rectification optique ou SHG dans un milieu matériel  $\chi_3$ .

Cependant, il existe un terme  $P_{3\omega}$  oscillant à la fréquence  $3\omega$  eq (I.12), qui générera une lumière supplémentaire à une fréquence trois fois celle de la lumière incidente. Il s'agit de *génération de troisième harmonique (THG)* ou bien *triple fréquence*.

La génération de troisième harmonique est un cas particulier du phénomène plus général connu sous le nom de *mélange à quatre ondes (FWM Four Wave Mixing)*.

Le terme de  $P_\omega$  del' eq (I.11) décrit une contribution non linéaire de polarisation à la fréquence du champ électrique incident. Cela conduit à un phénomène de contribution non linéaire à l'indice de réfraction subi par une onde incidente à la fréquence  $\omega$  ; ce phénomène est connu par *l'effet kerr non linéaire*.

Les matériaux qui ont une susceptibilité dominante de troisième ordre  $\chi_3$  présente des phénomènes d'optiques non linéaires différents tels que [3] :

- ✓ Génération de troisième harmonique (**THG** : Third Harmonic Generation)
- ✓ Mélange à quatre ondes (**FWM** Four Wave Mixing) : non dégénérées et dégénérées.
- ✓ Effet optique Kerr (**OKE** Optical Kerr Effect), l'auto modulation de phase, la modulation de phase croisée,
- ✓ Absorption à deux photons (**TPA** Two Photon Absorption).
- ✓ Diffusion inélastiques Raman, Brillouin (**RS** Raman Scattering).

Le **tableau I-2** ci-dessous fait l'inventaire des principaux processus non-linéaires du troisième ordre.

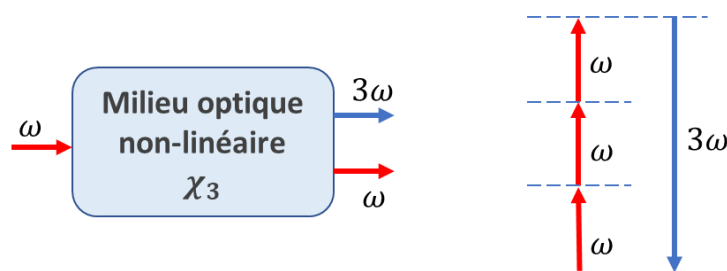
|                                                                                 |                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| $\chi_3(-3\omega; \omega; \omega, \omega)$                                      | Génération de troisième harmonique<br>( <b>THG</b> : Third Harmonic Generation) |
| $\chi_3(-(\omega_1 + \omega_2) \pm \omega_3; \omega_1; \omega_2; \pm \omega_3)$ | Mélange à 4 ondes non dégénérées<br>( <b>FWM</b> : Four Wave Mixing)            |
| $\chi_3(-\omega; \omega; \omega, -\omega)$                                      | Mélange à 4 ondes dégénérées<br>(Degenerate <b>FWM</b> Four Wave Mixing)        |
| $Re \chi_3(-\omega; \omega; 0,0)$                                               | Effet Kerr optique<br>( <b>OKE</b> Optical Kerr Effect),                        |
| $Im \chi_3(-\omega; \omega; -\omega, \omega)$                                   | Absorption à deux photons<br>( <b>TPA</b> Two Photon Absorption)                |
| $\chi_3(\omega \pm \Omega); \omega; -\omega, \omega \pm \Omega)$                | Diffusion inélastiques Raman, Brillouin<br>( <b>RS</b> Raman Scattering)        |

**Tableau I-2** : Inventaire des principaux processus non-linéaires du troisième ordre.

### I.2.2.1 Génération de troisième harmonique (THG)

On peut décrire la génération de la troisième harmonique (THG) ou aussi le triplage de fréquence est un processus non linéaire combinant trois photons d'énergie  $\omega$  pour donner un photon avec triple d'énergie  $3\omega$  (voir la **figure I-3**). L'expression "troisième harmonique" vient du fait que pour une longueur d'onde initiale (fondamentale), on génère la longueur d'onde trois fois plus petite. On obtient donc une fréquence trois fois plus importante.

Dans le cas où les photons ont des fréquences différentes, le processus est appelé mélange à quatre ondes (*FWM* : *Four Wave Mixing*).



**Figure I-3** : Géométrie et diagramme d'énergie de la génération de troisième harmonique.

Similaire au phénomène de génération de deuxième harmonique, il est nécessaire d'avoir une condition d'accord de phase qui permette le recouvrement entre le faisceau à la fréquence fondamentale et le faisceau engendré à l'harmonique trois. Cette condition peut être satisfaite dans des matériaux anisotropes [3].

### I.2.2.2 Effet Kerr optique

Dans la section précédente qu'une onde de fréquence incidente sur un support  $\chi_3$  va produire des oscillations de polarisation en  $3\omega$ . Toutefois, d'importance égale (voire plus grande) sont les oscillations de polarisation supplémentaires en fréquence  $\omega$  produites par les  $\chi_3$  non-linéarité.

D'après l'équation. (I.11), la susceptibilité linéaire  $\chi_1$  est remplacée par une susceptibilité effective [4] :

$$\chi'_1 = \chi_1 + \frac{3}{4}\chi_3 A^2 \quad (\text{I.13})$$

L'indice de réfraction linéaire est donné en fonction de la susceptibilité linéaire par :

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} = \sqrt{\varepsilon/\varepsilon_0} = \sqrt{1 + \chi} \quad (\text{I.14})$$

La différentielle de l'équation (I.14) donne :

$$\Delta n = \frac{1}{2\sqrt{1+\chi_1}} \Delta\chi_1 = \frac{\Delta\chi_1}{2n} = \frac{3}{8n}\chi_3 A^2 \quad (\text{I.15})$$

$$I = \frac{c}{n} \cdot \rho = \frac{1}{2} c \cdot n \cdot \varepsilon_0 A^2 \quad (\text{I.16})$$

D'après l'équation (I.15), nous pouvons observer que l'indice de réfraction change proportionnellement au carré de l'amplitude « A » du champ électrique E, ce changement étant lié par  $\chi_3$ . L'équation (I.16) a été utilisée pour exprimer la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité lumineuse I. Le carré de l'amplitude du champ est :

$$A^2 = \frac{2I}{c \cdot n \cdot \varepsilon_0} \quad (\text{I.17})$$

On remplace l'équation (I.17) dans l'équation (I.15), le changement de l'indice de réfraction devient :

$$\Delta n = \frac{3\chi_3}{4n^2 c \varepsilon_0} \cdot I \quad (\text{I.18})$$

L'indice de réfraction peut alors s'écrire sous la forme simple :

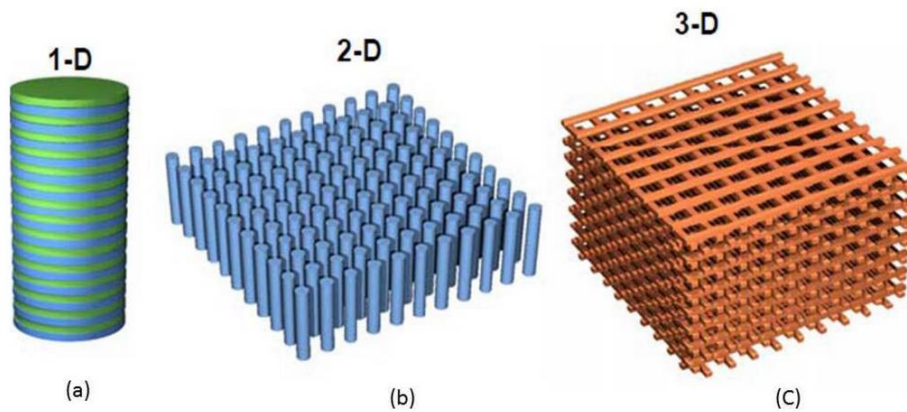
$$n = n_0 + n_2 I ; \quad \Delta n = n_2 I \quad (\text{I.19})$$

$$n_2 = \frac{3\chi_3}{4n^2 c \varepsilon_0} \quad (\text{I.20})$$

## I.3 Les cristaux photoniques

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice diélectrique de matériaux « n » varie de manière périodique sur une ou plusieurs directions de l'espace. La périodicité peut être unidimensionnel 1D (la forme la plus simple est appelé miroir de Bragg), 2D bidimensionnel

ou encore 3D tridimensionnel, la **figure I-4** montre les différents types des PhCs. Cette variation périodique de l'indice optique suivant les différentes directions entraîne l'apparition de gammes de fréquence pour laquelle la lumière ne peut alors plus se propager. C'est l'analogie entre la propagation d'une onde électromagnétique dans ces milieux et la propagation des électrons dans un cristal photonique qui a mené à l'appellation de ces bandes de fréquences *Bandes interdites Photoniques* [5].



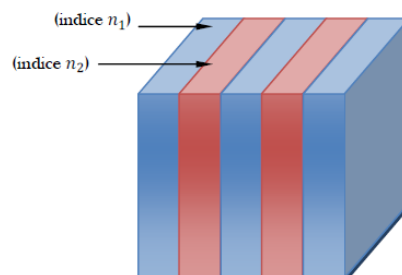
**Figure I-4** : Représentation schématique de cristaux photoniques 1D, 2D et 3D.

### I.3.1 Les types des cristaux photoniques

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, on peut diviser les cristaux photoniques en trois catégories : unidimensionnel (1DPhCs), bidimensionnel (2DPhCs), et tridimensionnel (3DPhCs).

#### I.3.1.1 Cristaux photoniques unidimensionnels

Le réseau de Bragg est un exemple de ce type de structure unidimensionnels. Elles sont réalisées par une succession de couches d'indice de réfraction différent ( $n_1, n_2$ , avec  $n_1 < n_2$ ) et d'épaisseur égale à  $\lambda/4$  dans une seule direction de l'espace  $Z$ .  $\lambda$  étant la longueur d'onde guidée autour de laquelle le matériau doit interdire la propagation des ondes électromagnétiques sous une incidence normale. Un schéma de cette structure est représenté sur la **figure I-5**.

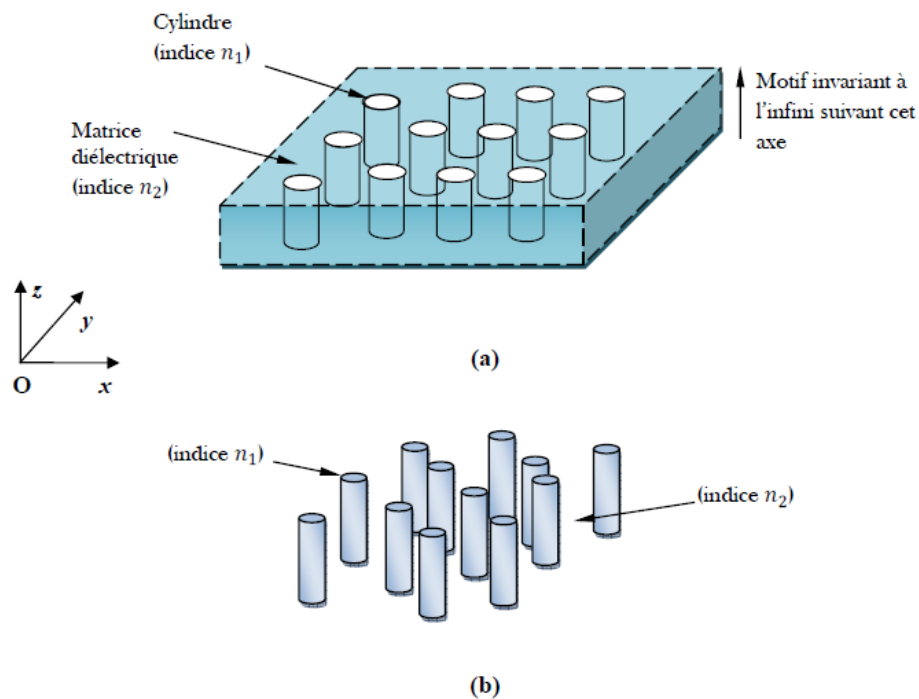


**Figure I-5** : Cristaux photoniques unidimensionnels.

Plusieurs applications en optique ont été prouvés à base des réseaux de Bragg tel que, filtres sélectifs de longueur d'onde, convertisseurs de modes pour fibres optiques, multiplexeurs, miroirs de cavités lasers (VECSELs), filtres, compensateur de dispersion.

### I.3.1.2 Cristaux photoniques bidimensionnels

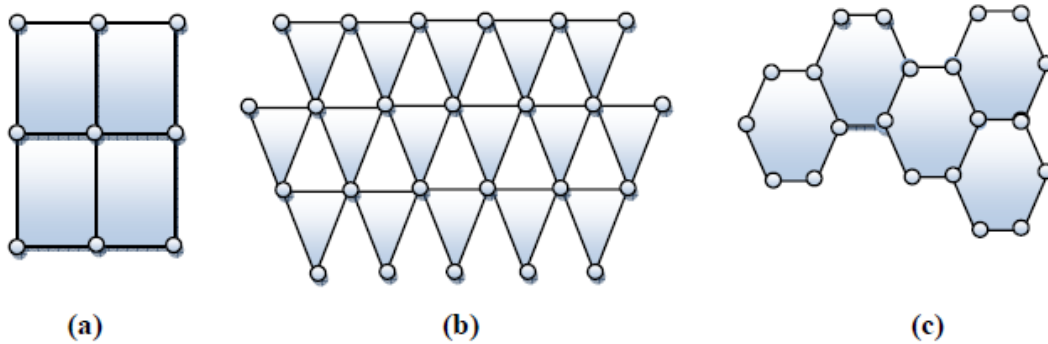
Les structures à cristaux photoniques bidimensionnels 2D sont des matériaux avec une constante diélectrique périodique dans deux directions dans l'espace. Les cristaux photoniques 2D sont composés d'un réseau périodique de tiges diélectriques dans l'air (structure déconnectée) ou de trous d'air percés dans une diélectrique (structure connectée). Un schéma de cette structure est représenté sur la **figure I-6**.



**Figure I- 6** : Cristaux photoniques bidimensionnels (a) connectée, (b) déconnectée.

Les trous ou les tiges diélectriques peuvent être arrangés sur différents types de matériaux, suivant différentes configurations : carré, triangulaire, hexagonale., etc..., comme illustré dans la **figure I-7**, dont dépendent les propriétés dispersives des 2DPhC. Dans notre travail, nous avons traité uniquement le réseau carré de tiges diélectriques dans l'air (structure déconnectée), comme illustré dans la **figure I-6 (b)**.

Afin d'ouvrir des bandes interdites larges, il faut une différence d'indice  $\Delta n$  suffisamment grand. Les réponses optiques de ces structures dépendent de la polarisation, TE (champ E dans le plan de périodicité) et TM (champ H dans le plan de périodicité) [2].

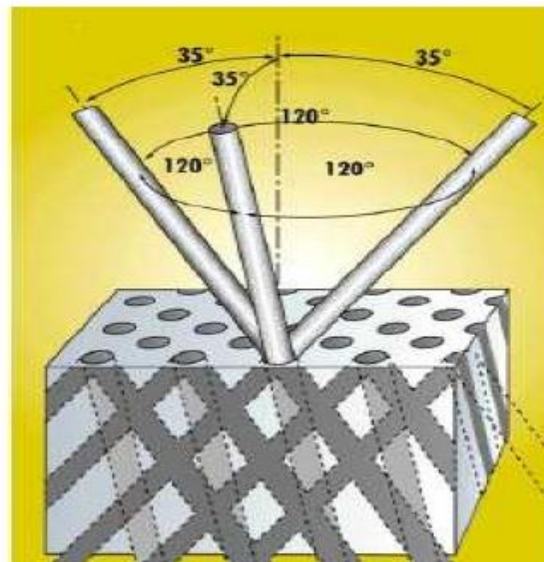


**Figure I-7** : Structure 2D : (a) carrée, (b) triangulaire, (c) hexagonale.

En comparant avec les cristaux photoniques 3DPhC de côté fabrication, 3DPhC posent encore de nombreux problèmes. Pour cette raison, nous nous sommes dirigés vers les cristaux photoniques à deux dimensions 2DPhC qui peuvent être fabriqués facilement. Dans *l'annexe A*, nous expliquons la technique et le processus de fabrication des structures à base de 2DPhC.

### I.3.1.3 Cristaux photoniques tridimensionnels

Les structures à cristaux photoniques tridimensionnels 3D sont des matériaux avec une constante diélectrique, périodique dans les tous les directions de l'espace  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Ces structures ouvrent une bande interdite photonique (BIP) complète dans toutes les directions de l'espace, ce qui contrôle la propagation de la lumière selon toutes les directions (omnidirectionnelle).



**Figure I-8** : Structure 3D “la Yablonoite”.

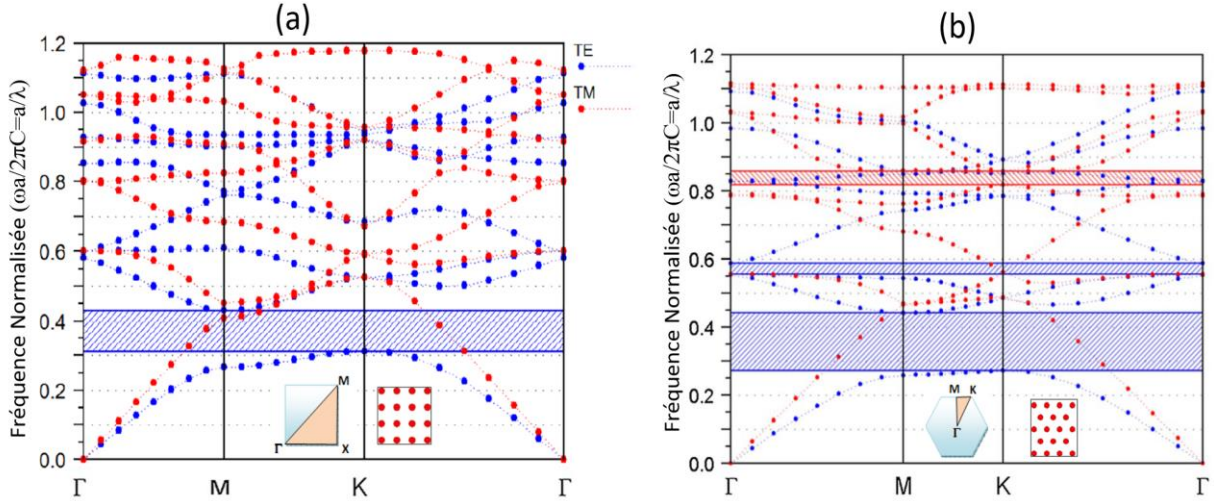
La première structure à cristal photonique tridimensionnel est appelée “ structure la Yablonoite” [6]. Cette structure a été réalisé en 1993 par Yablonoitch en perçant des trous à trois angles azimutaux séparés de  $120^\circ$ , et en créant un angle de  $35^\circ$  par rapport au l'axe vertical,

comme illustré dans la **figure I-8**. Le concept de la bande interdite photonique (BIP) a été démontré expérimentalement pour la première fois.

### I.3.2 Diagramme de bande interdite photonique

Les relations de dispersion des 2DPhC dépendent de la polarisation de la lumière. On peut caractériser le champ électromagnétique en deux modes de polarisations indépendantes, la polarisation TE (transverse électrique) et la polarisation TM (transverse magnétique). En polarisation TE, le champ E est orienté dans le plan de périodicité et le champ H n'a qu'une composante normale au plan. Le champ électromagnétique est ainsi de la forme  $(E_x, E_y, H_z)$ , les autres composantes étant nulles. En polarisation TM, les rôles de E et H sont permutés et le champ est de la forme  $(H_x, H_y, E_z)$ .

La **figure I-9** représente les diagrammes de bandes pour les réseaux carré et triangulaire et pour les deux polarisations en mode TE et TM. La structure carrée à une matrice bidimensionnelle de tiges diélectriques sont caractérisées par un indice de réfraction  $n_{\text{si}}=1.46$  autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  placé dans l'air ( $n_{\text{air}} = 1$ ). Le rayon « r » et la constante de fond « a » sont égale à  $118 \text{ nm}$ ,  $558 \text{ nm}$ , respectivement. Une bande interdite photonique pour la polarisation T'est obtenue pour le réseau carré (**Figure I-9 (a)**) [7].



**Figure I-9** : Diagrammes de bandes des CP2Ds de trous d'air dans une matrice de diélectrique ayant l'indice du silicium, polarisations TE (lignes bleues) et TM lignes(rouges) : (a) réseau carré, (b) réseau triangulaire.

Cependant, le réseau triangulaire présenté dans la **figure I-9 (b)** est caractérisé par un indice de réfraction  $n_{\text{si}}=3,5$  autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  placé dans l'air ( $n_{\text{air}} = 1$ ). Le rayon et la constante de fond sont égale à  $2 \times a \text{ nm}$ ,  $600 \text{ nm}$ , respectivement [8].

Dans le cas d'un réseau carré, une bande interdite photonique (BIP) est observée dans la plage de fréquences normalisée de  $0,31 < a/\lambda < 0,43$  pour la polarisation en mode TE. En mode TM, aucune bande interdite n'apparaît. Cependant le réseau triangulaire présente des bandes interdites en mode TE se situent dans la plage de fréquences normalisée de  $0,555 < a/\lambda < 0,589$  et  $0,271 < a/\lambda < 0,441$ , et la bande interdite en mode TM est dans la plage de fréquences normalisée de  $0,818 < a/\lambda < 0,857$ .

En effet, une large bande interdite BIP est obtenu avec un réseau carré de trous d'air dans un diélectrique en polarisation TE et couvre la deuxième fenêtre de transmission optique autour de  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ , et c'est celui que nous allons utiliser dans cette thèse.

### **I.3.3 Méthodes de modélisation utilisée pour simuler les 2DPhC**

Récemment, plusieurs méthodes ont été développées pour étudier les structures à bande interdite photonique (BIP) à PhC, elles peuvent être classées suivant le domaine dans lequel elles opèrent, fréquentiel ou temporel. Dans le domaine fréquentiel, on peut citer la méthode de décomposition en ondes planes (PWEM : « Plane-Wave Expansion Method » *Eng*), et la méthode des éléments finis (FEM). La méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD : « Finite-Difference Time-Domain »).

Notons que dans cette thèse, les résultats de simulations exposés, tel que le calcul de structure de bandes photoniques et la propagation des ondes électromagnétiques à l'intérieur des structures à cristaux photoniques seront obtenus à base des calculs des méthodes PWEM et FEM, réalisés à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysique.

#### **I.3.3.1 Méthode de décomposition en onde plane PWEM**

La technique de décomposition en ondes planes (Plane Wave Expansion Method, PWEM), consiste à résoudre, dans le domaine fréquentiel, l'équation d'onde linéaire en développant le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes. C'est une méthode efficace pour calculer les diagrammes de dispersion à partir des équations de dispersion des ondes électromagnétiques afin d'extraire les bandes interdites photoniques que nous utiliserons pour décrire les propriétés générales de la structure 2DPhC.

Cette méthode est bien adaptée à l'étude de cristaux photoniques infiniment périodiques, elle a été utilisée par plusieurs auteurs pour la détermination de la bande interdite photonique (BIP) des structures photoniques bidimensionnelles.

Elle permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique [2]. Cependant, elle reste inadaptée pour l'étude des structures complexes.

### **I.3.3.2 Méthode des éléments finis FEM :**

La plupart des méthodes d'éléments finis utilisent des techniques variationnelles formulées à partir des équations de Maxwell. Ces techniques consistent à minimiser ou maximiser une expression qui est connue pour être stationnaire autour de la solution.

La méthode des éléments finis FEM recherche l'expression des champs électriques en minimisant la fonction d'énergie. Les champs magnétiques pourront être obtenus à partir des champs électriques ainsi calculés. Un du grand avantage de cette technique par rapport aux autres techniques numériques est que les propriétés électriques et géométriques de chaque élément peuvent être définies indépendamment les unes des autres. Cela peut se traduire par un maillage différent entre une partie du système où la géométrie est plus complexe et le reste de l'espace à analyser.

Une des premières étapes dans les méthodes FEM consiste au maillage de la structure ; c'est-à-dire à la division de l'espace de travail en petits éléments. La taille des éléments ainsi découpés est fonction du détail de la géométrie de la structure. Pour chaque élément fini, une simple loi de variation de champ est exprimée. Le but de l'analyse consiste à calculer le champ aux différents nœuds (coins de chaque élément découpé).

### **I.3.4 Défauts dans les Cristaux photoniques 2DPhC**

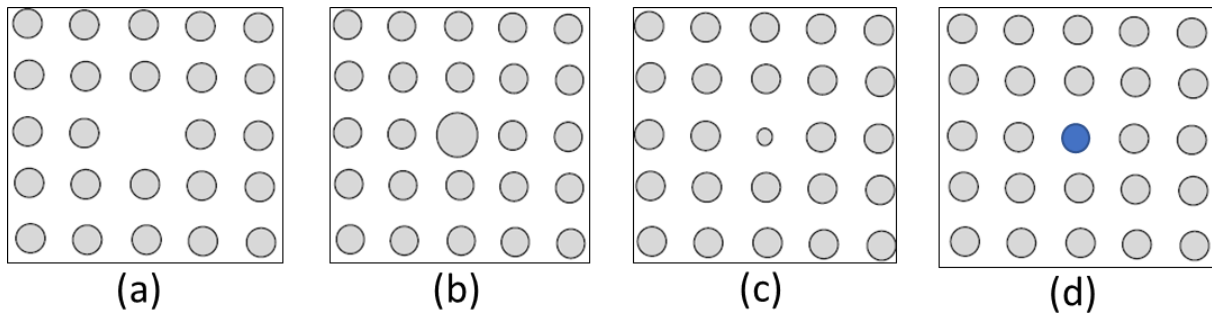
La propriété principale des structures 2DPhC était l'existence de la bande interdite photonique (BIP) dans laquelle la lumière ne peut se propager dans la structure photonique.

La création de défauts dans la périodicité dans la structure cristal permet de donner des longueurs d'ondes ou des fréquences de propagation permises, appelées modes de défauts, dans la bande interdite photonique (BIP). Ces défauts sont associés à une rupture locale de la périodicité du cristal.

Dans les cristaux photoniques 2DPhC, On distingue deux types de défauts, les défauts ponctuels (cavités) et les défauts linéaires (guides d'ondes). La **figure I-10** et **figure I-11** montrent les deux types de défauts.

### I.3.4.1 Les défauts ponctuels (cavités)

Dans les cristaux photoniques 2DPhC, il existe de nombreuses façons de créer des défauts ponctuels. Il est également possible de retirer, d'ajouter ou de modifier l'indice de réfraction d'une ou plusieurs tiges de la structure (**Figure I-10**). Plus généralement, on peut modifier le rayon de la tige ou du trou afin de modifier les caractéristiques du diagramme de bandes. Ainsi, il est possible d'observer un mode de défaut localisé dans la bande interdite photonique.



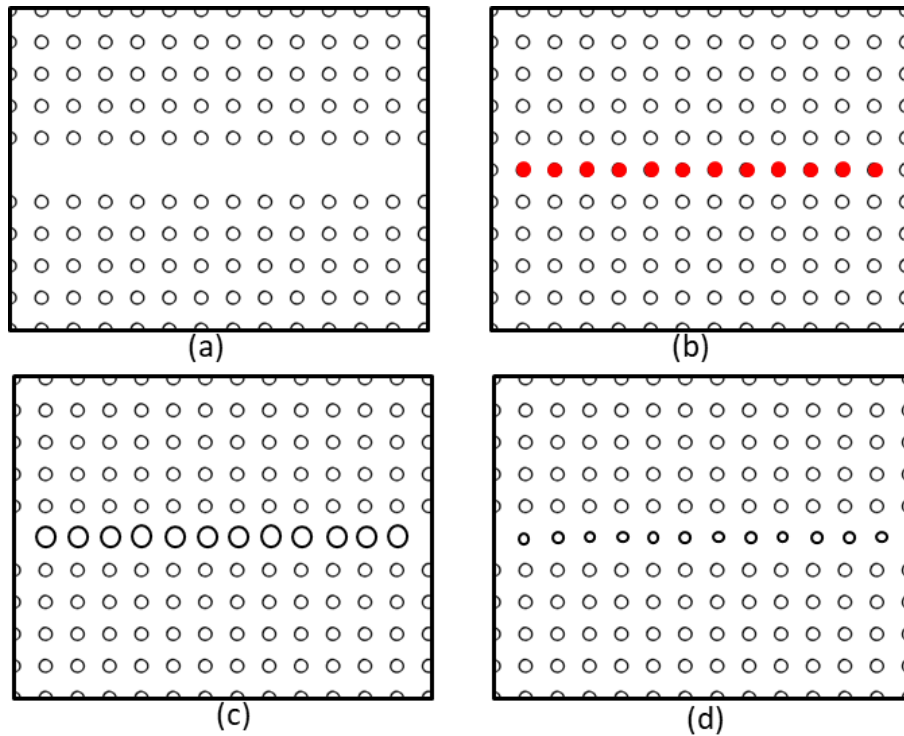
**Figure I-10** : Défauts ponctuels : (a) Défaut lacunaire, (b) et (c) Défauts de substitutions, (d) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule tige.

### I.3.4.2 Les défauts linéaires (Guides d'ondes)

En introduisant un défaut linéaire (enlever/modifier d'une ou plusieurs rangées de tiges diélectriques ou de trous), il est possible de guider la lumière selon une direction choisie. La lumière va se propager le long de ce guide avec une fréquence appartenant à la bande interdite photonique du cristal (BIP) (**Figure I-12**).

Les différents types de défauts linéaires cité ci-dessous :

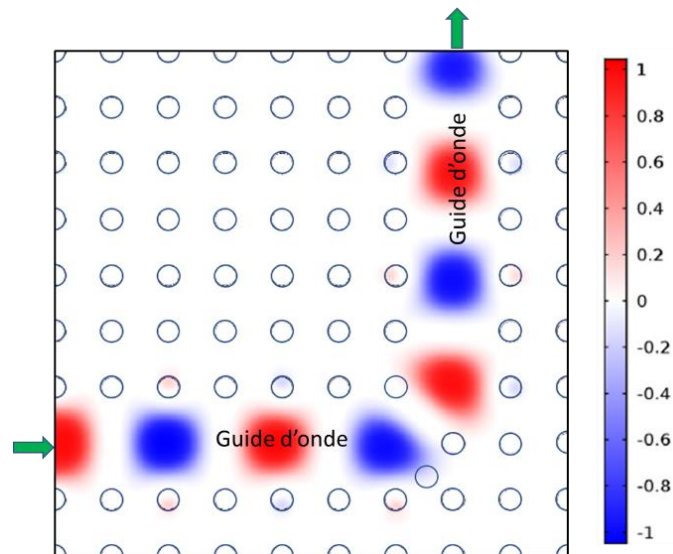
- ✓ Elimination des tiges diélectriques/trous et remplacés par la permittivité du substrat (**Figure I. 11 (a)**). Ce type de défaut est le plus utilisé.
- ✓ Modification de l'indice de réfraction d'une seule rangée des tiges diélectriques/ trous (**Figure I. 11 (b)**). Ce type est utilisé dans les structures non linéaires.
- ✓ Variation le rayon des tiges diélectriques/trous composant le cristal photonique (**Figure I. 11 (c) et (d)**). Ce type est utilisé dans les structures linéaires.



**Figure I-11** : Défauts linéaires dans un cristal photonique 2D : (a) en enlevant une seule rangée, (b) en modifiant l'indice de réfraction d'une seule rangée, (c) et (d) en variant le rayon d'une seule rangée de la structure.

L'onde électromagnétique se propage dans le diélectrique d'indice fort et se réfléchit totalement sur les parois qui sont constitués (**Figure I-12**). Le fait de recourber l'un de ces guides sur lui-même permet d'obtenir un anneau et seuls quelques modes peuvent rester dans cet anneau.

Le phénomène de guidage dans la structure 2DPhC est bien illustré sur la **figure I-12**.



**Figure I-12** : Illustration de la propagation du champ dans un cristal 2DPhC de forme d'un virage de  $90^\circ$  à défaut linéaire.

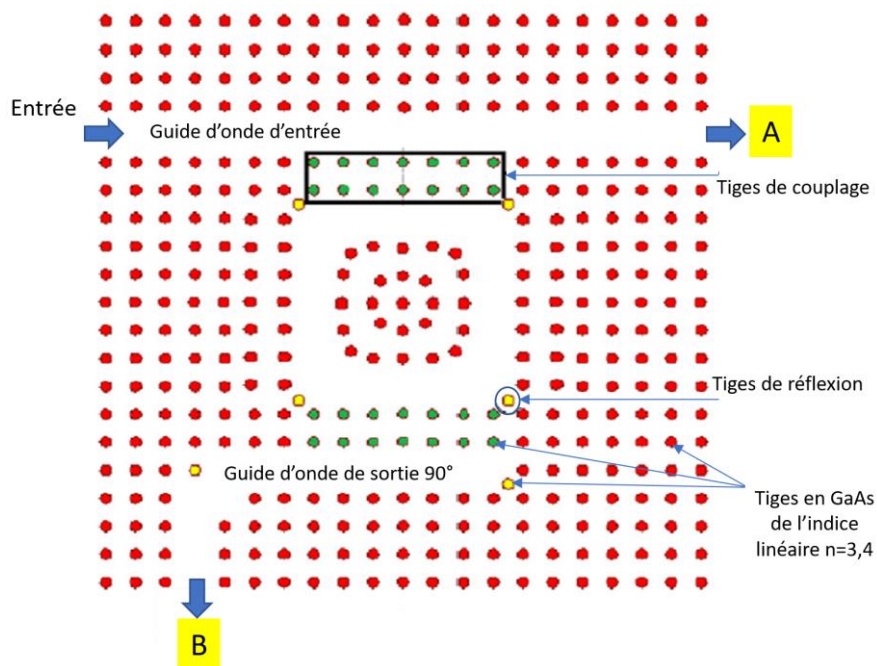
### I.3.5 Résonateur en anneau à 2DPhC

Un résonateur en anneau est un dispositif dans lequel certains rayons lumineux sont susceptibles de rester confinés grâce à des miroirs sur lesquels ils se réfléchissent. Il est construit d'un ensemble de guides d'ondes dans lequel au moins l'un est une boucle fermée couplée à une sorte d'entrée et de sortie de lumière (**Figure I-13**). Ce type de dispositif a plusieurs résonances ce qui le rend très utile pour filtrer différentes longueurs d'ondes.

Suivant le mode de fonctionnement, on distingue deux types de résonateurs optiques, qui sont les résonateurs à modes linéaire et non linéaire.

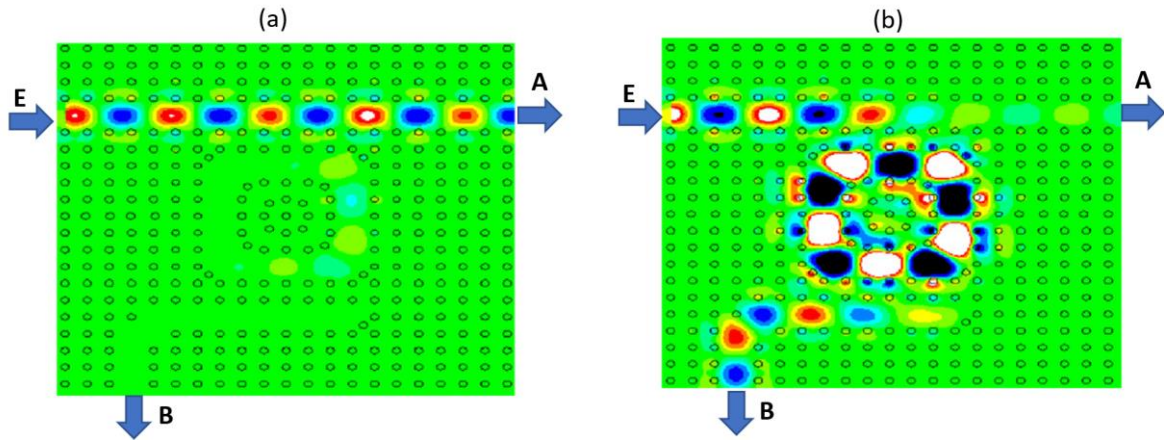
#### I.3.5.1 Résonateur en anneau à 2DPhC en mode linéaire

Un résonateur en anneau à est obtenu en supprimant une forme carrée de tiges diélectriques d'une structure déconnectée 2DPhC (**Figure I-13**). Le résonateur en anneau linéaire est construit par des tiges diélectriques de matériel linéaire en (GaAs) de l'indice de réfraction  $n=3.4$ , et le rayon  $r = 0,2 \times a$ , où « a » est la constante de fond de réseau [9].



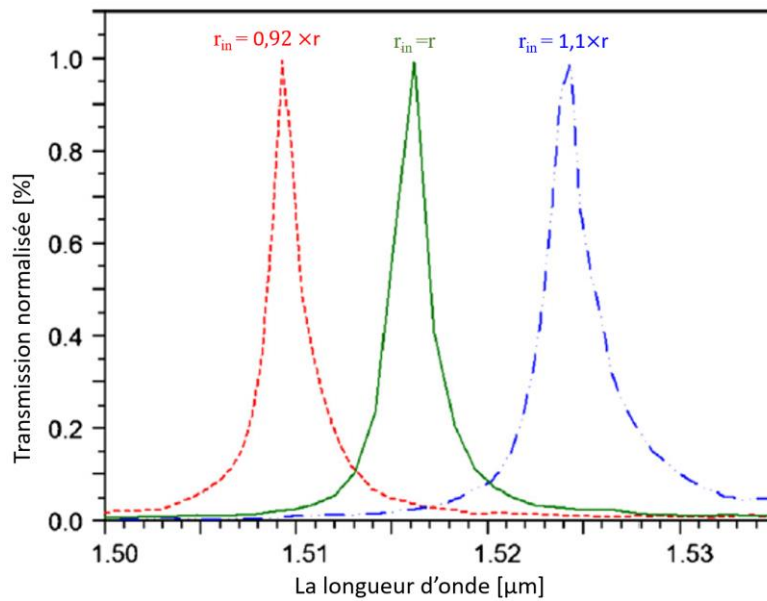
**Figure I-13** : Résonateur en anneau à 2DPhC en mode linéaire.

Les **figures I-14** (a) et (b) montrent la distribution de champ électrique de de résonateur en anneau pour deux longueurs d'onde différentes, 1500 nm, 1516,2 nm avec le rayon des tiges de réflexion  $r_{in} = r$ .



**Figure I-14** : Le champ électrique dans le résonateur en anneau, (a)1500 nm, (b)1516,2 nm.

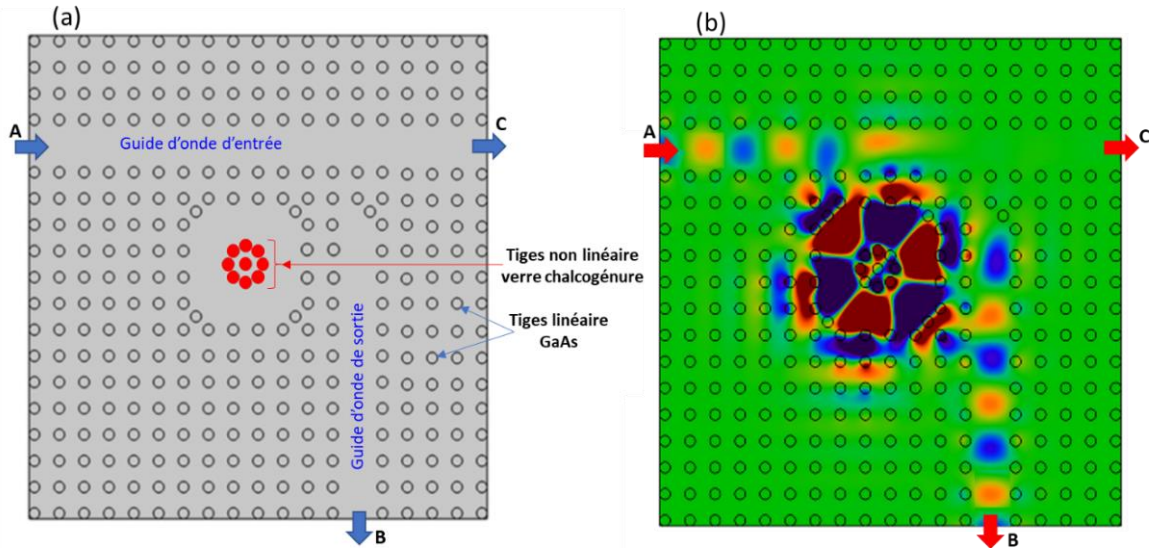
Pour obtenir une longueur d'onde de résonance adaptée autour de 1,55  $\mu\text{m}$ , on peut varier le rayon des tiges de réflexion «  $r_{\text{in}}$  ». La **figure I-15** montre le déplacement de la longueur d'onde de résonance vers des valeurs plus élevées.



**Figure I-15** : Transmission normalisée de résonateur linéaire pour different rayon  $r_{\text{in}}$ .

### I.3.5.2 Résonateur en anneau à 2DPhC en mode non-linéaire

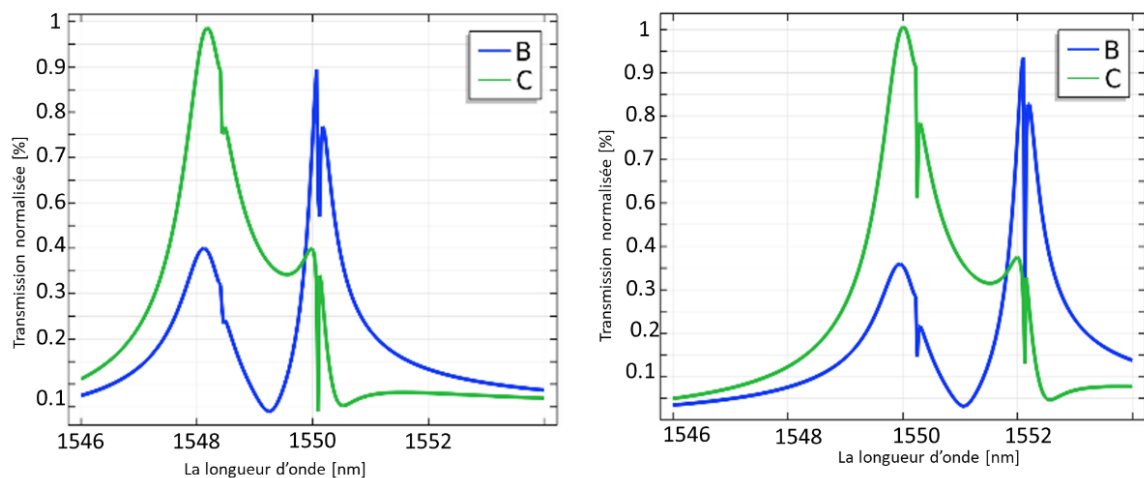
Le résonateur en anneau non-linéaire proposé est une structure déconnectée à base de 2DPhC constituée de tiges diélectriques en GaAs linéaire possédant un indice de réfraction linéaire égal à 3,37, et des tiges de verre chalcogénure avec un indice de réfraction non linéaire  $n$  dépend de l'intensité d'excitation tel que : " $n = n_1 + n_2 I$ ", tel que,  $n_1 = 3.1$  et le coefficient de Kerr non linéaire de  $n_2 = 9 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{w}$  (Voir la section I.2.1.2).



**Figure I-16** : Résonateur en anneau à 2DPhC en mode non linéaire (b), et (a) la longueur d'onde de résonance à 1,55  $\mu\text{m}$ .

La structure du résonateur est obtenue en couplant deux guides d'onde (guide d'onde d'entrée et sortie) avec le centre de résonateur sous forme d'un cercle (les tiges rouge). La **figure I-16 (a)** montre le résonateur en anneau à 2DPhC en mode non linéaire [10].

Lorsque le résonateur en anneau à 2DPhC est excité du port « A » avec l'intensité du signal d'entée est égale à  $I_0=0.5 \text{ Kw}/\mu\text{m}^2$ , nous avons obtenu la longueur d'onde de résonance de 1,55  $\mu\text{m}$  au port B (toute l'énergie est transmise vers le port B, et l'énergie au port C est nulle) (voir la **figure I-16 (b)**). Quand l'intensité du signal d'entrée est augmentée  $2 \times I_0= 1 \text{ Kw}/\mu\text{m}^2$  et en raison de l'effet Kerr non-linéaire (modification l'indice de réfraction des tiges rouge), à la longueur d'onde de résonance 1,55  $\mu\text{m}$  de résonateur en anneau à 2DPhC, l'énergie ne se couple pas au guide d'ondes de sortie et elle se propage vers le port C.



**Figure I-17** : Transmission normalisée de résonateur non linéaire (1,55  $\mu\text{m}$ ) pour (a)  $I_0$ , (b)  $2 \times I_0$ .

Les courbes de transmission normalisées de résonateur non linéaire de longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$  pour l'intensité  $I_0$ , et  $2 \times I_0$  sont représentées sur la **figure I-17**.

### I.3.6 Paramètres d'évaluation les structures à base de 2DPhC

Plusieurs structures à base des cristaux photoniques 2DPhC ont été étudiées tel que, multiplexeur, les portes logiques, demi-additionneur, additionneur complet, filtres. L'évaluation les performances de ces structures est basée sur les paramètres de fonctionnement suivants [11] :

**Puissance normalisée :** La puissance normalisée est définie comme le rapport de la puissance de sortie à la puissance d'entrée donnée par la formule suivante.

$$P [\%] = P_s / P_e \quad (\text{I.21})$$

Où :  $P_e$ ,  $P_s$  : les puissances d'entrée, de sortie.

**Rapport de contraste :** Le rapport de contraste (CR) est un paramètre utilisé pour évaluer les structures à cristaux photoniques. Le rapport est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{CR} = 10 \cdot \log[M_1/M_0], \text{ CR est mesuré en dB.} \quad (\text{I.22})$$

Où :  $M_1$  et  $M_0$  sont le minimum et le maximum puissance normalisée aux ports de sortie de l'état logique 1 et 0, respectivement.

**Temp de réponse :** C'est le temps pendant lequel une puissance d'émission comprise entre 0 et 90% est générée à la quantité moyenne de la puissance de sortie.

Il se calcule entre deux valeurs  $t_{11}$  et  $t_{12}$  [12]:

- $t_{11}$  le délai de transmission requis par la structure de 0 à 10% de  $P_{\text{moy}}$ .
- $t_{12}$  le temp nécessaire entre 0 et 90% de  $P_{\text{moy}}$ .

T : le temp de réponse s'exprime en [ps] : picoseconde sera déterminé selon l'équation :

$$T = (t_{11} - t_{12}) \times 2 \quad (\text{I.23})$$

**Débit binaire :** Le débit binaire ( $B_t$ ) : quantité de transmission des données par unité de temp. Le débit binaire est calculé par la formule suivante :

$$B_t = 1/T \quad (\text{I.24})$$

Où : T le temp de réponse.  $B_t$  s'exprime en bit par second (or Tbps : Térabit par second).

**Taille de la structure :** (*footprint*), est la surface de la structure, calculée à partir de réseau 2DPhC suivant les dimensions de l'axe X et l'axe Z. La taille s'exprime en [ $\mu\text{m}^2$ ].

**Pertes d'insertion** (*Insertion loss*) : l'atténuation de puissance de signal exprimée en décibels.

$$I_l = 10 \times \log\left(\frac{P_e - P_s}{P_e}\right), \quad I_l \text{ s'exprime en [dB]} \quad (\text{I.25})$$

**Diaphonie maximale** (*maximum cross talk*) : la diaphonie c'est l'interférence de signal d'un canal avec d'autre signal, c'est un paramètre important pour la conception les multiplexeur et démultiplexeur (MUX/ DEMUX) à 2DPhC, [13], une petite puissance influence les autres canaux voisins. Diaphonie maximale est calculé par la formule :

$$Dm = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{low}}{P_{high}}\right), \quad Dm \text{ s'exprime en [dB]} \quad (\text{I.26})$$

**Facteur de qualité** : le facteur de qualité défini comme le rapport de la longueur de résonance à la largeur de la bande de résonnante. Le facteur de qualité (Q une mesure sans unité) donné par la formule :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda} \quad (\text{I.27})$$

$\Delta\lambda$  : représente la FWHM c-à-d la largeur de la bande à mi-hauteur.

$\lambda_r$  : la longueur d'onde de résonance.

Ce paramètre est utilisé pour évaluer les filtres à 2DPhC [14].

Tous ces paramètres dépendent le domaine (temporel ou fréquentiel) et les méthodes de modélisation.

Le choix des paramètres d'évaluation est lié au type d'application de la structure 2DPhC. Dans cette thèse, le logiciel COMSOL Multiphysics a été utilisé, qui est basé sur la méthode des éléments finis FEM dans le domaine fréquentiel. Les paramètres tels que, la puissance normalisée, le rapport de contraste, et la taille de la structure ont été choisis pour évaluer les structures d'additionneur 2DPhC proposées.

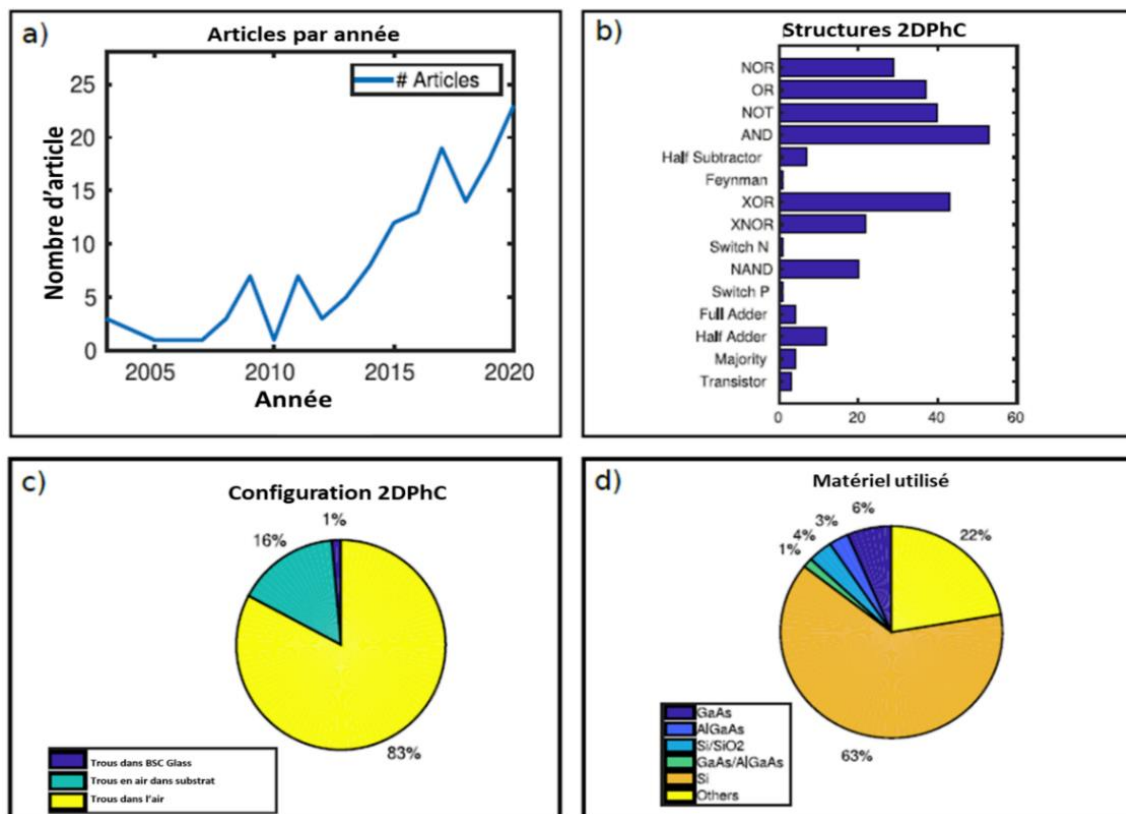
### I.3.7 Statistique des structures à des cristaux photoniques

Dans l'ensemble, le développement des structures à cristaux photoniques PhC a retenu l'attention ces dernières années en raison de l'importance de l'utilisation dans le future pour les systèmes de communication toute optique et informatique. Comme illustré dans la **figure I-18**, « 139 articles » sur les cristaux photoniques publiés dans les revues IEEE, IET, AIP, OSA, Elsevier, PIO, Springer ont été évalués [15].

On constate clairement l'augmentation des articles publiés chaque année (**Figure I-18 (a)**). Une large application des cristaux photoniques pour réaliser des circuits à base des portes logiques, comme montré sur la **figure I-18 (b)**.

D'un autre côté, la **figure I-18 (c)** illustre la conception des structures sur un réseau PhC composés d'un réseau périodique de tiges diélectriques dans l'air (structure déconnectée) et des trous d'air percés dans une substrat (structure connectée) à 83% et 16%, respectivement. Cela peut expliquer le faible taux de réussite des essais expérimentaux (3 %), car les structures connectées restent un défi dans le processus de fabrication.

Enfin, nous avons constaté que les matériaux employés sont les plus courants dans la technologie photonique intégrée, tels que Si, GaAs, SiO<sub>2</sub>, AlGaAs, InP, Ag-Polymer, Lithium Verre niobate, germanio et chalcogénure, comme illustré dans la **figure I-18 (d)**.



**Figure I-18** : Statistiques des travaux publiés sur 2DPhC (a) articles par année, (b) nombres des structures 2DPhC, (c) configuration 2DPhC, et (d) matériel utilisé dans la conception.

Un autre exemple, les articles scientifiques publiés uniquement dans les revues Elsevier sur les structures basées sur PhC sont représentées par le graphe de la **figure I-19** [16]. On constate que le nombre des publications est augmenté de 1988 à 2021.

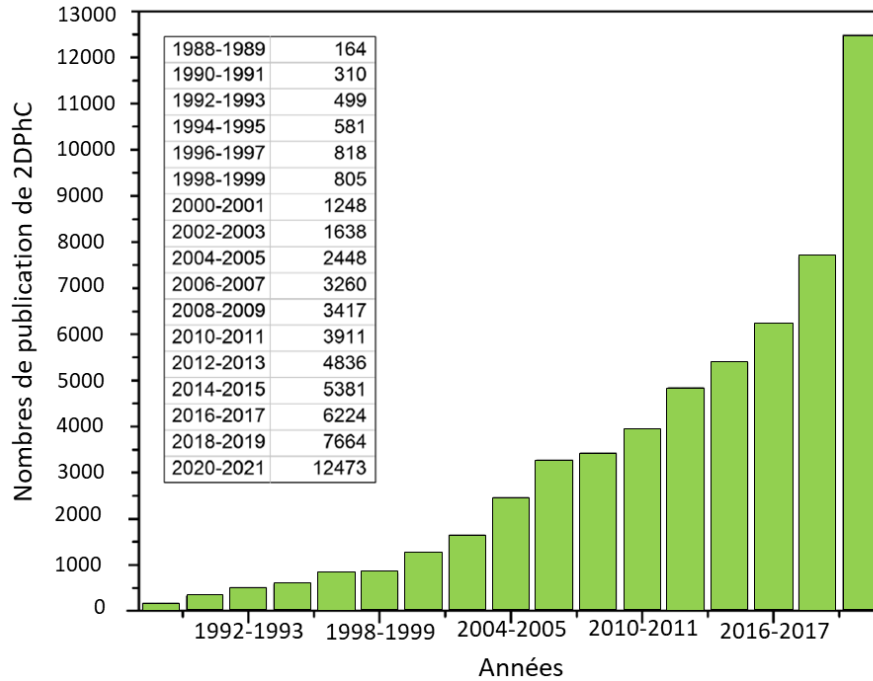


Figure I-19 : Nombre des articles publiés sur 2DPhC entre 1988-2021.

## I.4 Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre une partie sur l'optique non linéaire, en particulier, les propriétés d'interactions non-linéaires du deuxième et troisième ordre. Dans le cas des matériaux isotropes centro-symétriques, la non linéarité du second ordre n'existait pas, et le troisième ordre correspond dans ce cas au premier effet non-linéaire observable. Nous avons démontré l'effet kerr, la dépendance de l'indice de réfraction des matériaux non linéaire avec l'intensité optique. Cet effet présente un grand intérêt en termes d'applications et permet de contrôler la lumière par la lumière.

Nous avons présenté aussi une partie sur les cristaux photonique les concepts de base liés aux cristaux photoniques (PhCs). Après, nous passons à présenter le résonateur en anneau, en particulier, le résonateur en anneau 2DPhC non linéaire basé sur l'effet kerr. Notre but est la conception de dispositifs tout optiques dans les PhCs et principalement pour les additionneurs tout-optique qui font l'objet de travail dans cette thèse.

Une revue de littérature scientifique sur les additionneurs tout optique à base de 2DPhC constitue le centre d'intérêt du chapitre suivant de cette thèse où il s'agit d'analyser et évaluer plusieurs articles afin à rendre compte de l'état de l'art de notre travail.

## Bibliographie

1. Stefan Wabnitz, Benjamin J. Eggleton, "All Optical Signal Processing", volume 194 2015,
2. OUAHAB Iman, Contribution à la conception des Switches tout optique dans les cristaux photoniques non linéaires, these de doctorat 2017.
3. Hasnaa El Ouazzani, "Propriétés optiques non linéaires du deuxième et troisième ordre de nouveaux systèmes organiques conjugués de type push-pull", Thèse de doctorat (2012).
4. Richard S. Quimby "Photonics and Lasers An Introduction", Print ISBN:9780471719748,
5. Abri Badaoui Hadjira, "Etude et conception des micro composants a base des cristaux photoniques bidimensionnels, These de doctorat, Décembre 2012.
6. Yablonovitch, «Photonic band-gap structures, » Optical Society of America. B, vol. 10, n° 12, pp. 283-295, 1993.
7. Mahesh V Sonth, Savita Soma, Sanjay kumar C Gowre, Investigation of light behavior of all optical full adders in two dimensional photonic crystals, microwave and optical technology letters, July 2020.
8. Saadi, K., Kashaninia, A. & Sabbaghi-Nadooshan, R. All-optical half adder based on triangular lattice photonic crystals with uniform structural parameters. Photon Netw Commun 43, 204–211 (2022).
9. Rakhshani, M. R. and Mansouri-Birjandi, M. A., "Realization of tunable optical filter by photonic crystal ring resonators", Optik, vol. 124, no. 22, pp. 5377–5380, 2013.
10. Bachir, R., Hadjira, B. & Mehadji, A. Design of a 8-channel demultiplexer with ultra highly quality factor and low crosstalk for DWDM applications. Opt Quant Electron 53, 363 (2021).
11. Prabha, K.R., Kavitha, V., Robinson, S. et al. Two-dimensional photonic crystal-based half adder: a review. J Opt 51, 415–436 (2022).
12. Mahesh V; Srikanth, G; Agrawal, Pankaj; Premalatha, B. "Basic Logic Gates in Two Dimensional Photonic Crystals for All Optical Device Design", International Journal of Electronics and Telecommunications; Warsaw Vol. 67, N° 2, (2021): 247-253.
13. Moungar, A., Badaoui, H., Abri, M.: 16-channels wavelength efficient demultiplexing around 131/155 m in 2D photonic crystal slab. Optik, Int. J. Light and Electr. Opt. 193, 162685 (2019).
14. Lila Mokhtari, Hadjira Abri Badaoui, Mehadji Abri, Moungar Abdelbasset, Farah Lallam, and Bachir Rahmi, "Proposal of a New Efficient OR/XOR Logic Gates and All-Optical

Nonlinear Switch in 2D Photonic Crystal Lattices," Progress In Electromagnetics Research C, Vol. 106, 187-197, 2020.

15. Luis E. Pedraza Caballero and Omar P. Vilela Neto, A Review on Photonic Crystal Logic Gates, Journal of Integrated Circuits and Systems, vol. 16, n. 1, 2021.
16. Biswas, Uttara N, Jayanta K, Fabrication techniques and applications of two-dimensional photonic crystal: history and the present status, Optical Engineering, Volume: 62, Issue: 1, Dec 23, 2022.

# Chapitre II :

**Revue de littérature sur les techniques de conception  
des additionneurs tout optiques à base 2DPhCs**

## II.1 Introduction

Comme nous avons vu dans le chapitre précédemment, les dernières années, la recherche scientifique du domaine des cristaux photoniques s'intéresse beaucoup sur le développement des circuits logiques à cristaux photoniques tels que, les portes logiques, soustracteurs, commutateurs, et les additionneurs.

Dans ce chapitre nous montrons, les techniques de conception des structures à base 2DPhC tels que, la technique des interférences constructive et destructive, auto-collimation, résonateurs et cavités à effet kerr. Ensuite, nous présentons une étude bibliographique de tous les additionneurs optiques à base de 2DPhC réalisés par plusieurs chercheurs, certains auteurs ont étudié des additionneurs dans le domaine linéaire. D'autre auteurs ont utilisé les résonateurs et cavités dans le domaine non linéaire. Après, nous effectuons une synthèse bibliographique sur les additionneurs à base de 2DPhC, et leurs méthodes de conception, afin de définir les étapes de travail et d'atteindre les objectifs de la thèse.

## II.2 Principes et techniques de conception des structures à base des cristaux photoniques bidimensionnels

Les méthodes de conception des dispositifs toute optique à base des cristaux photoniques sont divisées en quatre grandes catégories : à base des interférences, à base d'auto-collimation, à base de résonateur en anneau et cavité à effet kerr non linéaire, et à base de graphène.

### II.2.1 Structures cristaux photoniques à base des interférences

Selon la théorie de l'optique ondulatoire, le phénomène d'interférences résulte de la superposition de deux ondes optiques, on distingue deux interférences (**Figure II-1**) :

- Constructives : Lorsque les deux ondes optiques de même fréquence (synchrones) et de différence de phase entre les deux est égale à  $2n\pi$  (déphasage constant), où  $n = 0, 1, 2, \dots$ ). L'onde résultante a une amplitude maximale (où supérieur de l'onde initial).
- Destructives : Les ondes optiques de même fréquence (synchrones) en opposition de phase (Différence de phase est égale à  $(2n+1)\pi$ ). L'onde résultante a une amplitude minimale où nulle.

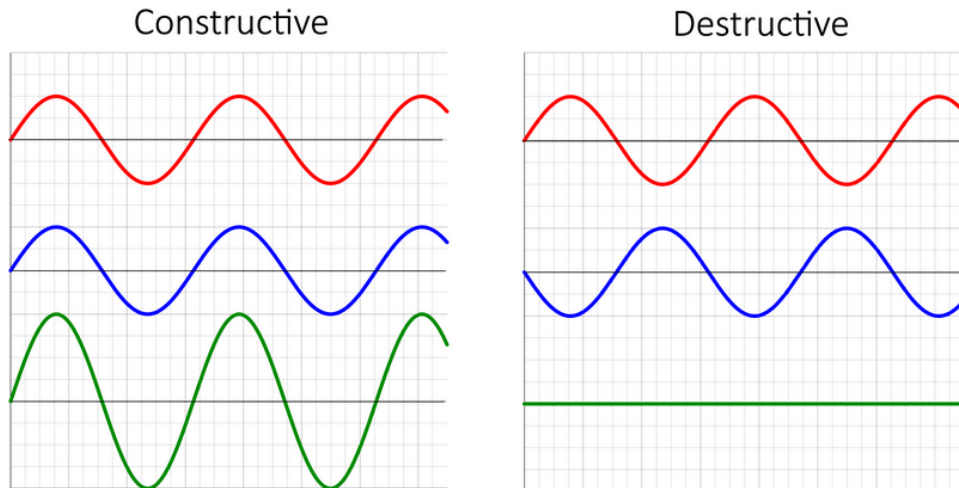


Figure II-1 : Les interférences constructives et destructives.

Plusieurs structures ont été étudiées et publiées à base de la technique des interférences tels que, les portes logiques [1], décodeur [2], additionneur [23-28].

### II.2.2 Structures cristaux photoniques à base d'auto-collimation

La deuxième technique que l'on retrouve dans la littérature est la topologie d'auto-collimation. L'opération dépend de l'incident de lumière dans une onde plane qui peut se propager la longue direction à travers une structure en utilisant le phénomène total interne de réflexion (TIR). Le (TIR) se produit lorsque l'angle de l'incidence est supérieur à l'angle critique.

L'auto-collimation se produit par le changement de rayon des tiges et constante de réseau de fond de la structure Crystal photonique. Plusieurs structures ont été étudiées et publiées à base de l'auto-collimation tel que, les portes logiques [3], soustracteurs [4], diviseur de puissance [5], additionneur [29-30].

### II.2.3 Structures cristaux photoniques à base de résonance (à effet de Kerr)

Les structures toutes optiques à cristaux photonique peuvent être réalisées en utilisant les cavités résonantes et les résonateurs en anneaux. Cette technique est basée sur des matériaux à effet de Kerr non linéaires. Les matériaux non linéaires sont caractérisés par un indice de réfraction dépend de l'intensité de puissance d'entrée suivant la relation  $n = n_0 + n_2 \times I$ , où  $n_0$  est l'indice de réfraction linéaire,  $n_2$  est le coefficient non linéaire de Kerr et  $I$  est l'intensité lumineuse. Plusieurs structures ont été étudiées et publiées à base de résonance tel que, portes logiques [6-7], comparateur [9], convertisseur analogique numérique [10], encodeur [11],

décodeur [8], démultiplexeur [12] [17], multiplicateur [13], filtre/diviseur de puissance [14], soustracteur [15-16], additionneur [31-41].

#### **II.2.4 Structures cristaux photoniques à base de graphène**

Des structures à cristaux photoniques ont été développées à base de graphène. Le graphène est un matériel à des propriétés très attractives et uniques. Il est caractérisé par une conductivité électrique élevée, une accordabilité électro-optique, flexibilité mécanique, dureté et résistance élevées, efficacité de transmission optique élevée, bande interdite nulle (ZBG) et électrons libres existants sous zéro condition de dopage. Toutes ces caractéristiques aboutissent à ces matériaux 2D devenir des matériaux appropriés pour fabriquer des composants et dispositifs optoélectroniques intégrées hautement accordables [].

Selon la flexibilité des électrons de la feuille de graphène, la génération de certains niveaux de bande d'énergie de Fermi ( $E_f$ ) peut être obtenu dans la couche de graphène par plusieurs méthodes telles que l'ajout substrat et polarisation de la tension de grille entre le substrat et la couche de graphène. Ces méthodes nous permettent de modifier les propriétés optiques de graphène et paramètres de fonctionnement des dispositifs optoélectroniques à base de graphène, tels que la longueur d'onde de résonance centrale et la qualité facteur.

En pratique, des groupes de recherche ont proposé d'intégrer du graphène sur des substrats isolants de Si et SiO<sub>2</sub>.

Pour les dispositifs à cristaux photoniques à base de Graphène, la fréquence ou la longueur d'onde de résonance est contrôlée électriquement et dépend du potentiel chimique du graphène. Plusieurs structures ont été étudiées et publiées à base de Graphène tel que, comparateur [18], décodeur [19], capteur [20], filtre [21], demi additionneur/ soustracteur [22], additionneur [42].

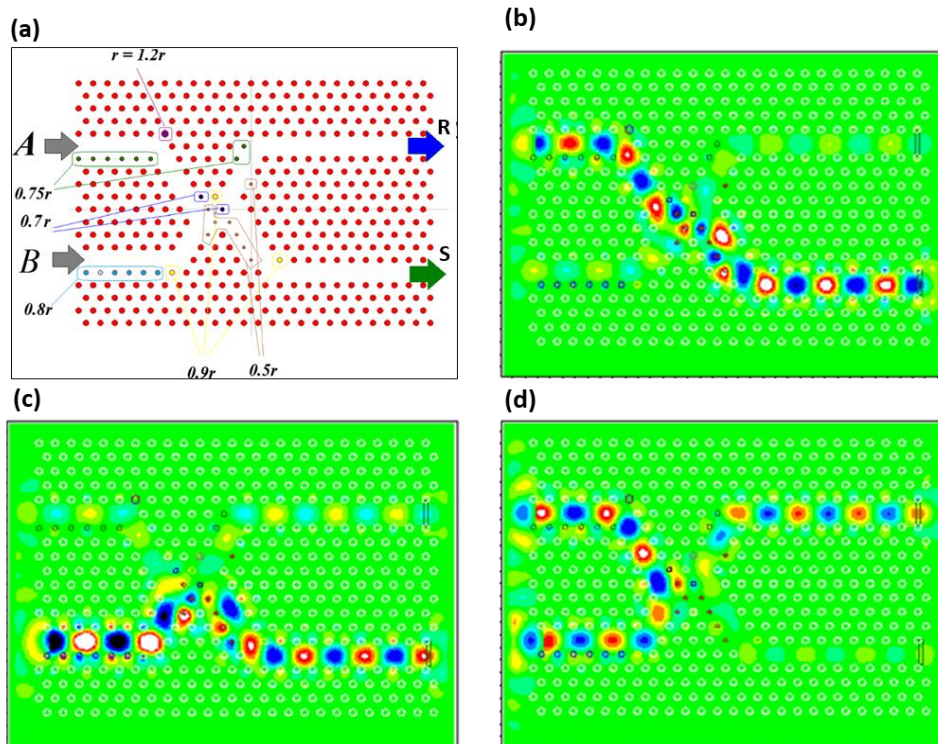
#### **II.3 Additionneurs à base des cristaux photoniques : Revue de littérature.**

Les cristaux photoniques 2DPhC ont été beaucoup développées en raison de ses capacités à moduler la lumière. Plusieurs structures toutes optiques, y compris les additionneurs ont été reportés dans littérature. Les additionneurs tout optiques à base des cristaux photoniques présentés dans cette section sont classés suivant la méthode de conception en quatre catégories : à base des interférences, à base d'auto-collimation, à base de résonance (à effet Kerr), et à base de graphène.

### II.3.1 Additionneur tout optique à base des interférences

Les additionneurs basés sur cette technique en utilisant le phénomène d'interférence par le contrôle les signaux d'entrée. Dans cette section nous présentons des exemples des additionneurs tout optique à effet des interférences.

M. Mohamad Abdollahi et al [24] ont conçu un demi-additionneur basé sur le principe d'interférence de faisceaux, la structure est constituée par un réseau PhC 2D hexagonal de  $25 \times 20$  de tiges diélectriques de silicium dans l'aire. Constante de réseau ( $a$ ) et le rayon ( $r$ ) des tiges ont été sélectionnées à 640 nm et 128 nm, respectivement.

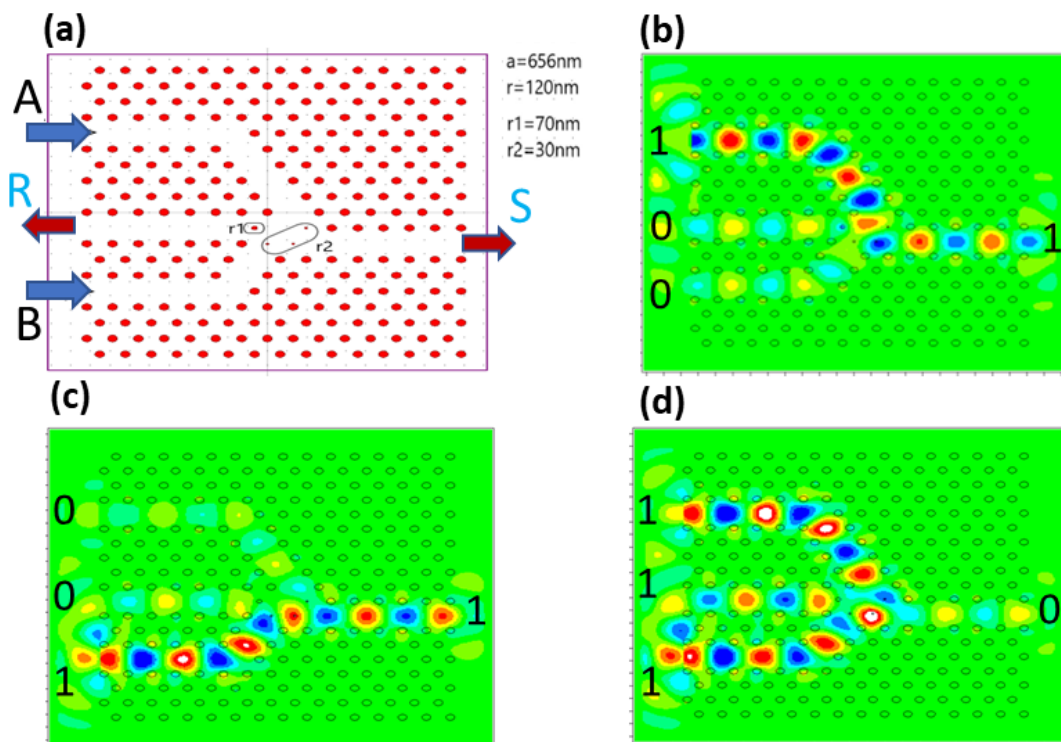


**Figure II-2** : Demi additionneur proposé par M. Mohamad Abdollahi et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11.

Cette conception est également basée sur l'effet d'interférences. Pour créer la différence de phase, quelques tiges ont été optimisées par la variation de rayons, dans la jonction ( $0.7 \times r, 0.9 \times r, 0.5 \times r$ ), tiges de pliage ( $1.2 \times r, 0.9 \times r$ ) des tiges attachées aux guides d'ondes ( $0.75 \times r, 0.8 \times r$ ) (voir la **figure II-2** (a)).

La structure contient deux ports d'entrée A et B et deux ports de sortie S et R. Les rapports de contraste de la somme (S), la retenue (R) et le retard maximum ont été égaux à 8,4 dB, 9,3 dB et 0,15 ps, respectivement. La distribution électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-2** (b), (c) et (d).

Une nouvelle conception de DATO a été proposée par M. Seifouri et al. [25] compacte et simple basée sur le principe des interférences constructives et destructives de faisceaux optiques. La différence de phase a été créée en mettant quatre tiges diélectriques au niveau de la jonction des guides d'ondes d'entrée/sortie de rayons  $r_1$  (égale à 70 nm) et  $r_2$  (égale à 30 nm), et la différence de longueur des guides d'ondes d'entrée comme mentionnée sur la **figure II-3** (a). De plus, les longueurs des guides d'ondes d'entrée ont été ajustés de manière à obtenir la différence de phase appropriée. Le réseau PhC 2D hexagonal de tiges diélectrique de silicium placé dans l'air, avec une dimension de  $10,5 \mu\text{m} \times 13,1 \mu\text{m}$ .



**Figure II-3** : Demi additionneur proposé par M. Seifouri et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11.

La constante de réseau (a) et le rayon (r) des tiges sont égales à 656 nm et 120 nm, respectivement. La structure fonctionne à la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  au mode TM. La structure contient deux ports d'entrée A et B et deux ports de sortie S et R. Les rapports de contraste de la somme (S) et la retenue (R) ont été égales à 9,3 dB et 8,22 dB respectivement. La distribution électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-3** (b), (c) et (d).

De même, Keivan Saadi et al [26] ont conçu un DATO basé sur constructive et destructives des interférences à l'intérieur dans une structure PhC 2D à un réseau hexagonal

(Figure II-4 (a)). La structure est composée par des tiges diélectriques de silicium à indice de réfraction  $n$  égale à 3,5 placés dans l'aire. Les paramètres tels que la constante diélectrique ( $a$ ) et le rayon des tiges diélectriques ( $r$ ) sont uniformes dans toute la et sont égales à 600 nm,  $2 \times a$ , respectivement. Les simulations sont réalisées en mode TE à la longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$ .

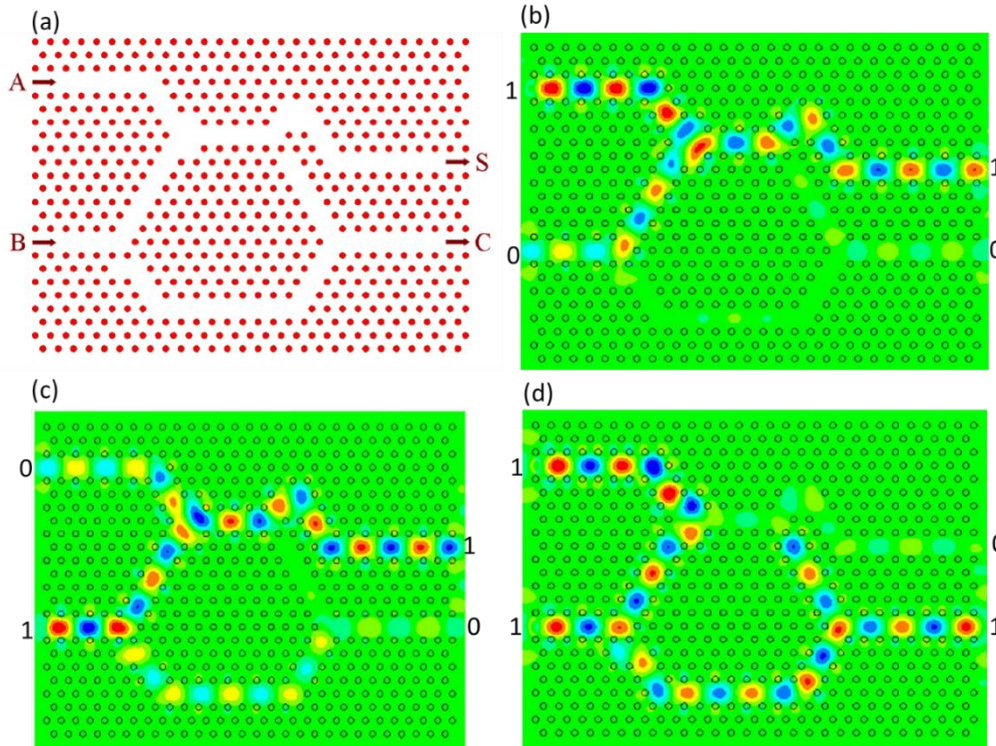


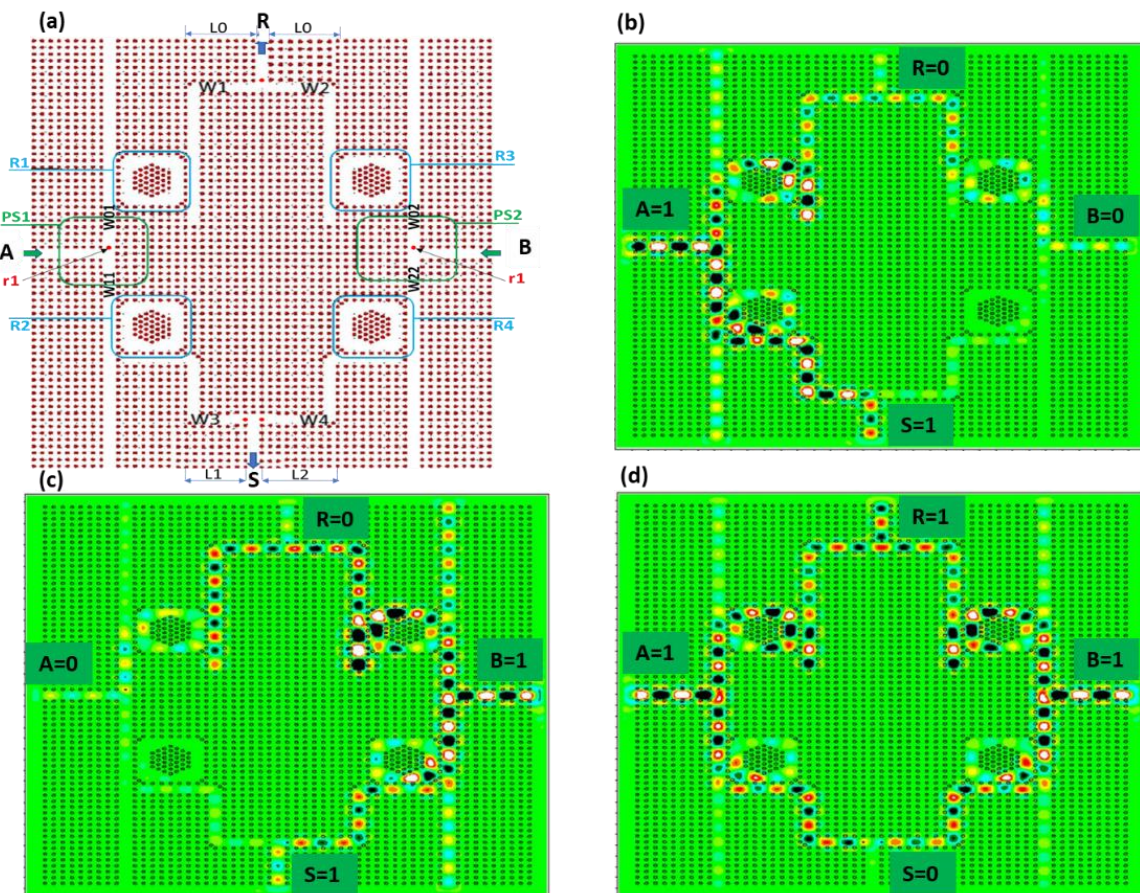
Figure II-4 : Demi additionneur proposé par Keivan Saadi et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11.

La taille de la structure est plus petite de  $208 \mu\text{m}^2$ . Les rapports de contraste obtenu entre les niveaux logiques dans les ports de sortie de la somme (S) et la retenue (R) sont de 14,2 dB et 6,53 dB, respectivement. La distribution électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la figure II-4 (b), (c) et (d).

Somaye Serajmohammadi et al [27] ont proposé et conçu un demi additionneur en combinant des diviseurs de puissances, (04) résonateurs en anneau, et des guides d'ondes. La structure est basée sur des interférences constructives et destructrices de faisceaux optiques, sans utiliser l'effet non linéaire. L'indice de réfraction ( $n$ ), la constante de réseau ( $a$ ) et le rayon des tiges ( $r$ ) sont égales à 3,46, 548 nm et  $0,185 \times a$ .

La structure est composée par des guides d'ondes (W1-W4), deux diviseurs de puissance en forme de T (PS1 et PS2) et quatre résonateurs en anneau (R1-R4) (Figure II-5 (a)). Cependant, la constante de réseau ( $a_1$ ) des résonateurs en anneau est égale à 425 nm. Deux diviseurs de

puissances PS1 et la PS2 sont conçu pour la répartition de puissance dans les guides d'ondes (W01, W11) et (W02, W22). Deux défauts ont été introduits de rayon  $r_1 = 40$  nm au début de W01 et W02 tel que la puissance dans les guides d'ondes W11 et W22 est supérieur à la puissance des guides d'ondes W01 et W02. Deux résonateurs en anneaux R1, R2 sont créées dans les sorties supérieur et inférieur de PS1 pour coupler la puissance divisée vers les guides d'ondes W1 et W3. De la même, deux anneaux R3 et R4 sont créées dans les sorties supérieur et inférieur de PS2 pour coupler la puissance divisée vers les guides d'ondes W2 et W4, respectivement.



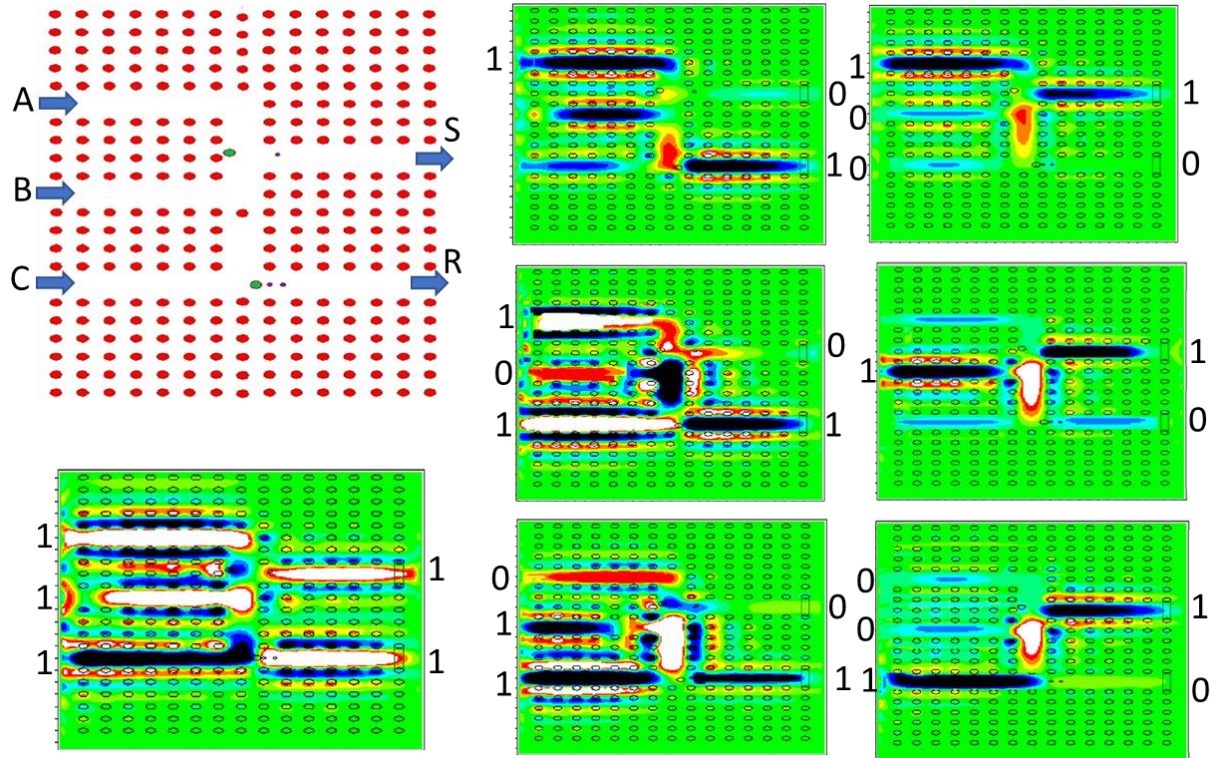
**Figure II-5** : Demi additionneur proposé par Somaye Serajmohammadi et al (b) 10, (c) 01 et (d) 11.

Ensuite, les signaux d'entrées des guides d'ondes W1 et W2 se rencontrent de manière constructive interférences, Alors que, les guides d'ondes de W3 et W4 sont couplés pour avoir un effet des interférences destructives pour la même condition d'entrée.

La taille de la structure est plus petite de  $1056 \mu\text{m}^2$ . Les rapports de contraste obtenus entre les niveaux logiques dans les ports de sortie de la somme (S) est la retenue (R) sont de 9,77 dB et 6,98 dB, respectivement. Les simulations par la méthode FDTD de distribution

électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-5** (b), (c) et (d).

L'additionneur complet proposé par Vali-Nasab et al [28], est constitué de  $15 \times 22$  de tiges diélectriques. La constante de réseau et le rayon de la tige sont respectivement de 409 nm et 109 nm.



**Figure II-6** : Additionneur complet proposé par Aziz-Morad Vali-Nasab et al.

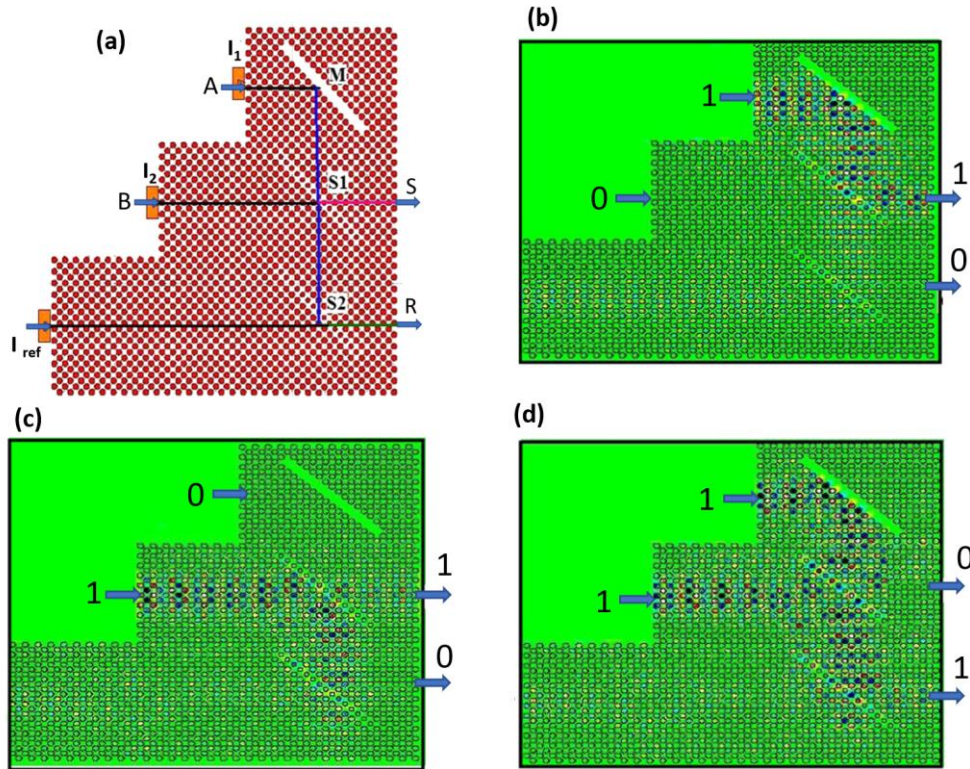
Deux types de tiges sont ajoutées à la structure pour contrôler le fonctionnement de la structure. Le premier type de défaut est constitué de trois tiges d'un rayon de 45 nm (trois tiges bleue), et le deuxième type est constitué de deux tiges présentées par la couleur verte (**Figure II-6**). La distribution électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-6** (b), (c) et (d).

### II.3.2 Additionneur tout optique à base auto-collimation

L'auto-collimation est un mécanisme de confinement intéressant guidage de la lumière sans défaut de ligne ou linéarités, et cela se produit lorsque l'onde incidente avec une fréquence spéciale est excitée dans la direction désignée.

Susan C. Xavier et al. [29] ont utilisé l'effet d'auto-collimation pour réaliser un demi additionneur DATO sur un 2D PhC à réseau carré qui consiste de tiges diélectriques de silicium

dans l'air. La constante de réseau (a), le rayon des tiges diélectriques (r) et l'indice de réfraction sont égales à 302 nm, 105 nm, et 3,46. Deux types de miroirs ont été utilisé dans la conception de la structure M et S1 et S2. Dans le type M, 15 tiges ont été retirées dans la direction  $\Gamma$ -X, dans type miroir S1 et S2, 15 tiges de rayon  $0,274 \times a$  ont été placé dans la direction  $\Gamma$ -X. Les miroirs sont utilisés comme diviseurs de faisceaux 50 :50.



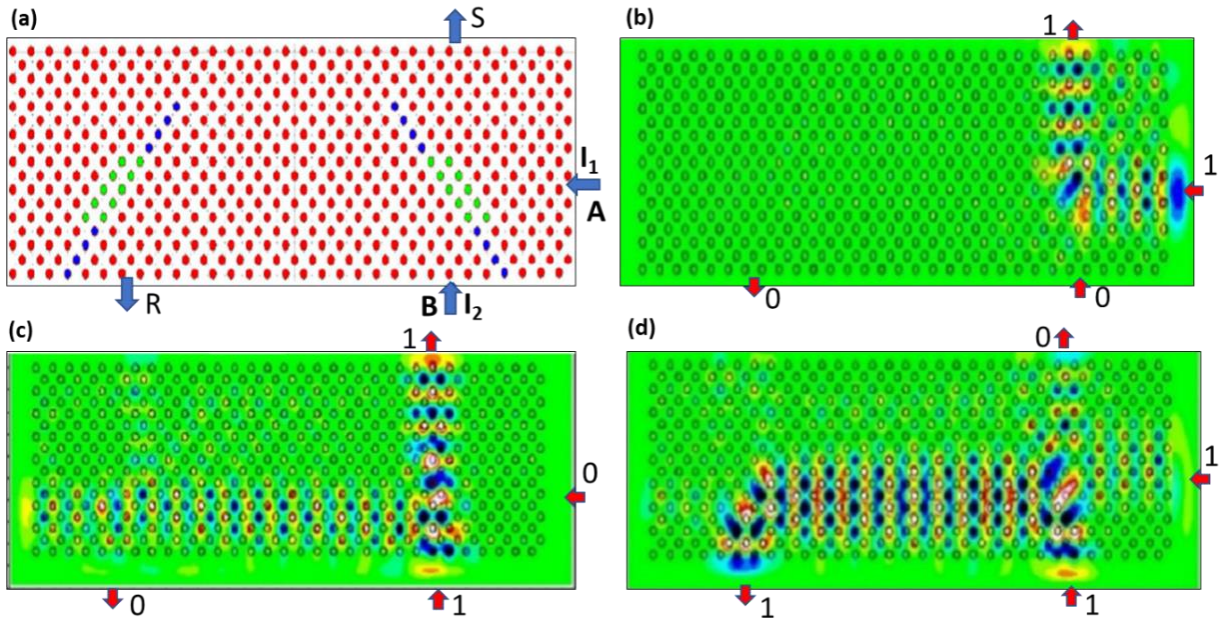
**Figure II-7** : Demi additionneur proposé par Susan C. Xavier et al (b) 10, (c) 01et (d) 11.

L'additionneur proposé est représenté sur la **figure II-7**. Deux signaux  $I_1$  et  $I_2$  de la même longueur d'onde sont appliqués aux ports d'entrées A et B. Les ports S et R représente la somme et la retenue de DATO. Les simulations par la méthode FDTD de distribution électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-7** (b), (c) et (d).

Une autre conception d'AOHA basée sur l'auto-collimation a été proposée par M. R. Jalali-Azizpoor et al [30], Un réseau carré 2D PhC réalisé avec des tiges de silicium placés dans l'aire, ayant un indice de réfraction, et le rayon de 3.47,  $0,18 \times a$ , respectivement. La constante de réseau et la taille de la structure est de 521 nm, et  $75 \mu\text{m}^2$ .

La structure est basée sur deux réflecteurs/diviseurs de faisceaux de la lumière de l'intensité  $54 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$  à la longueur 1500 nm pour le mode TM. Comme montre sur la **figure II-8** (a), les deux réflecteurs/diviseurs sont conçus avec des tiges un rayon  $0,18 \times a$  et des indices de

réfraction différents de 2,5 (les tiges bleue). La structure contient deux ports d'entrées  $I_1$  et  $I_2$  (les signaux A et B), et deux ports de sortie de la somme (S) et la retenue (R). Les simulations par la méthode PWE (plane wave expansion) de distribution électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-8** (b), (c) et (d).



**Figure II-8** : Demi additionneur proposé par Mohammad Reza et al. (b) 10, (c) 01 et (d) 11.

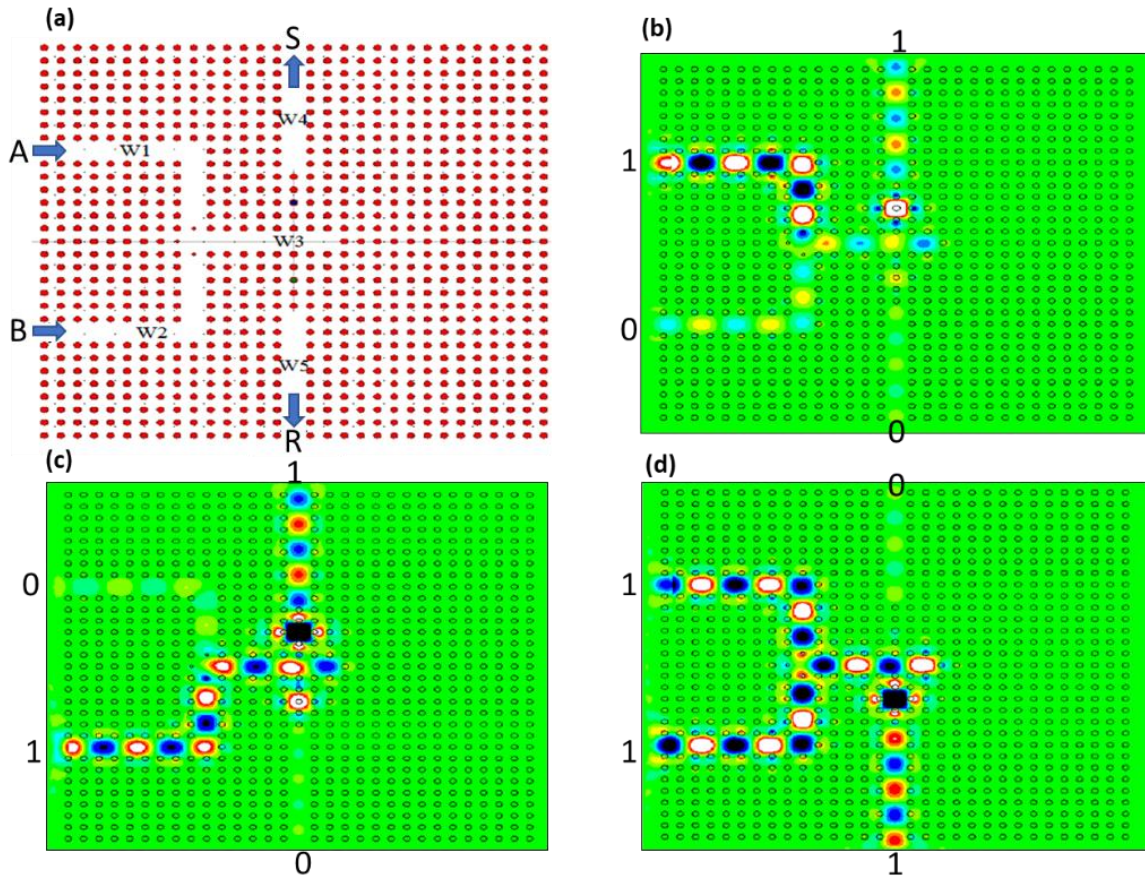
### II.3.3 Additionneur tout optique à base de résonance (effet de Kerr non linéaire)

Dans cette section, nous divisons les additionneurs tout optique à base de résonance en deux types, à base de : cavité résonante et résonateur en anneau.

#### II.3.3.1 Cavités résonante

Une conception plus simple un demi additionneur à cristaux photoniques tout optique DATO a été rapportée par Mona Neisy et al. [31]. Deux cavités résonantes non linéaires ont été introduites à l'intérieur des guides d'ondes W4 (vert) et W5 (bleue) de la structure 2DPhC. Les deux cavités résonantes non linéaires ont été créés en remplaçant les tiges diélectriques par des tiges défectueuses verre dopé à une indice de réfraction 1.4 et coefficient de Kerr de  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{w}$ . Comme représenté la **figure II-9** (a), le dispositif est constitué d'un  $31 \times 31$  réseaux de tiges diélectriques placé dans l'aire ayant un indice de réfraction, un rayon et la constante de réseau de 3.46, 118 nm, 558 nm, respectivement. La structure contient deux ports d'entrées A et B et deux ports de sorties S et R représente la somme et la retenue. La taille de la structure est de  $303 \mu\text{m}^2$ , et fonctionne à la longueur d'onde 1551nm dans le mode TM.

La longueur d'onde des cavités résonantes dépend des paramètres de la structure, tels que l'indice de réfraction, le rayon et la position du défaut dans PhC. Aussi, selon Effet Kerr, l'indice de réfraction des matériaux non linéaires dépend de l'intensité optique du signal d'entrée.

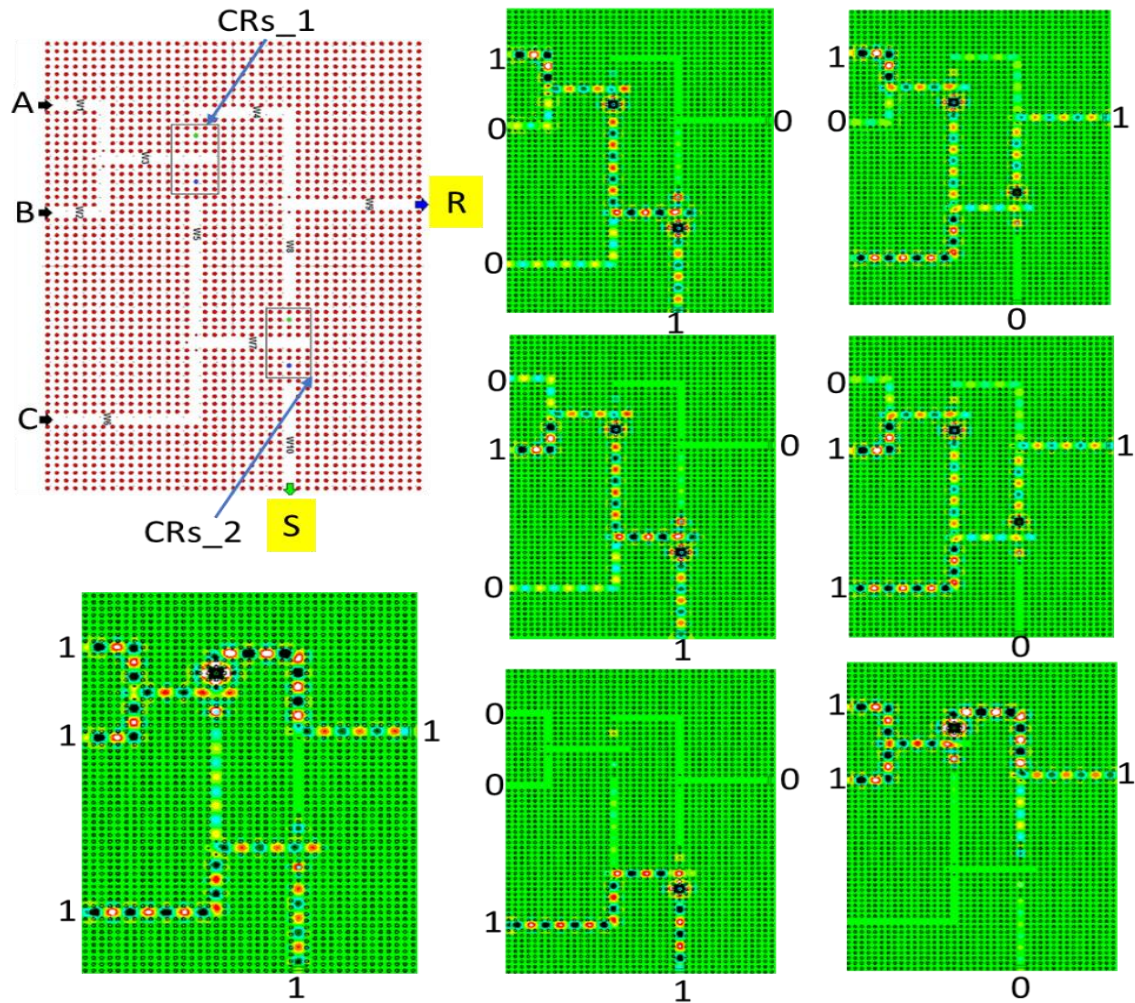


**Figure II-9** : Demi additionneur proposé par Mona Neisy et al. (b) 10, (c) 01 et (d) 11.

Selon l'effet Kerr, l'indice de réfraction des matériaux non linéaires dépend de l'intensité optique du signal d'entrée, donc deux sources optiques avec une longueur d'onde de 1551 nm et une intensité optique de  $10 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$  sont utilisés dans les ports d'entrée pour établir la fonction de l'addition. La distribution de champ électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-9** (b), (c) et (d).

Une nouvelle conception d'additionneur complet tout optique utilisant deux résonateurs non linéaires a été proposée par S. Naghizade [32], L'additionneur complet basé sur 2DPHC se compose de trois ports d'entrée (A, B et C), deux cavités résonantes non linéaires, plusieurs guides d'ondes et deux ports de sortie (Somme et Retenue), comme illustré dans la **figure II-10**. L'additionneur complet fonctionne autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ . La direction de la lumière émise à l'intérieur de la structure est contrôlée par l'effet Kerr non linéaire. Le temp

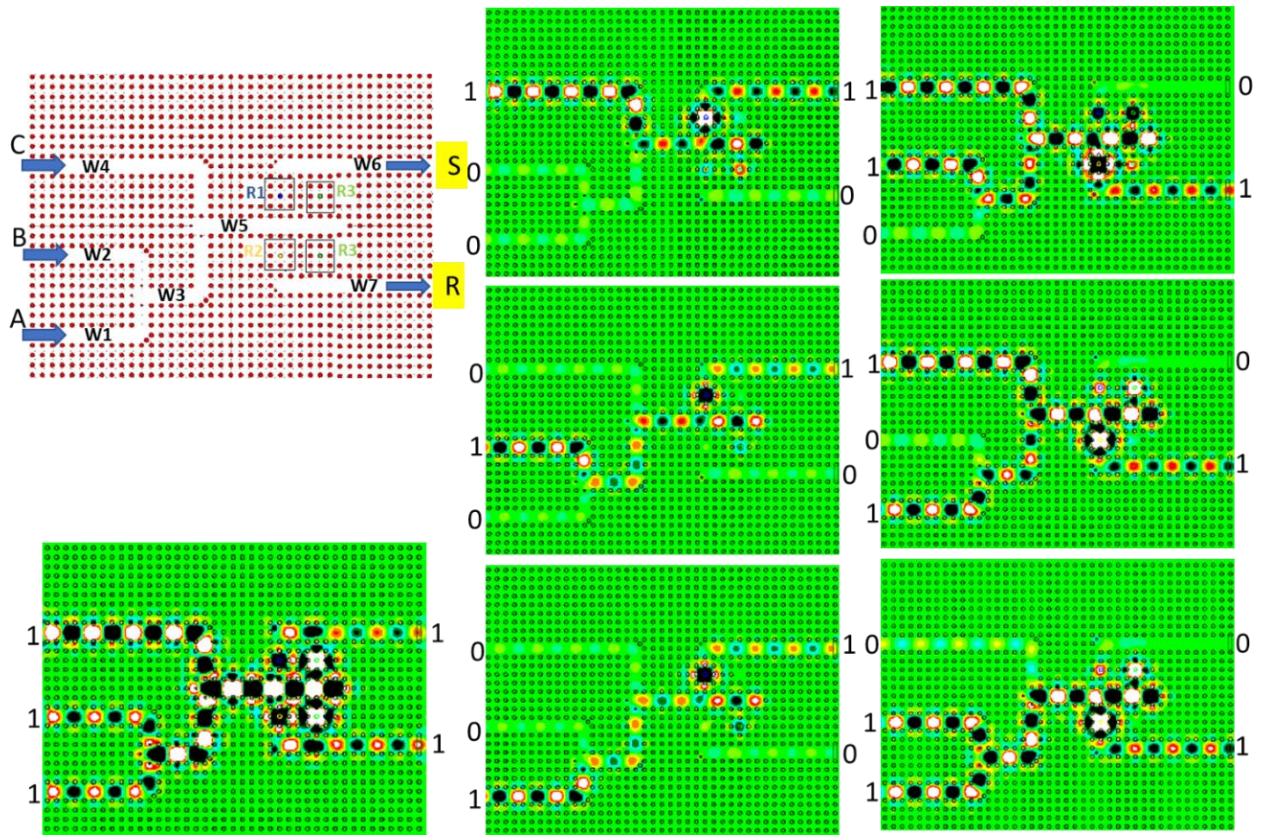
maximal et la taille de l'additionneur complet proposé sont 3 ps,  $758.5 \mu\text{m}^2$ , respectivement. La distribution de champ électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-10**.



**Figure II-10** : Additionneur complet proposé par S. Naghizade et al.

F. Cheraghi et al 2017 [33], proposent un additionneur complet basé sur la cavité résonante et la technique de non linéarité. Quatre non-linéaires cavités résonantes ont été utilisées à l'intérieur d'un cristal photonique bidimensionnel. Les cavités résonantes sont formées par des tiges non linéaire composée de verre dopé. Les résultats de la simulation montrent que la puissance normalisée maximale à l'état OFF et la puissance minimale normalisée à l'état ON sont de 3 % et 53 % pour le port SUM et 10 % et 100 % pour le port CARRY. Aussi le temps maximum est environ de 8 ps. La distribution de champ

électromagnétique pour différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II-11**.

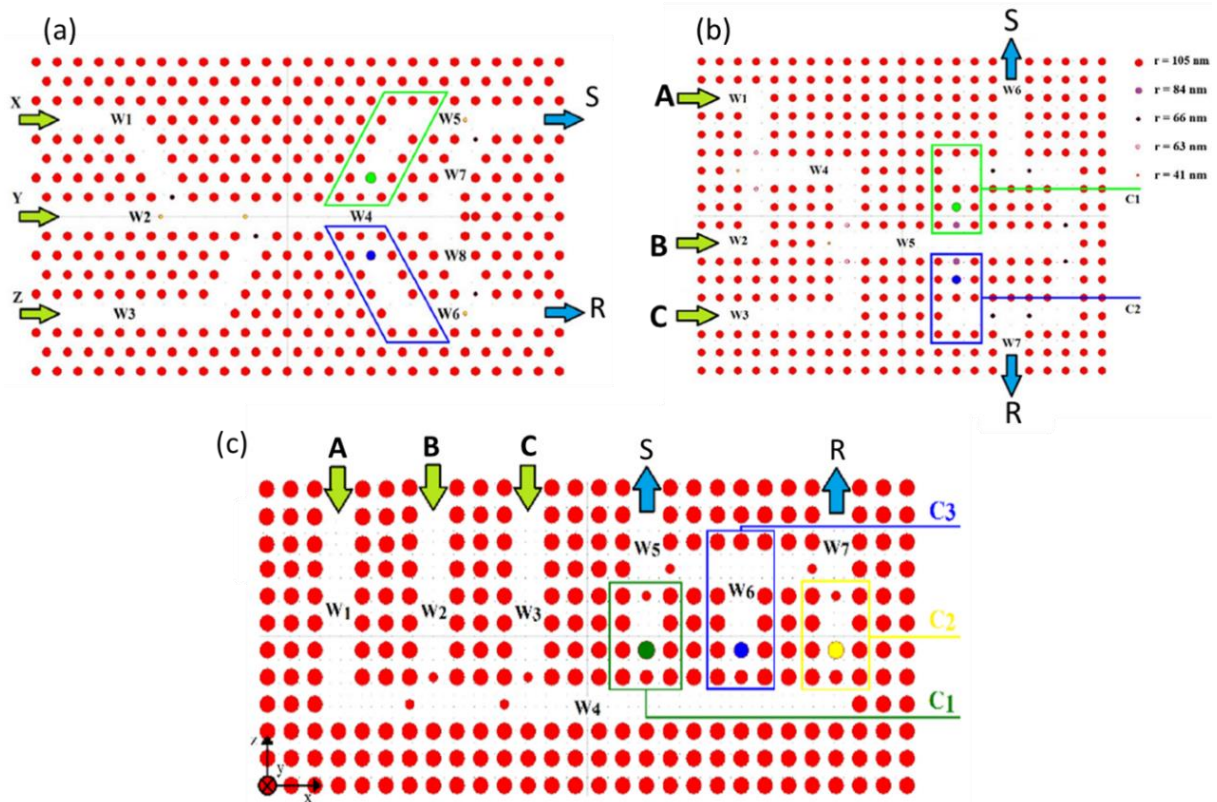


**Figure II-11** : Additionneur complet proposé par F. Cheraghi et al.

Trois additionneurs complets ont été proposés par Maliki et al (**Figure II-12**). L'additionneur ACTO [34] (**Figure II-12** (a)). Trois guides d'ondes transmettent le signal optique des ports d'entrées vers le guide d'onde principal. Le principe de fonctionnement est basé sur l'intensité optique dans le guide d'onde principal, deux cavités non linéaires qui son dirigent le signal optique vers les ports de sortie de la somme et la retenue. Les deux tiges de cavités résonantes en verre dopé.

Deuxième additionneur complet basé sur 2DPhC pour réaliser la sommation de trois bits [35] (**Figure II-12** (b)), la structure est constituée par 18 lignes et 23 colonnes de tiges linéaires dans les directions x et z. Le rayon de tige  $r = 105$  nm, un constant de réseau  $a = 475$  nm et la taille de la structure est égale à  $93 \mu\text{m}^2$ . Le dispositif est réalisé par trois guides d'ondes d'entrée W1, W2 et W3 sont connectés au guide d'ondes W4 et W5, et deux cavités résonantes C1 et C2 sont connectées au guide d'ondes principal W5 pour transmettre les ondes optiques vers les deux ports de sortie la somme et la retenue en fonction des intensités optiques dans le guide W5.

La première tige non linéaire de cavité C1 est constituée de verre dopé avec un indice de réfraction linéaire de 1.4 et non linéaire de  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{w}$ . Le rayon de tige non linéaire égale à  $1.1 \times a$ . La deuxième tige non linéaire de cavité C2 est constituée de Chalcogénide avec un indice de réfraction linéaire de 3.1 et non linéaire de  $9 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{w}$ . Le rayon de tige non linéaire égale à  $1.1 \times a$ .

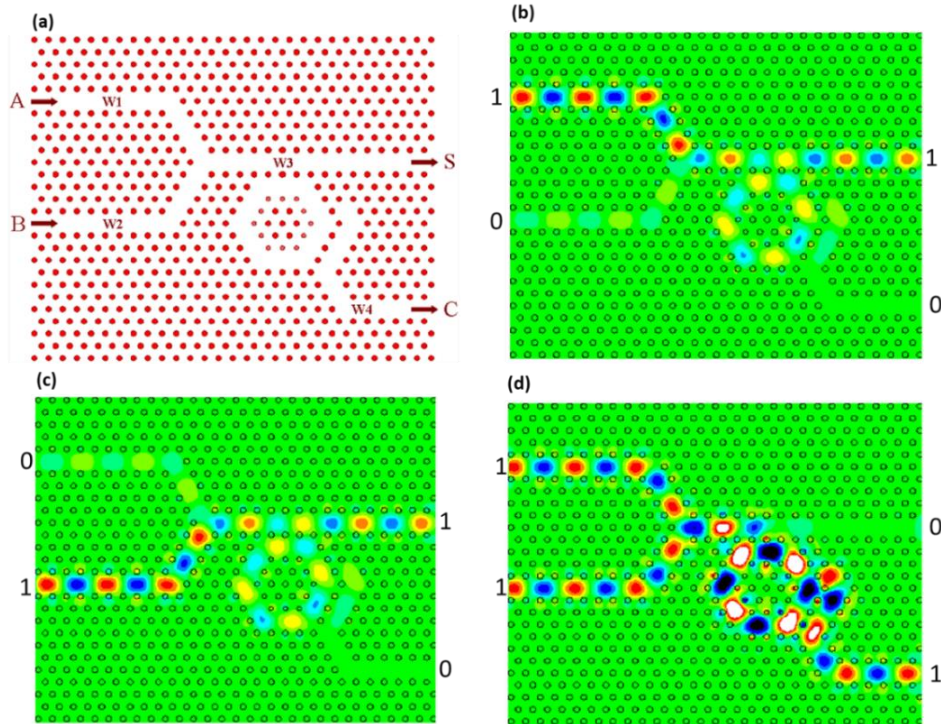


**Figure II-12** : Additionneurs complet tout optiques proposés par Maliki et al.

Troisième additionneur [36] (**Figure II-12** (c)), la structure 2DPhC est constituée par  $28 \times 12$  tiges linéaires de Chalcogénide à un rayon  $r = 135 \text{ nm}$  dans les directions  $x$  et  $z$ , un constant de réseau  $a = 461 \text{ nm}$  et la taille de la structure est égale à  $71 \mu\text{m}^2$ . L'additionneur proposé contient trois guides d'ondes ( $W_1$ ,  $W_2$  et  $W_3$ ) pour guider les signaux optiques vers le guide d'ondes principal  $W_4$ , et trois cavités résonantes C1, C2 et C3 sont connectées au guide d'ondes principal  $W_4$  pour transmettre les ondes optiques vers les deux ports de sortie la somme et la retenue en fonction des intensités optiques dans le guide  $W_4$ . Les tiges non linéaires des trois cavités sont constituées de verre dopé avec un indice de réfraction linéaire de 1.4, non linéaire de  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{w}$  et de rayons égale à  $1.1 \times a$ ,  $1.04 \times a$  et  $0.98 \times a$ . Selon les résultats de simulation, le temps maximale, les rapports de contraste de la somme S et de la retenue R sont égale à 390 fs, 13.22 dB et 13.84 dB, respectivement.

### II.3.3.2 Résonateurs en anneau

Plusieurs additionneurs demi et complet ont été publiés à base des résonateurs en anneau : Keivan Saadi et al [37] proposent un demi additionneur fonctionne à al longueur d'onde 1,55  $\mu\text{m}$ .



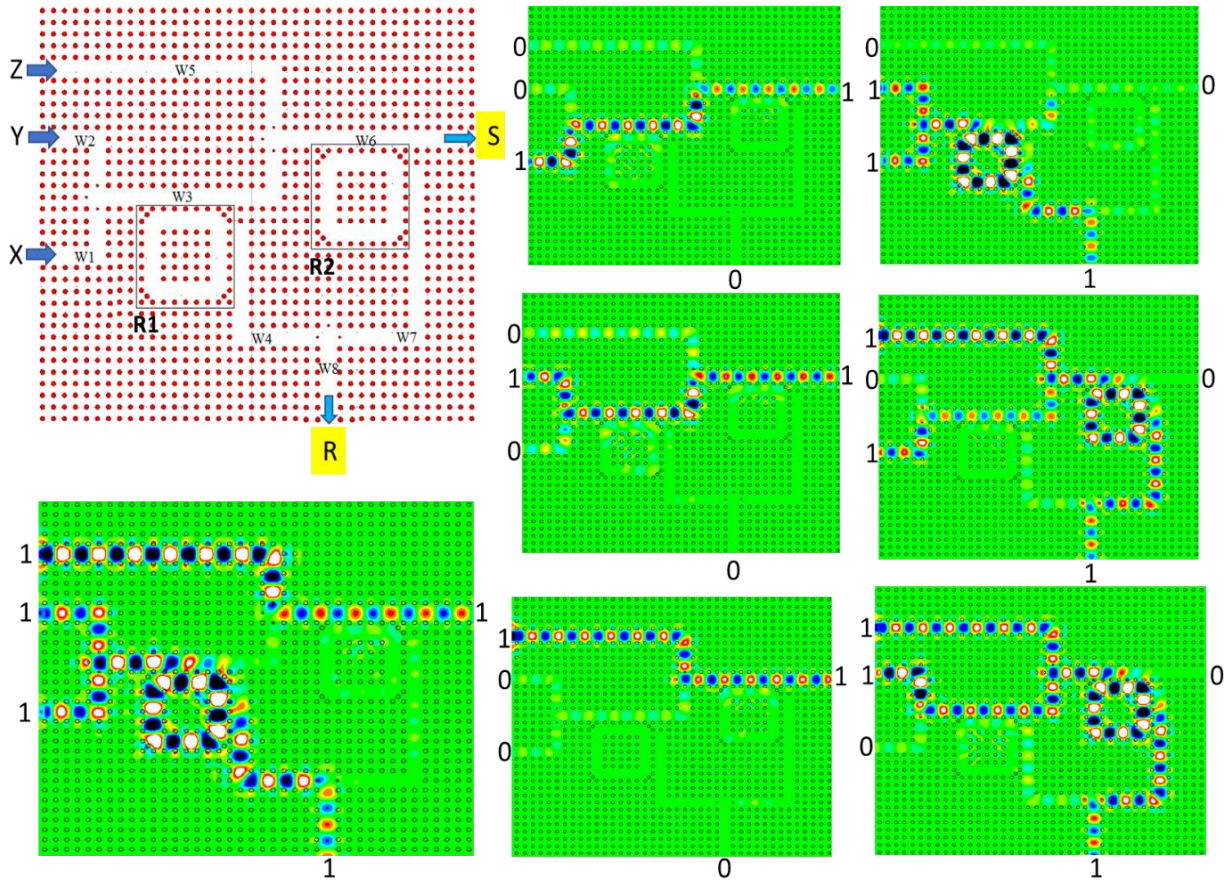
**Figure II-13** : Demi-additionneur tout optique proposé par Keivan Saadi et al.

La structure se compose de quatre guides d'ondes et d'un résonateur qui sont formés en supprimant un certain nombre de tiges diélectriques (**Figure II-13**). La structure photonique cristal 2D est constituée par 29\*27 tiges à un rayon  $r = 0.2 \times a$ , et un constant de réseau de fond  $a = 600 \text{ nm}$ .

Le matériel utilisé aluminium gallium arsénite AlGaAs à un indice de réfraction linéaire est égale à 3.3, et un coefficient Kerr non linéaire  $n_2 = 1.5 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ . Les rapports de contraste de la somme/ retenue, le temp minimum, et la taille de la structure sont égale à 13.86/13.5 dB, 2 ps et 251  $\mu\text{m}^2$ , respectivement.

Hamed Alipour-Banaei et al [38] proposent le premier additionneur complet 1 bit basé sur des résonateurs en anneau carrés 2DPHC. La structure finale est composée de huit guides d'ondes (W1, W2...W8), deux résonateurs en anneaux non linéaire de la forme carrée R1 et R2, trois ports d'entrée x, y, z et deux ports de sortie somme (S) et retenue (R). Les guides

d'ondes W1- W4 et le résonateur en anneau R1 forme le premier demi-additionneur et les guides d'ondes W3-W7 avec le résonateur R2 forme le deuxième demi-additionneur.



**Figure II-14** : Additionneur complet proposé par Hamed Alipour-Banaei et al.

La structure est constituée par  $40 \times 36$  tiges à un rayon  $r = 0.2 \times a$ , un constant de réseau de fond ( $a = \lambda$ ). La structure, comme le montre la figure 10, a été réalisée sur une surface de  $439 \mu\text{m}^2$  en utilisant une matrice  $40 \times 36$  de tiges diélectriques construit par le matériel non linéaire Chalcogénide ayant un indice de réfraction linéaire est  $n_1 = 3.1$  et le coefficient de Kerr des tiges non linéaires utilisées pour construire les résonateurs est  $n_2 = 9 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ . Le rayon des tiges  $r = 0.2 \times a$ , et une constante de réseau de fond  $a = 626 \text{ nm}$ . L'intensité optique de puissance  $I_0$  est égale à  $0,5 \text{ KW}/\mu\text{m}^2$ . La distribution du champ électromagnétique pour les différentes combinaisons logiques d'entrée est illustrée dans la **figure II.14**.

Marziyeh Moradi et al [39] proposent un additionneur complet de la même architecture de l'additionneur proposé par Hamed Alipour-Banaei et al [38] mais la différence dans la forme de résonateur en anneau. La structure finale est composée de huit guides d'ondes (W1,

W2...W8), deux résonateurs en anneaux non linéaire de la forme hexagonale R1 et R2, trois ports d'entrée A, B et C et deux ports de sortie somme S et retenue R.

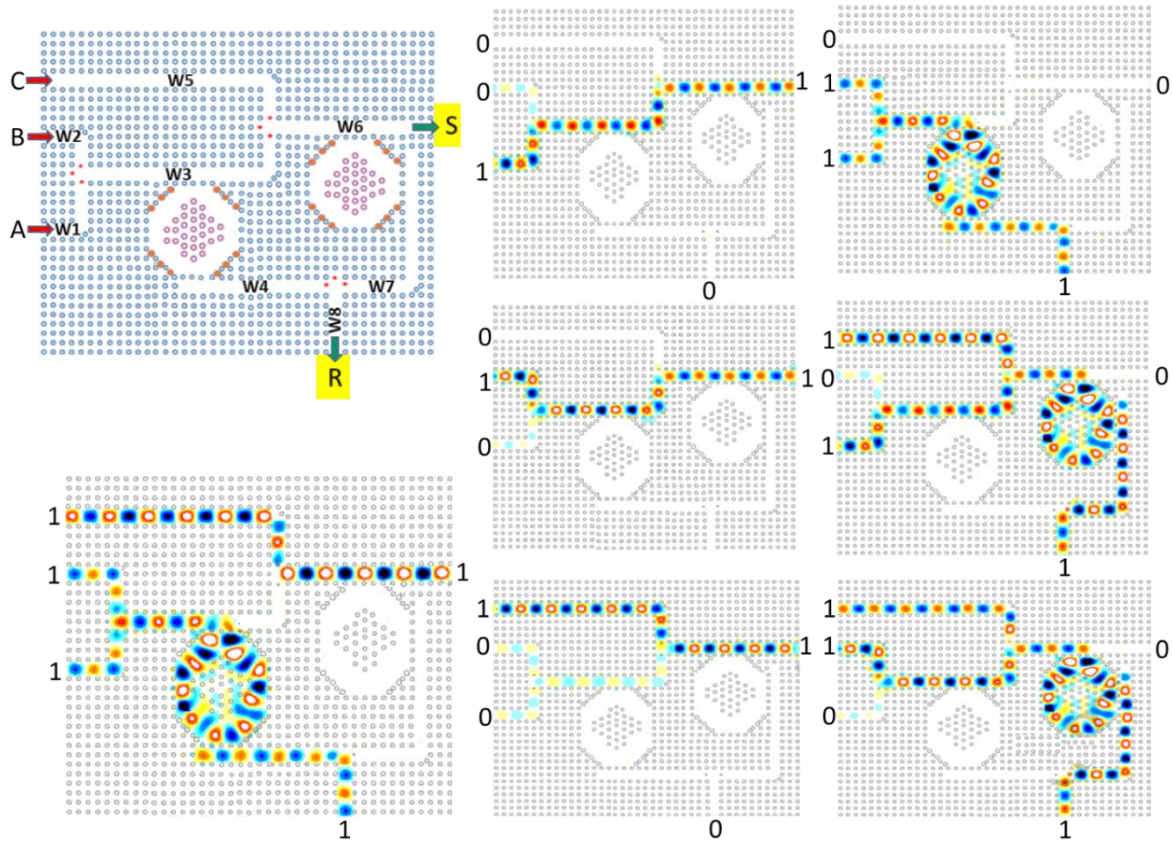


Figure II- 15 : Additionneur complet proposé par Marziyeh Moradi et al.

La structure 2DPhC est constituée par une matrice de  $41 \times 37$  tiges diélectriques à un rayon  $r = 0.2 \times a$ , un constant de réseau de fond  $a = 608$  nm et la taille de la structure est égale à  $560 \mu\text{m}^2$ . Le matériel utilisé non linéaire est de *Chalcogénide glass* dont l'indice de réfraction linéaire est  $n = 3,1$  et le coefficient Kerr non linéaire est  $n_2 = 9 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{W}$ . Le temp maximale est égale à de 3 ps.

Mohammad Reza Geraili et al [40] ont proposé un additionneur complet à l'aide du limiteur optique basé sur deux résonateurs en anneaux non linéaires carrés R1 et R2, comme illustré dans la **figure II-16**. La constante de réseau « a » de la structure 2DPhC égale de 600 nm, le rayon des tiges diélectrique en silicium « Si » et l'indice de réfraction, 120 nm, 3,46. Le résonateurs R1 et R2 sont construit par des tiges diélectrique non linéaires de rayon  $r_1 = 85$  nm et  $r_2 = 90$  nm, verre dopé avec un indice de réfraction linéaire de 1,4, un coefficient Kerr est de  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ . La structure finale comporte trois ports d'entrée X, Y et Z et deux ports de sortie S et R. Trois sources optiques de longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  et de l'intensité de puissance optique

égale à et  $0,1 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  ont été utilisées pour simulation. L'état logique 1 de la somme (S) varie entre 74 % et 91 %, et l'état logique 1 de la retenue (R) varie entre 74 % et 95 %. Le temp maximum, et la taille de la structure sont égales à de 2 ps, et  $396 \mu\text{m}^2$ , respectivement.

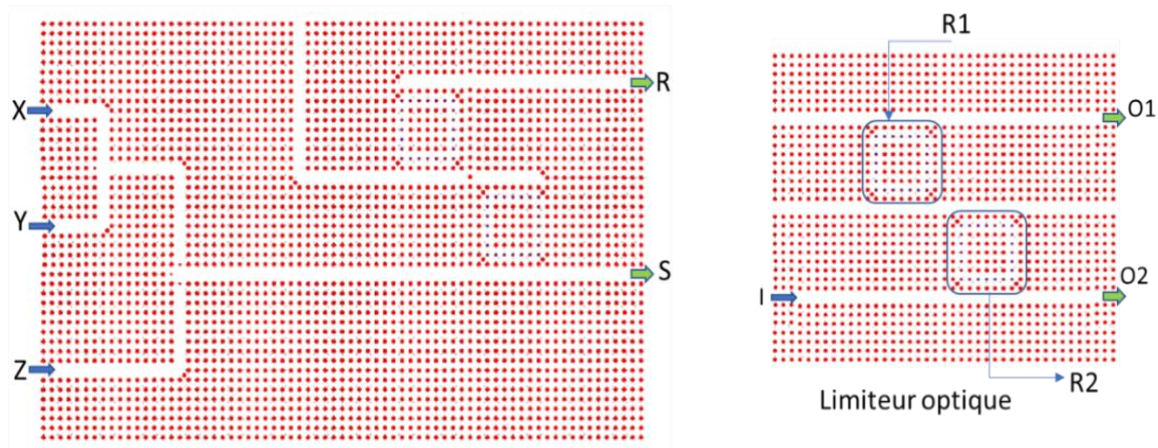


Figure II-16 : Additionneur complet proposé par Mohammad Reza Geraili et al.

Un additionneur complet a été proposé par Saleh Naghizade [41] en utilisant deux résonateurs non linéaires à base 2DPhC de forme X (Figure II-17). La structure est constituée des tiges diélectriques à une géométrie hexagonale de rayon  $r = 0.2 \times a$ , un constant de réseau de fond  $a = 600 \text{ nm}$  et l'indice de réfraction de Silicium (Si) est égale à 3.46.

Pour la conception les résonateurs en anneaux, le matériel utilisé des tiges non linéaires verre dopé dont l'indice de réfraction linéaire  $n = 1.4$ , et le coefficient Kerr non linéaire est  $n_2 = 10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ .

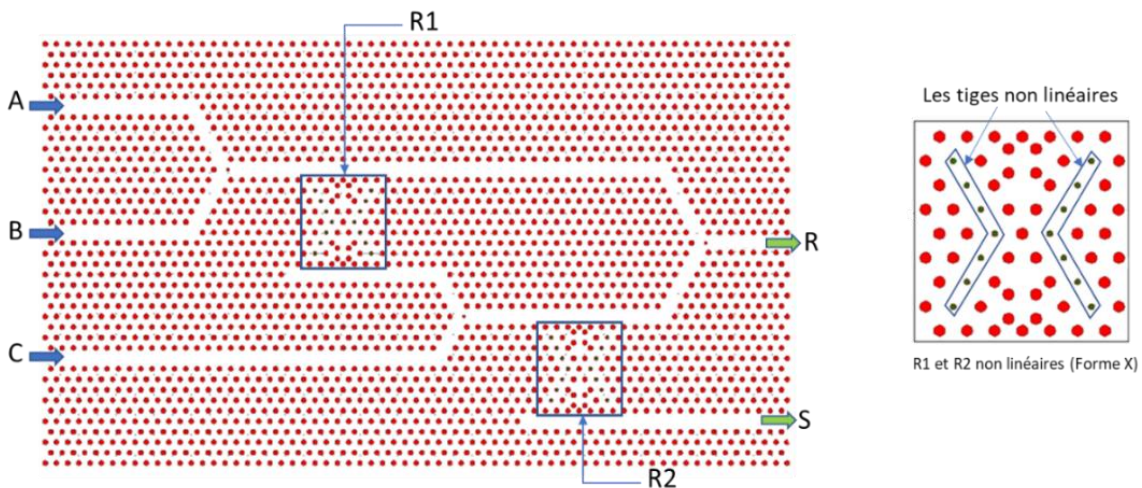


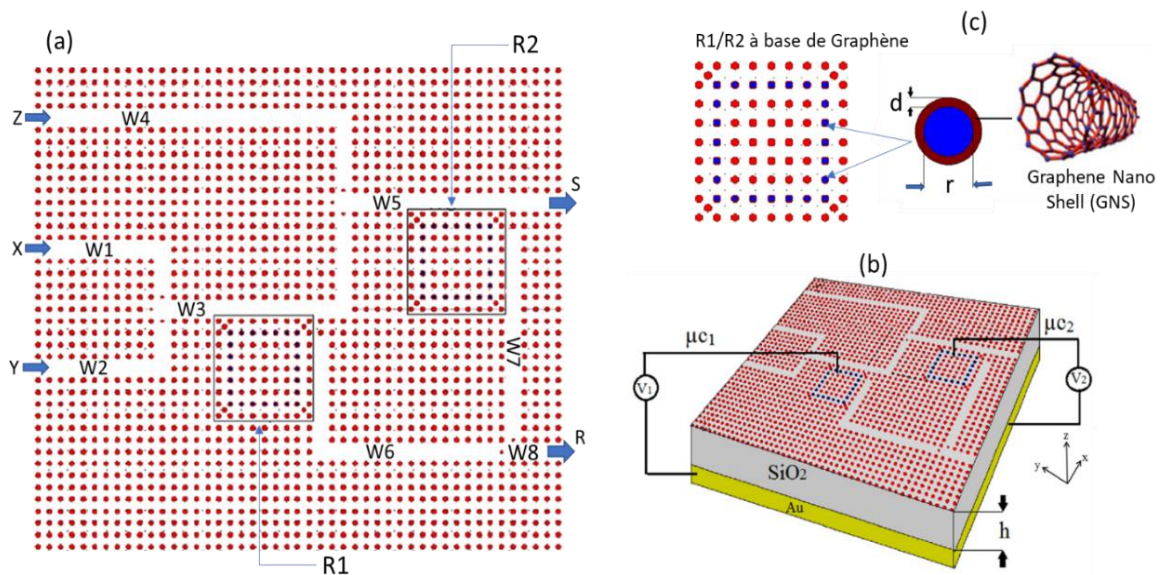
Figure II-17 : Additionneur complet proposé par Saleh Naghizade et al.

La structure finale comporte trois ports d'entrée A, B et C et deux ports de sortie S et R. Trois sources optiques de longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  et de l'intensité de puissance optique égale à et 1

$W/\mu\text{m}^2$  ont été utilisées pour les simulations. L'état logique 1 de la somme (S) varie entre 85 % et 130 %, et l'état logique 1 de la retenue (R) varie entre 90 % et 130 %. Le temp maximum et la taille de la structure sont égale à de 2.5 ps et  $663 \mu\text{m}^2$ , respectivement.

### II.3.4 Structures cristaux photoniques à base de graphène

Saleh Naghizade et al [42] proposent un additionneur complet optoélectronique basé sur le graphène, comme illustré sur la **figure II-18 (a)**. La structure 2DPhC constituée d'un réseau carré de tiges diélectriques de rayon  $r=118 \text{ nm}$ , et l'indice de réfraction en silicium est égale à 3,46. L'additionneur complet proposé se compose de huit guides d'ondes et de deux résonateurs en anneau basés sur GNS. Les guides d'ondes W1, W2, W3 et W6 et le résonateur R1 avec un potentiel chimique de  $\mu\text{c}1$  forment le premier demi-additionneur. La somme (S) et la retenue (R) du premier demi-additionneur sont placés dans la sortie de W3 et W6. De plus, les guides d'ondes W4, W5 et W7 et le résonateur R2 avec un potentiel chimique de  $\mu\text{c}2$  forment le deuxième demi-additionneur. Les guides d'ondes W6, W7 et W8 forment la porte logique OR. De plus, la somme (S) et la retenue (R) de l'additionneur complet sont placés dans les sorties des guides d'ondes W5 et W8.



**Figure II-18** : Additionneur complet proposé par Saleh Naghizade et al.

Sur la **figure II-18 (b)**, la plaque  $\text{SiO}_2$  en couleur gris d'une épaisseur de  $h = 2 \mu\text{m}$ . Les tensions de grille de  $V_1$  et  $V_2$  sont appliqués respectivement aux résonateurs en anneaux R1 et R2, basés sur GNS. La variation de potentiel chimique des GNS produit le mécanisme de commutation, gère le couplage et la direction de propagation des faisceaux à l'intérieur de la structure. Le

potentiel électrique positif est appliqué aux graphène et un potentiel électrique négatif est appliqué à la couche (couleur jaune) « Au ».

La structure est caractérisée par une taille de  $663 \mu\text{m}^2$ , et un temp de retard maximum de 0.8 ps. Les apports de contraste de la somme S et la retenue R sont égale à 13,97 dB et 12,3 dB, respectivement.

## II.4 Analyse et synthèse bibliographique

Les sections précédentes ont permis de passer en revue les différents dispositifs et méthodes de conception des structures à cristaux photoniques en particulier les additionneurs tout optiques. L'objectif de l'analyse est de répertorier les différentes techniques de conception à travers une étude de bibliographique, nous avons détaillé quatre méthodes de conception tels que, les structures basées sur les interférences, les dispositifs à base d'auto-collimation, les structures construits à l'aide des matériaux non linéaire à effet de Kerr (Cavités résonante or résonateurs en anneau), et graphène.

Les avantages, les inconvénients des techniques exploités et leurs applications dans les systèmes de communication optique sont présentés dans le **tableau II-1**.

Le **tableau II-2**, présente une étude comparative entre la 2DPhC linéaire et non linéaire basée sur les additionneurs toutes optiques HA ou FA qui ont été discutés dans ce chapitre.

La majorité des structures 2DPhC présentées dans le **tableau II-2** sont conçues sur une taille plus petite de l'ordre de  $\mu\text{m}^2$ , ce qui est un avantage pour la conception les circuits photoniques intégrées (PICs). Les inconvénients liés au fonctionnement des structures linéaire, tels que leur sensibilité aux phases des signaux d'entrée. Le phénomène de l'effet kerr non linéaire est principalement utilisé pour la conception des additionneurs, ce qui rend le fonctionnement de circuit extrêmement rapide.

De plus, les additionneurs basés sur le principe non linéaire de la lumière dans les 2DPhC fonctionnent plus rapidement que les additionneurs basés sur le principe linéaire. Cependant, les structures à base le régime non linéaire a ses propres inconvénients, notamment l'intensité de puissance est élevée.

| La technique                                                                          | Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                     | Applications possible                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Les interférences                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large bande de fréquence</li> <li>• Faible puissance</li> <li>• Une réponse lente</li> <li>• Taille plus petite</li> </ul>                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande taille</li> <li>• Difficile de synchroniser le déphasage.</li> </ul>                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Routage</li> <li>• Dispositifs photoniques intégrés</li> <li>• Traitement de signal.</li> </ul>                                                                                                                                    |
| Auto-collimation                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conception simple</li> <li>• Temp de simulation court</li> <li>• Faible puissance</li> <li>• Large bande de fréquence</li> </ul>                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible rapport de contraste.</li> <li>• Difficulté de fabrication</li> <li>• Nécessite des déphaseurs.</li> <li>• Grand taille</li> </ul>                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration de système hybride.</li> <li>• Traitement de signal.</li> <li>• Capteurs.</li> <li>• Décaleurs de fréquence.</li> </ul>                                                                                                |
| Effet de Kerr non linéaire<br><i>Cavités résonante</i><br><i>Résonateur en anneau</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indépendant de la phase</li> <li>• Taille généralement petite</li> <li>• Rapport contraste élevé.</li> <li>• Manipulation efficace de la lumière</li> <li>• Une large gamme de fonctionnement</li> <li>• Contrôle précis et flexibilité dans la conception.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large bande de fréquence étroite.</li> <li>• Puissance optique élevée</li> <li>• Effets thermiques</li> <li>• Une réponse rapide</li> </ul>                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulateur optique.</li> <li>• Atténuateurs,</li> <li>• Dispositifs de commutation.</li> <li>• Dispositifs de traitement du signal optique.</li> <li>• Détecteur optique.</li> <li>• Convertisseur de longueurs d'onde.</li> </ul> |
| Graphène                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Large plage de longueurs d'onde.</li> <li>• Excellent conducteur électrique</li> <li>• réponse optique ultra-rapide</li> <li>• stabilité thermique limitée</li> </ul>                                                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorption optique significative</li> <li>• Isolation électrique autour du graphène.</li> <li>• Difficulté de fabrication à grande échelle.</li> <li>• Sensibilité à l'environnement.</li> <li>• Stabilité thermique limitée.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modulateurs optiques, et les fibres optiques.</li> <li>• Capteurs optiques et les dispositifs optoélectroniques.</li> </ul>                                                                                                        |

**Tableau II-1** : Avantages et inconvénients des différentes techniques de conception des structures à base 2DPhC.

| Technique                                                  | Références | Type de structure<br>Additionneur | La taille de la<br>structure [ $\mu\text{m}^2$ ] | Rapport de contraste<br>[dB] |         | La<br>méthode de<br>simulation | La longueur<br>d'onde<br>[ $\mu\text{m}$ ] | Intensité<br>[ $\text{mW}/\mu\text{m}^2$ ] |
|------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|---------|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
|                                                            |            |                                   |                                                  | Somme                        | Retenue |                                |                                            |                                            |
| Les interférences                                          | [24]       | Demi additionneur                 |                                                  | 8.4                          | 9.3     | PWE/FDTD                       | 1.55                                       | **                                         |
|                                                            | [25]       | Demi additionneur                 | 137.5                                            | 9.3                          | 8.22    | PWE/FDTD                       | 1.55                                       | **                                         |
|                                                            | [26]       | Demi additionneur                 | 207.4                                            | 14.2                         | 6.53    | PWE/FDTD                       | 1.55                                       | **                                         |
|                                                            | [27]       | Demi additionneur                 | 1056                                             | 9.77                         | 6.98    | FDTD                           | 1.55                                       | **                                         |
|                                                            | [28]       | Demi additionneur                 | 72                                               |                              | 6.1     | PWE/FDTD                       | 1.55                                       | **                                         |
| Auto-collimation                                           | [29]       | Demi additionneur                 | 169                                              |                              |         | FDTD                           |                                            | **                                         |
|                                                            | [30]       | Demi additionneur                 | 75                                               |                              |         | PWE/FDTD                       | 1.5                                        | **                                         |
| Effet de Kerr non<br>linéaire<br>Cavités résonante         | [31]       | Demi additionneur                 | 303                                              | **                           | **      | **                             | 1.551                                      | 10                                         |
|                                                            | [32]       | Demi additionneur                 | 758.5                                            | 12.55                        | 17.95   | FDTD                           | *                                          | 10                                         |
|                                                            | [33]       | Demi additionneur                 | 396                                              | 12.47                        | 10      | **                             | *                                          | 100                                        |
|                                                            | [34]       | Demi additionneur                 | 115                                              | 13.32                        | 16.72   | FDTD                           | 1.55                                       | 800                                        |
|                                                            | [35]       | Additionneur complet              | 93                                               | 9.3                          | 15.25   | FDTD                           | 1.55                                       | 100                                        |
|                                                            | [36]       | Additionneur complet              | 71                                               | 13.22                        | 13.84   | FDTD                           | 1.55                                       | 9                                          |
| Effet de Kerr non<br>linéaire<br>(résonateur en<br>anneau) | [37]       | Demi additionneur                 | 251.6                                            | 13.86                        | 13.51   | FDTD                           | 1.55                                       | $5 \times 10^5$                            |
|                                                            | [38]       | Additionneur complet              | 439                                              | 12.04                        | 10.8    | FDTD                           | **                                         | $5 \times 10^5$                            |
|                                                            | [39]       | Additionneur complet              | 560                                              | 13.01                        | 16.02   | FDTD                           | **                                         | $4 \times 10^5$                            |
|                                                            | [40]       | Additionneur complet              | 1140                                             | 9.66                         | 13.92   | **                             | **                                         | $10^2$                                     |
|                                                            | [41]       | Additionneur complet              | 663                                              | 22.3                         | 19.94   | **                             | **                                         | $10^3$                                     |
| Graphène                                                   | [42]       | Additionneur complet              | 663                                              | 13.97                        | 12.34   | **                             | 1.55                                       | **                                         |

Tableau II-2 : Comparaison des différentes techniques pour construire des additionneurs à base 2DPhC.

\*\* : Non mentionné.

Malgré ces limites, la conception des additionneurs basées sur PhC non linéaire présente plusieurs avantages, la taille de la structure, et un rapport de contraste élevé entre le niveau logique à la sortie.

Chaque méthodologie a ses propres avantages et inconvénients. Cependant, après une revue détaillée, on se rend compte qu'une nouvelle conception d'un additionneur logique peut être conçue à l'aide de structures 2DPhC composées de tiges diélectriques dans l'air et dans le domaine non linéaire à effet kerr.

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes techniques de conception des structures 2DPhC et en particulier, la technique de conception à base des résonateurs en anneau non linéaire à effet de kerr. Ensuite, nous avons effectué une synthèse bibliographique des additionneurs à base 2DPhC et leurs méthodes de conception. Chaque méthodologie a ses propres avantages et inconvénients.

Nous avons sélectionné la méthode de conception à base des résonateurs en anneau non linéaire à effet de kerr pour étudier une nouvelle structure d'additionneur logique peut être conçue à l'aide de structures 2DPhC composées de tiges diélectriques dans l'air (Structure non déconnectée).

**Bibliographies**

1. N. M. D'souza, V. Mathew, Interference based square lattice photonic crystal logic gates working with different wavelengths, *Optics & Laser Technology*, Vol. 80, p. 214-219, (2016).
2. H. Mondal, M. Sen, K. Goswami “Design and analysis of all-optical 1-to-2 line decoder based on linear photonic crystal”, *IET, optoelectronic, welly*, vol. 13, issue 4, pp. 191-195, (2019).
3. Christina, X.S, Kabilan, A.P. Design of optical logic gates using self-collimated beams in 2D photonic crystal. *Photonic Sens* 2, 173–179 (2012).
4. Y. Jiang, S.B. Liu, H.F. Zhang, X.K. Kong, “Design of ultra-compact all optical half subtractor based on self-collimation in the two-dimensional photonic crystals”, *Optics communications* ,356, p. 325-329, (2015).
5. Tang, G.; Huang, H.; Liu, Y.; Wang, H. Compact Photonic Crystal Polarization Beam Splitter Based on the Self-Collimation Effect. *Photonics*, 8, 198, (2021).
6. L. Mokhtari, H. Badaoui, M. Abri, A. Mounzar, F. Lallam, and B. Rahmi, "Proposal of a New Efficient OR/XOR Logic Gates and All-Optical Nonlinear Switch in 2D Photonic Crystal Lattices," *Progress in Electromagnetics Research C*, Vol. 106, 187-197, (2020).
7. Elhachemi, K., Naoum, R., Vigneswaran, D. et al. Performance evaluation of all-optical NOT, XOR, NOR, and XNOR logic gates based on 2D nonlinear resonant cavity photonic crystals. *Opt Quant Electron* 53, 701 (2021).
8. Rahmi, B., Badaoui. H, Abri M. “Original architecture of an efficient all-optical  $2 \times 4$  photonic crystals decoder based on nonlinear ring resonators”. *Opt Quant Electron* 54, 676 (2022).
9. V. Fakouri-Farid, A. Andalib “Design and Simulation of an all optical photonic crystal-based comparator”, *Optik*, june 2018.
10. Mehdizadeh, F., Soroosh, M., Alipour-Banaei, H. et al. “All optical 2-bit analog to digital converter using photonic crystal-based cavities”. *Opt Quant Electron* 49, 38 (2017).
11. S. Naghizade, S. Mohammadi and H. Khoshsima, “Design and simulation of an all optical 8 to 3 binary encoders based on optimized photonic crystal OR gates”, *Journal of Optical Communications*, Vol. 42, pp. 31-41 Jan. 2018.

12. A. Mounzar, H. Badaoui, M. Abri, "16-channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/1.55 $\mu$ m in 2D photonic crystal slab", *Optik, International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 193, April 2019.
13. Liaghati-Rad, M., Soroosh, M. & Kosarian, A. High-speed all-optical 2-bit multiplier based on photonic crystal structure. *Photon Netw Commun* 43, 193–203 (2022).
14. L. Motktari, H. Badaoui, M. Abri, B. Rahmi, "Efficient 1 $\times$ 2, 1 $\times$ 4, 1 $\times$ 8 and 1 $\times$ 6 photonic crystal filters /power splitters base ring resonators for modern passive optical network PON", *Modern physics Letters B*, pp ISSN 0217-9849.
15. N. Khajeheian, J. Jamali, M. Fatehi-Dindarlou, M. Taghizadeh, "An all optical full subtractor based on nonlinear photonic crystals", *Optik*, Volume 245, 2021, 167751, ISSN 0030-4026,
16. Nima Namdari and Reza Talebzadeh, "Simple and compact optical half-subtractor based on photonic crystal resonant cavities in silicon rods," *Appl. Opt.* 59, 165-170 (2020)
17. Mehdizadeh, F., Soroosh, M. A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities. *Photon Netw Commun* 31, 65–70 (2016).
18. Saleh Naghizade, Azadeh D.B, Hamed Saghaei, Maryam Etehad, An electro-optic comparator based on photonic crystal ring resonators covered by graphene nanoshells, *Optik*, Volume 283, 170898, ISSN 0030-4026, (, 2023).
19. Nayeri Raad, A., Saghaei, H. & Mehrabani, Y.S. An optical 2-to-4 decoder based on photonic crystal X-shaped resonators covered by graphene shells. *Opt Quant Electron* 55, 452 (2023).
20. Fatemeh Baraty, Samaneh Hamed, Design of a 2D photonic crystal biosensor using X-shape ring resonator based on Graphene Oxide (GO) for detection of blood components, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 36:17, 2401-2418, (2022).
21. Fatemeh G, Samad R.E, Sepehr Razi, Graphene based photonic crystal optical filter: Design and exploration of the tunability, *Physics Letters A*, Vol. 383, Issue 21, p. 2551-2560, (2019).
22. Naghizade S, Saghaei H. Ultra-fast tunable optoelectronic half adder/subtractor based on photonic crystal ring resonators covered by graphene nanoshells. *Opt Quant Electron* 53, 380 (2021).
23. Karkhanehchi, M.M., Parandin, F. & Zahedi, A. Design of an all optical half-adder based on 2D photonic crystals. *Photon Netw Commun* 33, 159–165 (2017).

24. Abdollahi, M., Parandin, F. A novel structure for realization of an all-optical, one-bit half-adder based on 2D photonic crystals. *J Comp. Electron* 18, 1416–1422 (2019).
25. Mahmood Seifouri, Saeed Olyae, Mostafa Sardari, Ahmad M-B, Ultra-fast and compact all-optical half adder using 2D photonic crystals, *IET Optoelectronics*, Vol. 13, Issue 3, p. 139-143, (2019).
26. Saadi, K., Kashaninia, A. Sabbaghi. N, R. “All-optical half adder based on triangular lattice photonic crystals with uniform structural parameters, *Photon Netw Commun* 43, 204–211 (2022).
27. S. Serajmohammadi, H. Alipour. B, and Farhad Mehdizadeh, "Proposal for realizing an all-optical half adder based on photonic crystals," *Appl. Opt.* 57, 1617-1621 (2018).
28. Vali-Nasab, AM., Mir, A. & Talebzadeh, R. Design and simulation of an all optical full-adder based on photonic crystals. *Opt Quant Electron* 51, 161 (2019).
29. Susan C. Xavier, Kabilan Arunachalam, Elizabeth Caroline, William Johnson, "Design of two-dimensional photonic crystal-based all-optical binary adder," *Opt. Eng.* 52(2), (2013).
30. Jalali-Azizpoor, M.R., Soroosh, M, Seifi-Kavian, Y. Application of self-collimated beams in realizing all-optical photonic crystal-based half-adder. *Photon Netw Commun* 36, 344–349 (2018).
31. Neisy, M., Soroosh, M. & Ansari-Asl, K. All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities. *Photon Netw Commun* 35, 245–250 (2018).
32. Naghizade, S., Saghaei, H. A novel design of fast and compact all-optical full-adder using nonlinear resonant cavities. *Opt Quant Electron* 53, 262 (2021).
33. F. Cheraghi, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, An ultra-compact all optical full adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities, *Superlattices and Microstructures*, Volume 113, p. 359-365, (2018).
34. Maleki, M.J., Mir, A. & Soroosh, M. Designing an ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal cavities. *Opt Quant Electron* 52, 196 (2020).
35. Maleki, M.J., Mir, A. & Soroosh, M. Ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities. *Photon Netw Commun* 41, 93–101 (2021).
36. M.J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, Design and analysis of a new compact all-optical full-adder based on photonic crystals, *Optik*, Volume 227, 166107, ISSN 0030-4026, (2021).

37. Keivan Saadi, Alireza Kashaninia, Reza Sabbaghi-Nadooshan, All-optical half adder based on non-linear triangular lattice photonic crystals with improved contrast ratio, *IET Optoelectronics*, Vol. 15, Issue1, p. 20-26, (2021).
38. Hamed Alipour-Banaei, Hamed Seif-Dargahi, Photonic crystal based 1-bit full-adder optical circuit by using ring resonators in a nonlinear structure, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, Volume 24, P. 29-34, (2017).
39. M. Moradi, M. Danaie, A. Asghar Orouji, Design and analysis of an optical full-adder based on nonlinear photonic crystal ring resonators, *Optik*, Volume 172, p. 127-136, (2018).
40. Mohammad Reza Geraili, Seyed Ebrahim Hosseini, Mohammad Bagher Tavakoli, Mehrdad Shokooch-Saremi, A proposal for an all-optical full adder using nonlinear photonic crystal ring resonators, *Optik*, Volume 199, (2019).
41. Naghizade, S., Saghaei, H. A novel design of all-optical full-adder using nonlinear X-shaped photonic crystal resonators. *Opt Quant Electron* 53, 154 (2021).
42. Saleh Naghizade, Hamed Saghaei, Ultra-fast tunable optoelectronic full-adder based on photonic crystal ring resonators covered by graphene nanoshells, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Volume 142, (2022).

# Chapitre III :

## **Conception des additionneurs à 1-bit tout optique 2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires**

### III.1 Introduction

L'objectif principale de ce chapitre est consacré à l'étude de conception des structures tout optique à base des cristaux photoniques bidimensionnels 2D. Nous proposons deux structures d'additionneurs en utilisant des résonateurs en anneaux non-linéaire à effet kerr. Les méthodes numériques avancées FEM (Finite Element Method) et PWEM (Plane Wave Expansion Method) peuvent être utilisées pour simuler la distribution de champ électromagnétique à l'intérieur des structures proposées, et de calculer le diagramme de bandes de cristaux photoniques périodiques. Le logiciel COMSOL Multiphysique est basé sur ces méthodes a été utilisé pour les simulations des structures proposées dans ce travail.

Ce chapitre est organisé comme suit, le diagramme de bande interdite photonique a été simulé à partir des paramètres physiques, le résonateur en anneau non-linéaire, les structures proposées demi-additionneur et additionneur complet ont été simulées autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  et comparées avec les additionneurs existants dans la littérature et se terminant par une conclusion.

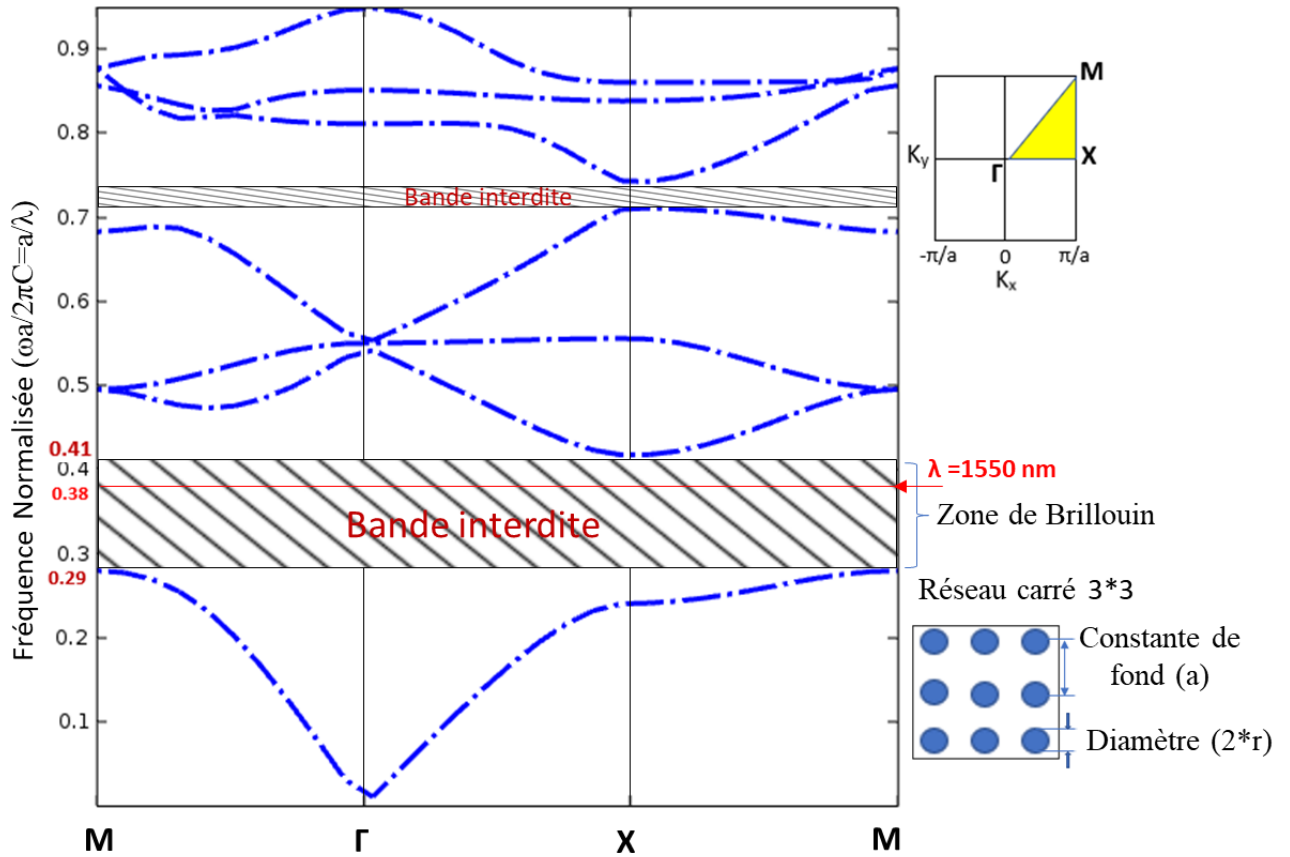
### III.2 Diagramme de bande interdite photonique

Dans cette section, nous avons étudié le diagramme de bande interdite pour obtenir les paramètres géométriques et physiques de la structure photonique, tel que le rayon de tige diélectrique ( $r$ ) et la constante de fond ( $a$ ) ( $a$  : est la distance entre les centres de deux tiges adjacentes). Le diagramme de bande de la structure a été calculé en utilisant la méthode de décomposition en ondes plane (plane wave expansion method PWEM) du logiciel COMSOL Multiphasiques [1].

La suture du crystal photonique à deux dimensions 2D est composée par une matrice carrée  $3 \times 3$  de tiges cylindriques diélectriques de Silicium (Si) distribué dans l'air. Les tiges diélectriques sont caractérisées par un indice de réfraction  $n=3.476$  autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  [2], un rayon «  $r$  » et une constante de fond «  $a$  ».

D'après le diagramme de bande photonique présenté ci-dessous sur la **figure III-1**, la première bande interdite pour le mode TE de la structure proposée correspond la zone Brillouin dans l'intervalle de la fréquence normalisée :  $0.29 < a/\lambda < 0.41$ , ce qui donne une plage de longueurs d'ondes [1443- 2041] nm. Cette plage de longueurs d'ondes couvre les bandes de communication optique C et L, ils ont été choisis pour cette étude. Le diagramme de bande

interdite photonique (BIP) et la zone de Brillouin (zone hachurée) de la structure du crystal photonique sont illustrées sur la **figure III-1**.



**Figure III-1** : Diagramme de bande interdite de photonique.

D'après l'étude paramétrique de la structure 2DPhC, les paramètres choisis sont :

- Le rayon de la tige :  $r = 118$  nm.
- Constante de réseau de fond (distance entre de tiges voisins) :  $a = 592$  nm.

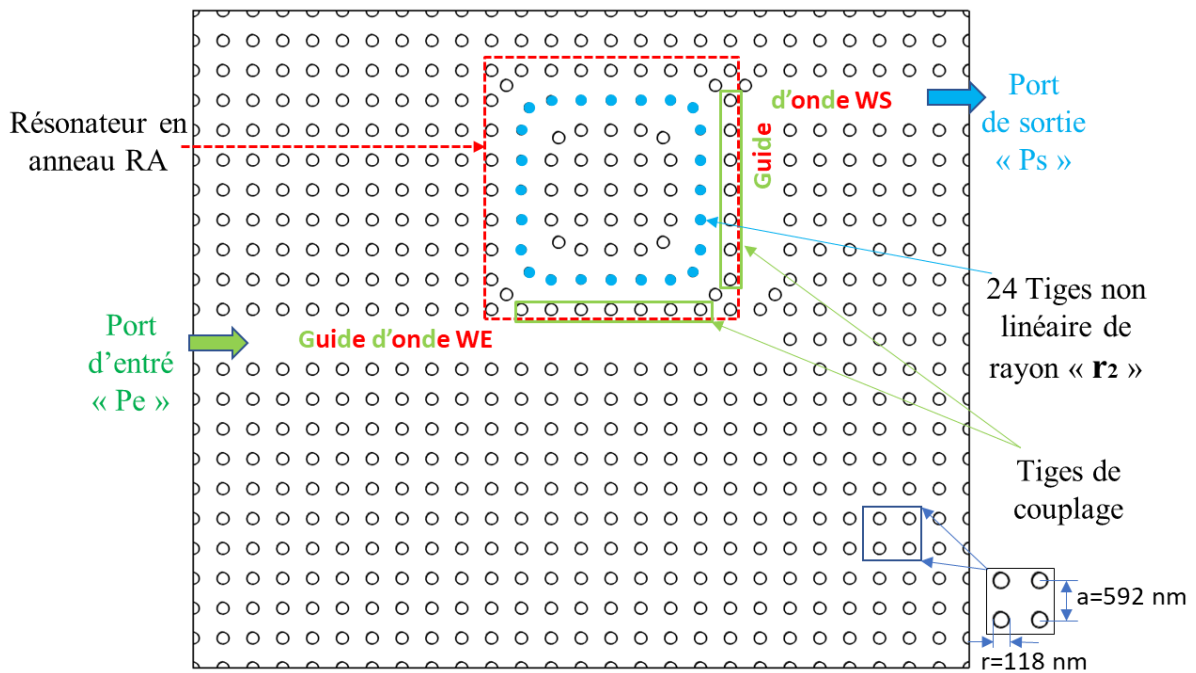
### III.3 Résonateur en anneau à crystal photonique non-linéaire

Dans cette section, nous avons étudiés le résonateur en anneau non-linéaire. On commence tout d'abord par un simple résonateur en anneau ; Ensuite, double résonateur en anneau sera étudié. Et enfin, nous avons identifiés l'idée principale pour appliquer les résonateurs en anneaux non-linéaires dans nos additionneurs proposés.

#### III.3.1 Résonateur à simple anneau

Dans un premier temp, un résonateur en anneau a été réalisé sur un crystal photonique à réseau carré avec un constante périodique  $a=592$  nm et un rayon de tiges diélectriques  $r=118$

nm, La structure est construite par un guide d'onde d'entrée WE, un guide d'onde de sortie WS et un résonateur en anneau RE sépare les deux guides d'ondes. Pour créer les guides d'onde d'entrée et de sortie, en supprimant 20 tiges diélectriques dans la direction horizontale et 12 tiges dans la direction verticale/horizontale comme montré sur la **figure III-2**. Le résonateur en anneau RA est obtenu en supprimant 24 tiges diélectriques sous la forme d'un carré et remplacés par 24 tiges diélectriques non-linéaires en verre dopé de rayon  $r_2$ . La **figure III-2** montre le résonateur en anneau non-linéaire à 2DPhC proposé. Le résonateur contient un port d'entrée  $P_e$  et un port de sortie  $P_s$ .



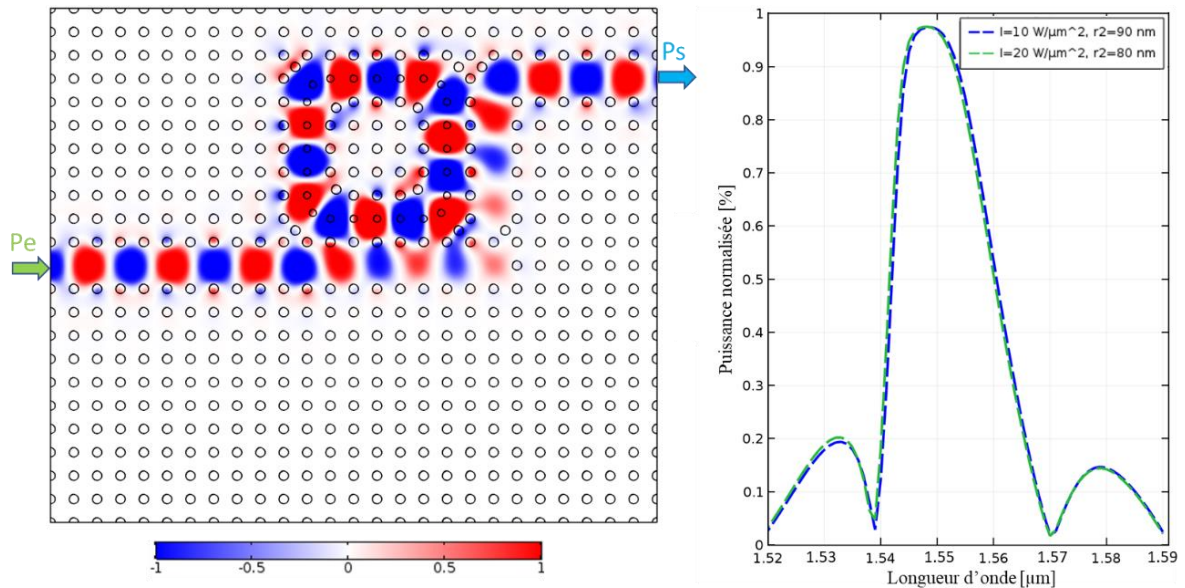
**Figure III-2** : Le résonateur en anneau non-linéaire à crystal photonique proposé.

L'indice de réfraction des tiges non-linéaires en verre dopé dépend de l'intensité est représenté par la formule [3] :  $n = n_0 + n_1 \times I$ , où  $n_0$ ,  $n_1$  et  $I$  sont l'indice de réfraction linéaire, coefficient de Kerr non linéaire, et l'intensité optique du signal d'entrée. L'indice de réfraction linéaire  $n_0$  et le coefficient de Kerr non linéaire  $n_1$  en verre dopé sont d'environ de 1.4 et  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ , respectivement [7]. A l'aide de l'logiciel COMSOL, Nous avons simulé le résonateur en anneau RA pour différentes valeurs des paramètres de rayon  $r_2$  (rayon des tiges non-linéaires) et de l'intensité de puissance «  $I$  ».

Au début, l'intensité de puissance de signal d'entrée a été fixée à  $10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ , et on varie la valeur de rayon «  $r_2$  » jusqu'à atteindre la résonance autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ . Donc, comme montre la **figure III-3**, le maximum de puissance normalisée est autour de la

longueur d'onde avec une intensité  $I= 10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  et un rayon  $r_2= 90 \text{ nm}$ , Cela est dû au couplage de la puissance du guide d'onde WE vers le résonateur en anneau RA.

Maintenant de la même chose, on fixe l'intensité de puissance  $I= 20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ , et on varie le paramètre «  $r_2$  » jusqu'à atteindre la résonance autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ . La **figure III-3** montre avec une intensité de puissance  $I= 20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  et un rayon  $r_2= 80 \text{ nm}$ , la puissance de sortie normalisée est atteinte le maximum autour de la longueur d'onde  $1.55 \mu\text{m}$  en raison d'existence un mode guidé.



**Figure III-3** : Simulation le résonateur en anneau ( $I=10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ,  $r_2=90 \text{ nm}$  et  $I=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ,  $r_2=80 \text{ nm}$ ), distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée (à droite).

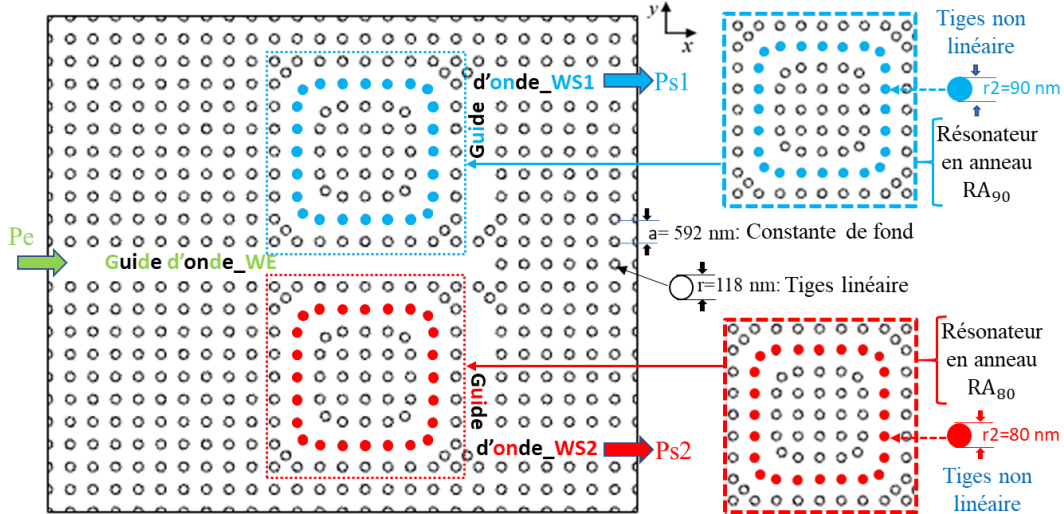
La **figure III-3** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée. D'après le graphe de puissance normalisée, les deux cas ( $I=10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ,  $r_2=90 \text{ nm}$ ) et ( $I=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ,  $r_2=80 \text{ nm}$ ) sont superposés.

Dans ce cas, l'idée est de concevoir deux résonateurs en anneaux parallèle (*Dual Ring Resonators*)  $RA_{90}$  ( $r_2=90 \text{ nm}$ ) et  $RA_{80}$  ( $r_2=80 \text{ nm}$ ) avec un seul guide d'onde d'entrée WE et deux ports de sorties Ps1 et Ps2.

### III.3.2 Résonateur à double anneau

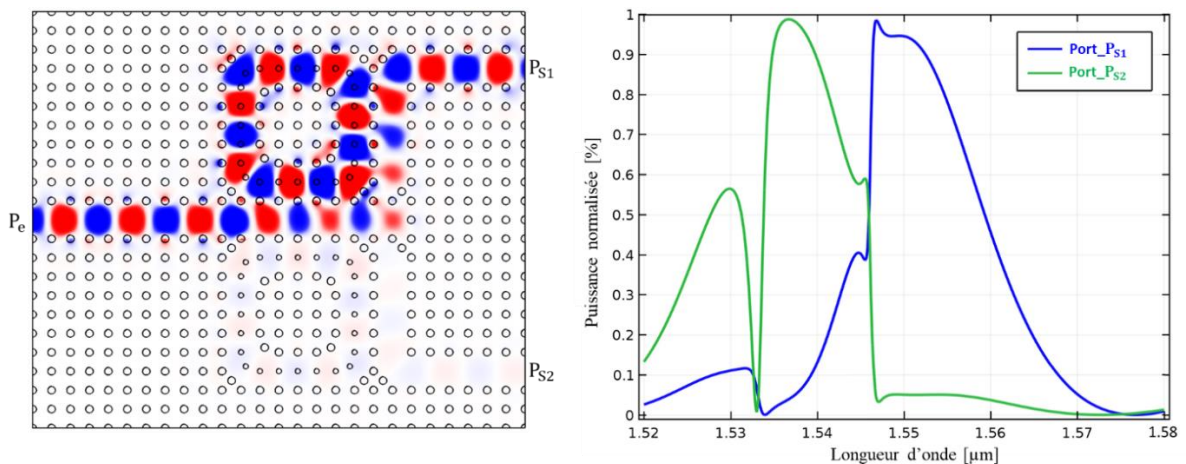
Deux résonateurs en anneaux à cristaux photoniques non-linéaires ( $RA_{90}$  et  $RA_{80}$ ) avec trois guides d'ondes optiques (WE, WS2, WS3) sont créés à l'intérieur de la structure du résonateur à double anneau. Les guides d'ondes sont formés en enlevant certaines tiges diélectriques dans la structure, les résonateurs en anneaux  $RA_{90}$  et  $RA_{80}$  sont formés en supprimant 24 tiges diélectriques pour chaque anneau et remplacés par 24 tiges diélectriques

non-linéaires en verre dopé de rayon sont respectivement de 90 nm et 80 nm. La structure se compose d'un port d'entrée nommé  $P_e$ , et deux ports de sortie nommés  $P_{s1}$  et  $P_{s2}$ . La **figure III-4** montre le résonateur à double anneau proposé.



**Figure III-4** : Double résonateur en anneau à crystal photonique proposé.

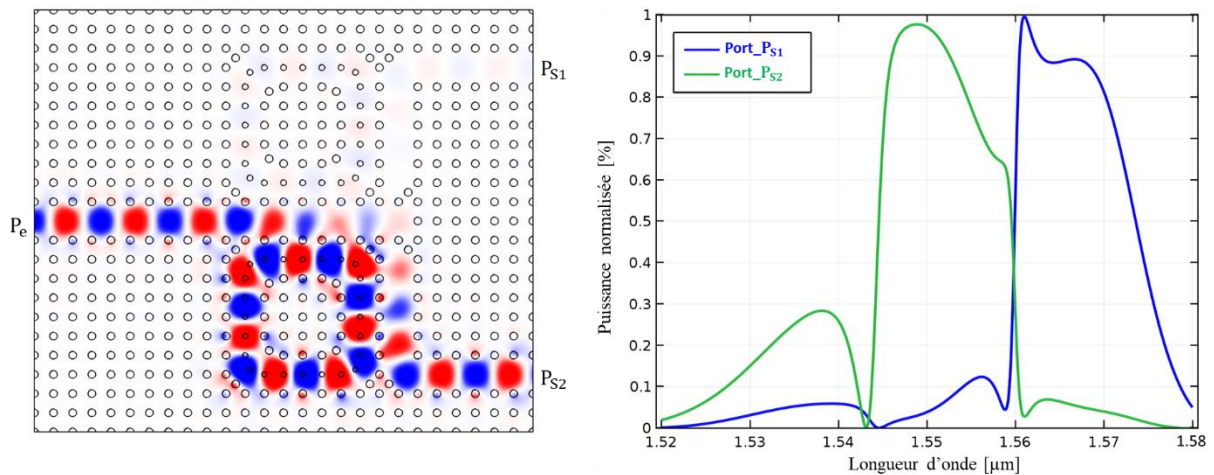
Si on utilise une source laser pour injecter un signal optique via le port d'entrée  $P_e$  à la longueur d'onde  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  et l'intensité optique  $I=10\text{W}/\mu\text{m}^2$ . Dans ce cas, les longueurs d'onde de résonance des résonateurs en anneau  $RA_{90}$  et  $RA_{80}$  sont respectivement de  $1,55 \mu\text{m}$  et  $1,538 \mu\text{m}$ . Autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ , le signal optique se propage dans le guide d'onde WE vers le port de sortie  $P_{s1}$  à travers le résonateur  $RA_{90}$ , cela est dû au couplage de la puissance des guides d'onde (WE, WS1) et le résonateur en anneau  $RA_{90}$ , et par conséquent le port de sortie  $P_{s1}$  sera activé. Dans ce cas, la puissance normalisée au port de sortie  $P_{s1}$  est d'environ de 95 %.



**Figure III-5** : Simulation double résonateur en anneau à crystal photonique (cas 1 :  $I_0=10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ), distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée (à droite).

La **figure III-5** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée dans le où l'intensité de puissance  $I_0=10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ .

Si on injecte un signal optique via le port d'entrée  $P_e$  à la longueur d'onde  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  et l'intensité optique  $2 \times I_0=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ . Dans ce cas, l'indice de réfraction des tiges diélectrique non-linéaire (bleue et rouge) en verre dopé augmente et les longueurs d'onde de résonance des résonateurs non linéaires  $RA_{90}$  et  $RA_{80}$  se décalent vers des longueurs d'onde plus courtes. En conséquence, les longueurs d'onde de résonance des résonateurs sont respectivement  $1,55 \mu\text{m}$  et  $1,562 \mu\text{m}$ .



**Figure III-6** : Simulation double résonateur en anneau à crystal photonique (cas 2 :  $2 \times I_0=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ ), distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée (à droite).

Autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ , le signal optique se propage dans le guide d'onde  $W1$  vers le port de sortie  $P_{S2}$  à travers le résonateur  $RA_{80}$ , cela est dû au couplage de la puissance des guides d'onde ( $WE$ ,  $WS2$ ) et le résonateur en anneau  $RA_{80}$ , et par conséquent le port de sortie  $P_{S2}$  sera activé. Dans ce cas, la puissance normalisée au port de sortie  $P_{S2}$  est d'environ de 97 %. La **figure III-6** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée dans le cas où l'intensité de puissance  $I_0=20 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ .

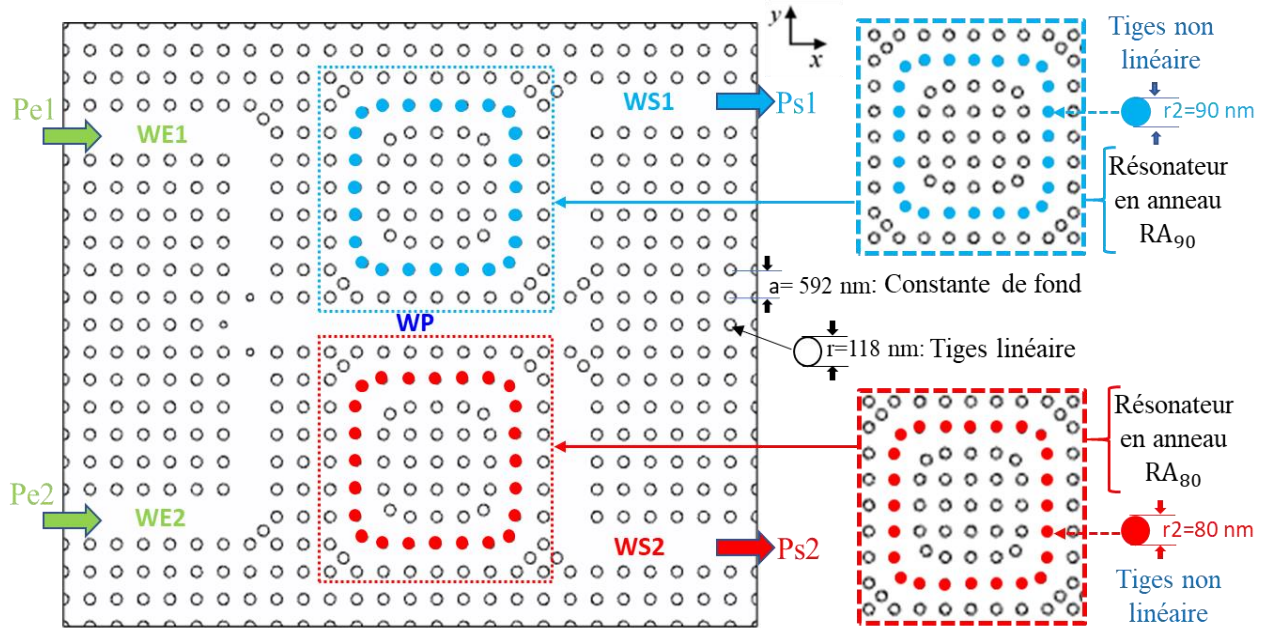
Comme conclusion, l'idée est de concevoir une structure 2DPhC (*demi-additionneur*) avec deux entrées  $Pe1$  et  $Pe2$ , double résonateur en anneau et deux sorties.

### III.4 Conception demi-additionneur à base des résonateurs en anneau non-linéaires

Dans cette section, Nous proposons une nouvelle structure numérique toute optique en utilisant deux résonateurs en anneaux parallèles non-linéaires (*dual ring resonator*). Les signaux

optiques aux ports d'entrée  $Pe1$  et  $Pe2$  ont été guidées vers le guide principal  $WP$  pour le couplage avec les résonateurs en anneaux  $RA_{90}$  et  $RA_{80}$ , cela est dépendant le phénomène non-linéaire à l'effet de Kerr.

Deux résonateurs en anneau non linéaires ( $RA_{90}$  et  $RA_{80}$ ) avec cinq guides d'ondes optiques ( $WE1$ ,  $WE2$ ,  $WP$ ,  $WS1$  et  $WS2$ ) sont créés à l'intérieur de la structure fondamentale de demi-additionneur. La structure se compose de deux ports d'entrée nommés  $Pe1$  et  $Pe2$ , et deux ports de sortie nommés  $Ps1$  et  $Ps2$ , comme illustré sur la **figure.III-7**.



**Figure III-7** : La structure de demi-additionneur proposée.

La structure fonctionne comme un circuit logique appelé « demi-additionneur » permettant de réaliser une addition arithmétique entre deux nombres chacun sur un bit. Le circuit prend en entrée ( $Pe1$ ,  $Pe2$ ) deux bits  $A_0$  et  $B_0$ ; et à la sortie ( $Ps1$ ,  $Ps2$ ) on va avoir la somme  $S$  et la retenue  $R$  (Carry : en anglais), comme illustré sur la **figure III-8**.

La méthode des éléments finis FEM [4-5] a été utilisée pour effectuer les calculs de la distribution du champ électrique à l'intérieur de la structure à cristal photonique 2D proposée.

Les signaux aux ports d'entrée  $A_0$  et  $B_0$  sont définis comme "1" et "0" logique. Nous avons simulé quatre cas suivant la table de vérité de la **figure III-8**.

Les **figures III-9,10,11** et **12** montrent la distribution du champ électrique à l'intérieur de circuit demi-additionneur, et le diagramme de la puissance optique normalisée de la somme «  $S_0$  » et la retenue «  $R_0$  » pour les différents cas de la table de vérité.



| Cas#n | A <sub>0</sub> | B <sub>0</sub> | S <sub>0</sub> | R <sub>0</sub> |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| #1    | 0              | 0              | 0              | 0              |
| #2    | 1              | 0              | 1              | 0              |
| #3    | 0              | 1              | 1              | 0              |
| #4    | 1              | 1              | 0              | 1              |

Figure III-8 : Le schéma et la table de vérité du circuit demi-additionneur.

**Cas #1** : Lorsque deux ports d'entrée sont à l'état OFF ( $A_0 = B_0 = 0$ ), la puissance optique dans les ports de sortie somme «  $S_0$  » et retenue «  $R_0$  » sont de l'état logique "0", comme montre la figure III-9 correspond au cas  $A_0$  et  $B_0$  à l'état "OFF".

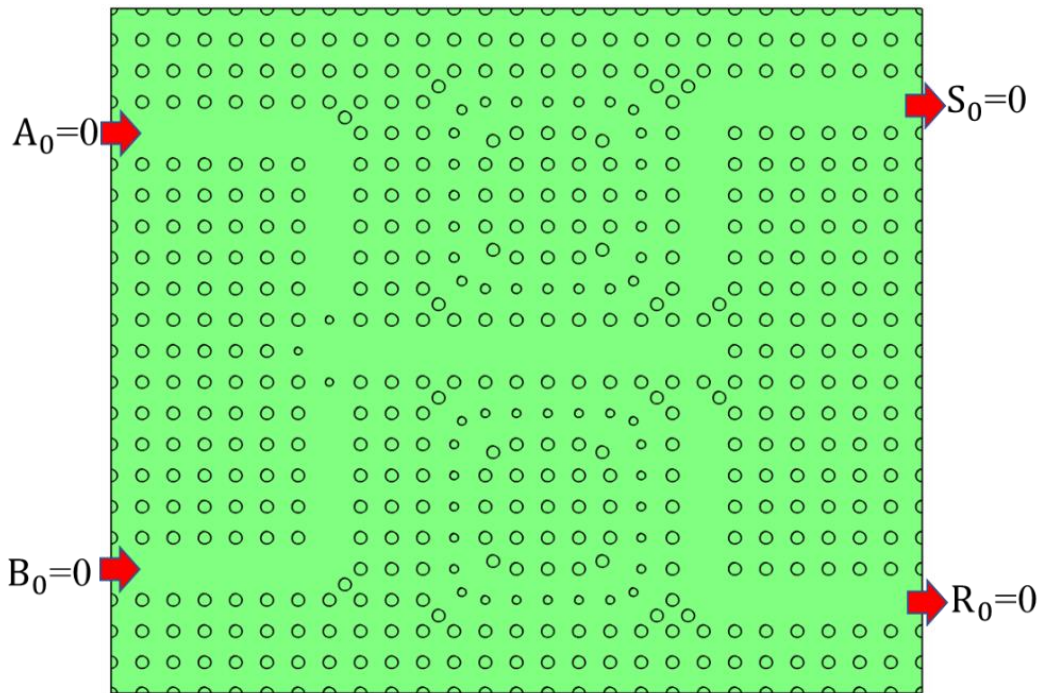
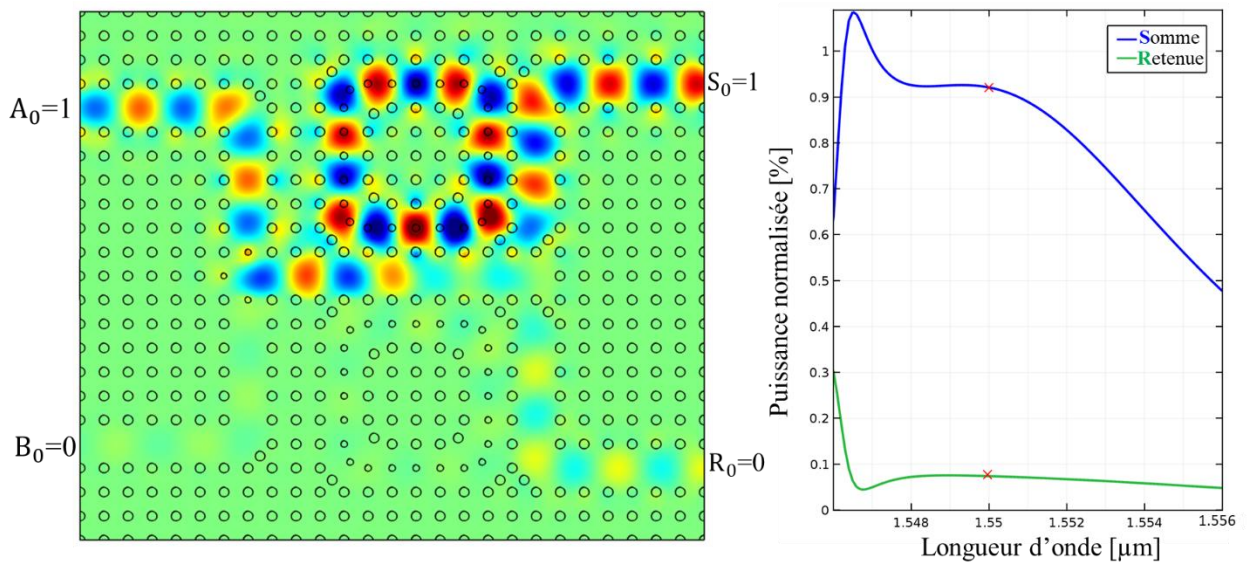


Figure III-9 : La structure du demi-additionneur dans le cas initial (Cas#1 :  $A_0=0$  et  $B_0=0$ ).

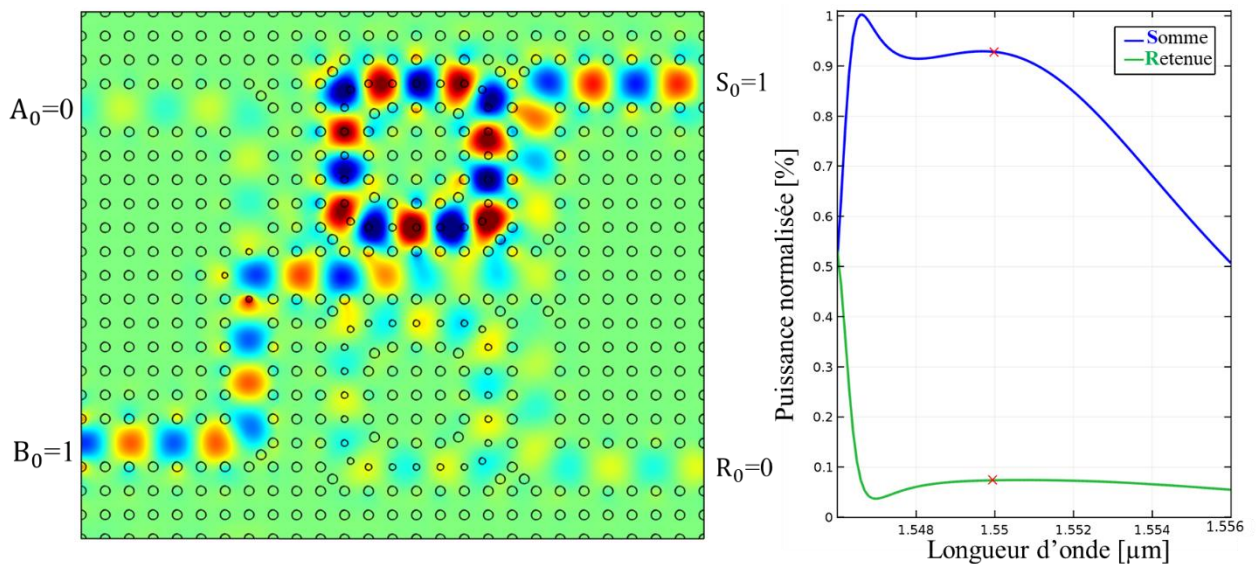
**Cas#2 et #3** : Lorsque l'un des deux ports d'entrée est active ( $A_0 = 1$  et  $B_0=0$  ou  $A_0=0$  et  $B_0=1$ ), On utilise une source laser pour injecter un signal optique via le port active ( $A_0$  ou  $B_0$ ), à la longueur d'onde  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  et l'intensité optique  $I_0=10\text{W}/\mu\text{m}^2$ . La longueur d'onde de résonance du résonateur en anneau  $RA_{90}$  est égal à la longueur d'onde du signal optique d'entrée de port active, le signal optique se propage dans le guide d'onde WP vers le port de sortie Ps1 à travers le résonateur  $RA_{90}$ , cela est dû au couplage de la puissance du guide d'onde (WP, WS1) et le résonateur en anneau  $RA_{90}$  et par conséquent le port de sortie de la somme «  $S$  » est

à l'état ON. La longueur d'onde de résonance du résonateur en anneau RA<sub>80</sub> est différente de la longueur d'onde du signal optique d'entrée, donc le signal optique ne se propage pas vers le port de sortie Ps2 de la retenue « R<sub>0</sub> ».

L'état logique de port de sortie somme « S<sub>0</sub> » est de "1" et l'état logique du port de sortie retenue « R<sub>0</sub> » est de "0". La **figure III-10** et **11** montrent la distribution du champ électrique à l'intérieur du demi-additionneur et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme « S<sub>0</sub> » et la retenue « R<sub>0</sub> » pour le cas de l'un des deux ports A<sub>0</sub> où B<sub>0</sub> à l'état "ON".



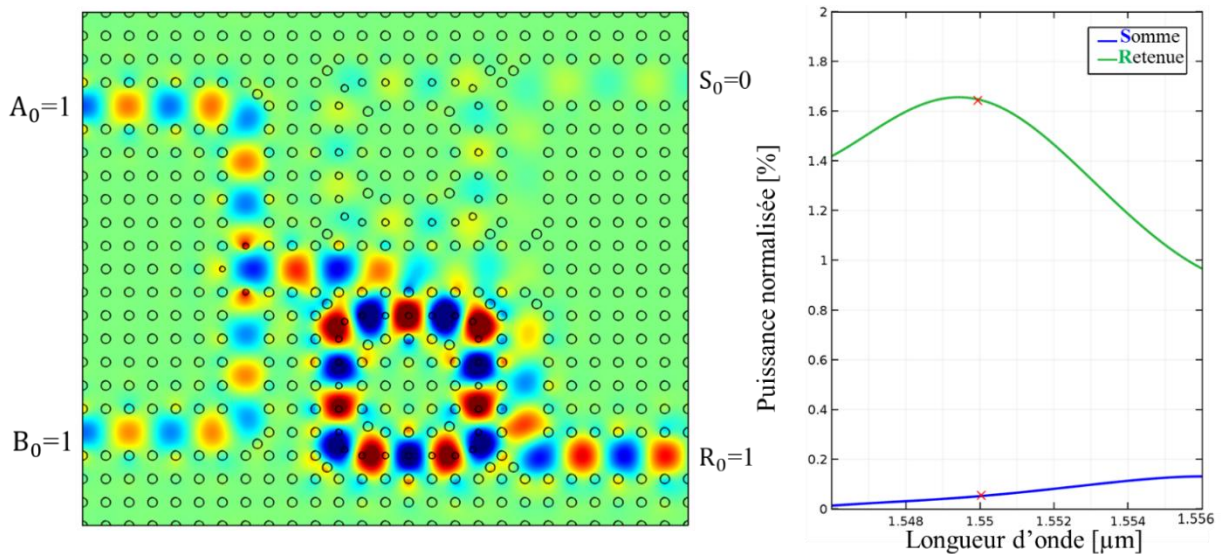
**Figure III- 10** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#2 : A<sub>0</sub>=1 et B<sub>0</sub>=0).



**Figure III-11** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#3 : A<sub>0</sub>= 0 et B<sub>0</sub>=1).

**Cas#4** : Lorsque deux ports d'entrée sont activés ( $A_0 = 1$  et  $B_0 = 1$ ), On utilise deux sources laser pour injecter un signal optique pour chaque port active ( $A_0$  et  $B_0$ ), à la longueur d'onde  $\lambda=1,55 \mu\text{m}$  et l'intensité optique  $I_0=10\text{W}/\mu\text{m}^2$ . L'intensité optique du signal au niveau de guide d'onde WP a été augmentée et il est égal à  $2 \times I_0$ , en raison de l'effet Kerr non-linéaire, le signal optique sera transféré de WP vers WS2 à travers le résonateur en anneau  $RA_{80}$ , dans ce cas la puissance optique est transmise vers le port de sortie Ps2 de retenue «  $R_0$  ». La longueur d'onde de résonance du résonateur en anneau  $RA_{90}$  est différente de la longueur d'onde des signaux optique d'entrée, donc le signal optique ne se propage pas vers le port de sortie Ps1 de la somme «  $S_0$  ».

L'état logique des ports de sortie somme «  $S_0$  » est de "0" et l'état logique du port de sortie retenue «  $R_0$  » est de "1". La **figure III-12** montre la distribution du champ électrique à l'intérieur du demi-additionneur et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme «  $S$  » et la retenue «  $R$  » pour le cas de  $A_0$  et  $B_0$  à l'état "ON".



**Figure III-12** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#4 :  $A_0=B_0=1$ ).

Les résultats de simulations pour les différents cas sont présentés dans le **tableau III-1**. Lorsque les deux entrées  $A_0$  et  $B_0$  sont à différents états logiques, la sortie du port Ps1 de la somme «  $S$  » est à un niveau logique de "1" et le port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_0$  » est à un niveau logique de "0". D'autre part, quand les deux entrées  $A_0$  et  $B_0$  sont à un niveau logique de "1", la sortie de la somme «  $S_0$  » est à un niveau logique de "0" et la sortie de retenue «  $R_0$  » est à un niveau logique de "1". Par conséquent, les résultats de la simulation montrent que la

structure proposée autour de la longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$  correspond circuit arithmétique « demi-additionneur ». Le rapport de contraste est un paramètre de performance important pour évaluer et examiner des dispositifs toute optique tel que les commutateurs logiques, décodeurs, additionneurs, portes logiques...etc. Le rapport de contraste est lié directement au paramètre Signal/Bruit (*SNR : signal to noise ratio*). De plus, le taux d'erreur binaire (*BER : bit error rate*) est inversement proportionnel au rapport de contraste de la structure, donc les performances augmentent avec un rapport de contraste important [6]. Le rapport de contraste (*CR : contrast ratio*) est calculé à l'aide de la formule suivante :  $CR=10*\log [P_{ON}/P_{OFF}]$

- $P_{ON}$  : est le puissance minimum optique de la sortie de niveau logique "1".
- $P_{OFF}$  : est le maximum puissance optique de sortie de niveau logique "0".

| Entrées |       | Somme « S »  |              |                          | Retenue « R » |              |                          |
|---------|-------|--------------|--------------|--------------------------|---------------|--------------|--------------------------|
| $A_0$   | $B_0$ | Etat logique | CR [dB]      | Puissance Normalisée [%] | Etat logique  | CR [dB]      | Puissance Normalisée [%] |
| 0       | 0     | 0            |              | -                        | 0             |              | -                        |
| 1       | 0     | 1            |              | 92                       | 0             |              | 7                        |
| 0       | 1     | 1            |              | 94                       | 0             |              | 7                        |
| 1       | 1     | 0            | <b>13.62</b> | 4                        | 1             | <b>13.67</b> | 163                      |

**Tableau III-1** : Table de vérité de demi-additionneur.

Les rapports de contraste pour les sorties de la somme « S » et la retenue « R » sont respectivement de 13,62 dB et 13,67 dB.

#### III.4.1 Comparaison demi additionneur proposé avec les structures existantes

Le **Tableau III-2**, représente la comparaison de l'additionneur proposé et les travaux existants dans littérature en termes de défaut, technique utilisée, intensité de puissance, la taille de la structure, les puissances normalisées et les rapports de contraste de la somme et la retenue. Un certain nombre des caractéristiques n'ont pas été discutés dans les articles récents « \*\* ». L'intensité optique de demi-additionneur proposé est diminué en comparaison avec l'article de référence [13] basées sur la même technique de résonateur en anneau à effet Kerr non-linéaire. La taille totale de la structure est égale à 198,9  $\mu\text{m}^2$  avec les dimensions de 15,3 $\times$ 13  $\mu\text{m}^2$ , la taille est plus petite en comparant avec les autres structures [7-14], comme mentionné dans le **tableau III-2**.

D'autre part, une différence significative des puissances normalisées de l'état logique 1 et l'état logique 0 obtenues à la sortie de la somme et la retenue, ce qui permet donner des rapports de contraste important on les comparant avec les articles récents [7-14]

| Référence              | Défauts                                      | Technique utilisée                                  | Intensité<br>[mW/ $\mu\text{m}^2$ ] | Taille de structure<br>[ $\mu\text{m}^2$ ] | Somme         |           | Rapport<br>de<br>contraste<br>[dB] | Retenue       |          | Rapport de<br>contraste<br>[dB] |
|------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|-----------|------------------------------------|---------------|----------|---------------------------------|
|                        |                                              |                                                     |                                     |                                            | Puissance [%] |           |                                    | Puissance [%] |          |                                 |
|                        |                                              |                                                     |                                     |                                            | Logique 1     | Logique 0 | Logique 1                          | Logique 0     |          |                                 |
| [7]                    | Défauts ponctuels                            | Effet kerr&Non-linéaire                             | 10                                  | 303                                        | 70            | 0         | **                                 | 170           | 5        | **                              |
| [8]                    | Défauts ponctuels/linéaires                  | Effet d'interférences constructives et destructives | **                                  | **                                         | 50            | 24        | 3.19                               | 98            | 26       | 5.76                            |
| [9]                    | Résonateur en anneau                         | Effet d'interférences constructives et destructives | **                                  | 1056                                       | 95            | 10        | 9.77                               | 95            | 19       | 6.98                            |
| [10]                   | Défauts ponctuels/linéaires                  | Effet d'interférences constructives et destructives | **                                  | **                                         | 48.9          | 3.3       | 11.67                              | 54            | 3        | 12.51                           |
| [11]                   | Résonateur en anneau                         | Effet kerr&Non-linéaire                             | **                                  | **                                         | 90            | **        | **                                 | 155           | **       | **                              |
| [12]                   | Défauts ponctuels/linéaires                  | Effet kerr& Non-linéaire                            | 300                                 | 249.7                                      | **            | **        | **                                 | **            | **       | **                              |
| [13]                   | Résonateur en anneau                         | Effet kerr&Non-linéaire                             | $5.10^5$                            | 251.6                                      | 73            | 3         | 13.86                              | 101           | 4.5      | 13.51                           |
| [14]                   | Défauts linéaires                            | Effet d'interférences constructives et destructives | **                                  | 207.4                                      | 79            | 3         | 14.2                               | 81            | 18       | 6.53                            |
| <b>Travail proposé</b> | <b>Double Résonateur en anneau parallèle</b> | <b>Effet kerr&amp; Non-linéaire</b>                 | <b><math>10^4</math></b>            | <b>198.9</b>                               | <b>92</b>     | <b>4</b>  | <b>13.67</b>                       | <b>163</b>    | <b>7</b> | <b>13.62</b>                    |

Tableau III-2 : Comparaison les caractéristiques de demi-additionneur proposé avec les structures publiées récemment

\*\* : Non mentionné.

### III.5 Conception additionneur complet à base des résonateurs en anneau non-linéaire

Pour la conception de l'additionneur complet, nous avons utilisé le principe de fonctionnement de demi-additionneur précédent. Le principe physique de cette structure est basé sur l'effet Kerr non-linéaire. L'indice de réfraction des tiges diélectrique non linéaire change proportionnellement avec l'intensité de la puissance de signal optique d'entrée. L'indice de réfraction dépendant de l'intensité est représenté par la formule suivante :  $n = n_0 + n_1 \times I$ , où  $n_0$  est l'indice de réfraction linéaire,  $n_1$  est l'effet Kerr non-linéaire, et  $I$  est l'intensité de puissance optique du signal d'entrée.

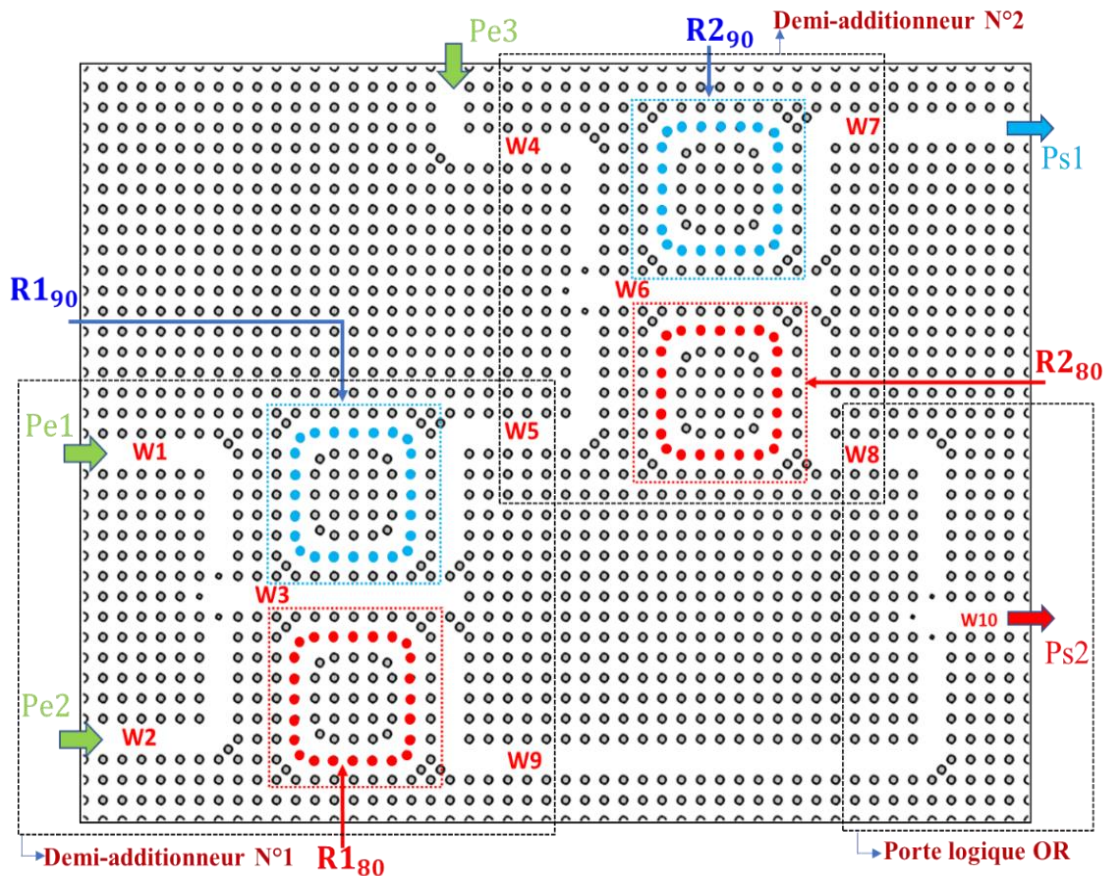


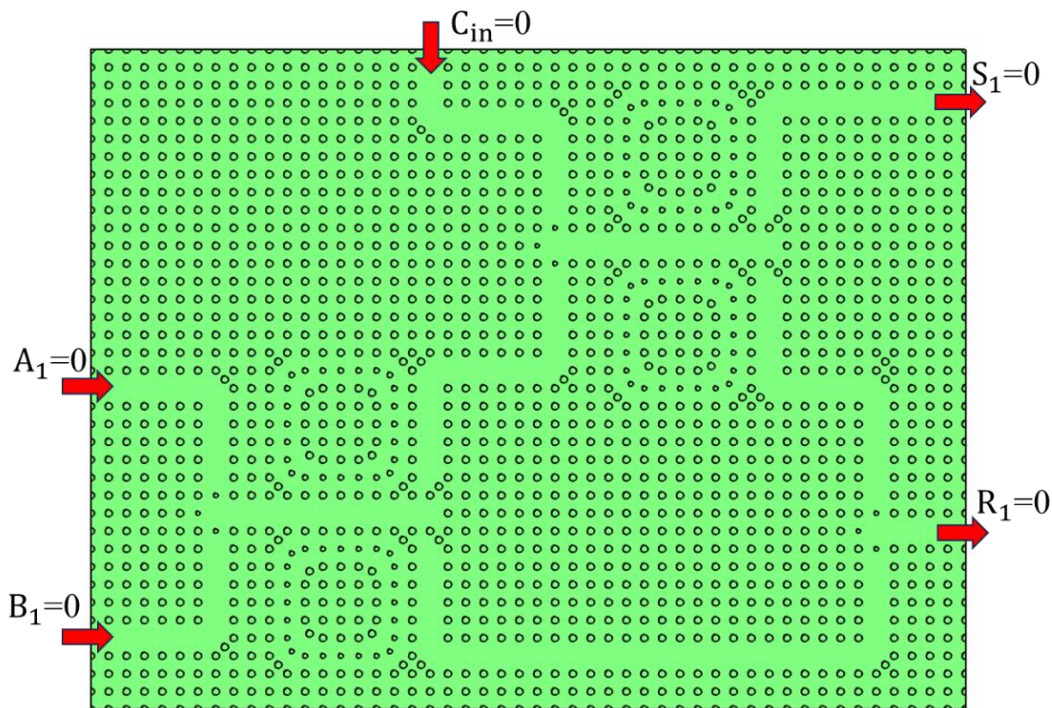
Figure III-13 : Additionneur complet à base des PhCs utilisant les résonateurs en anneau.

L'additionneur complet proposé a été conçu en combinant deux demi-additionneurs optiques et un étage de la porte logique OR. Le premier demi-additionneur est constitué de deux résonateurs en anneau non-linéaires (R1<sub>90</sub> et R1<sub>80</sub>) et cinq guides d'ondes (W1, W2, W3, W5 et W9) ; Second demi-additionneur se compose de deux résonateurs en anneau non linéaires (R2<sub>90</sub> et R2<sub>80</sub>) et cinq guides d'ondes (W4, W5, W6, W7 et W8).

Le port de sortie S du premier demi-additionneur a été connecté au premier port d'entrée du second demi-additionneur via le guide d'ondes W5 et le port de sortie du second demi-additionneur via le guide d'ondes W7 vers le port de sortie Ps1 de l'additionneur complet. L'étage de la porte logique OR a été créé en combinant les sortie Retenue « C » des deux demi-additionneurs à travers les guides d'ondes W8 et W9 pour former le port de sortie Ps2 de l'additionneur complet. La structure finale de l'additionneur complet à base de résonateur en anneau non linéaire est schématisée dans la **figure III-13**.

La structure finale de l'additionneur complet proposée a été simulée en mode TE à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, qui est basé sur la méthode des éléments finis FEM. Les **figures III-14** à **III-21** montrent la distribution du champ électrique à l'intérieur de de l'additionneur complet et le diagramme de puissance optique normalisée en fonction de la longueur d'onde aux ports de sortie Somme «  $S_1$  » et Retenue «  $R_1$  » pour les différents cas des niveaux logiques des ports d'entrée  $A_0$ ,  $B_0$  et  $C_{in}$ .

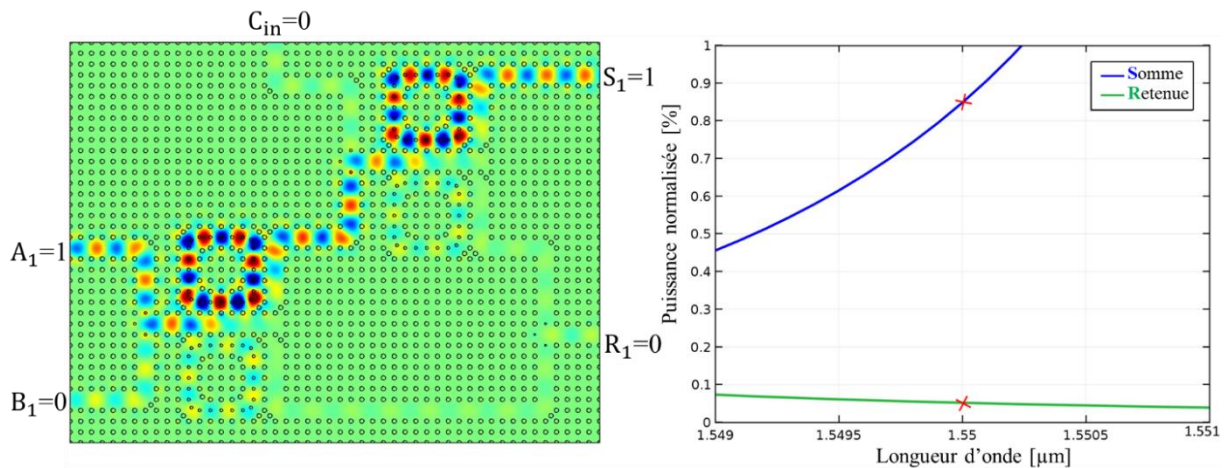
**Cas #1** : Lorsque tous les ports d'entrée Pe1, Pe2 et Pe3 sont à l'état inactive "OFF" ( $A_1 = B_1 = C_{in} = 0$ ), la puissance optique dans les ports de sortie Ps1 et Ps2 sont à l'état "OFF". Par conséquent, la somme «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à "0". La **figure III-14** montre le cas initial de l'additionneur complet,  $A_1 = B_1 = C_{in} = 0$ .



**Figure III-14** : La structure de l'additionneur complet dans le cas initial (Cas #1 :  $A_1=0$ ,  $B_1=0$  et  $C_{in}=0$ ).

**Cas #2** : Un port d'entrée Pe1 est activé «  $A_1$  : ON » ( $A_1=1$  et  $B_1=0$  et  $C_{in}=0$ ), le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $A_1$  passe par le guide d'onde W1 vers le guide d'onde W3, la longueur d'onde de signal optique lumineux est la même longueur d'onde de résonance autour de  $1,55 \mu\text{m}$  de résonateur en anneau  $R1_{90}$ . Dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R1_{90}$  et transmis vers le guide d'onde d'entrée W5 de 2<sup>ème</sup> demi-additionneur et passe vers le guide d'onde W6. Par conséquent, la longueur d'onde de signal optique de guide d'onde W6 est la même longueur d'onde de résonance autour de  $1,55 \mu\text{m}$  de résonateur en anneau  $R2_{90}$ , dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W6 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R2_{90}$  et transmis à travers le guide d'onde d'entrée W7 vers le port de sortie Ps1 de la somme  $S_1$ . Comme montre la **figure III-5**, la longueur d'onde de résonance des résonateurs en anneau  $R1_{80}$  et  $R2_{80}$  est autour de  $1,538 \mu\text{m}$  (différent de la longueur d'onde du signal  $1,55 \mu\text{m}$ ), dans ce cas aucun couplage entre les guides d'ondes (W3, W6) et les anneaux ( $R1_{80}$ ,  $R2_{80}$ ). L'état logique du port de sortie Ps1 de la somme «  $S_1$  » est à "1" et l'état logique du port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_1$  » est à "0". La puissance normalisée de la somme et la retenue est égale à 86 % et 4 %, respectivement.

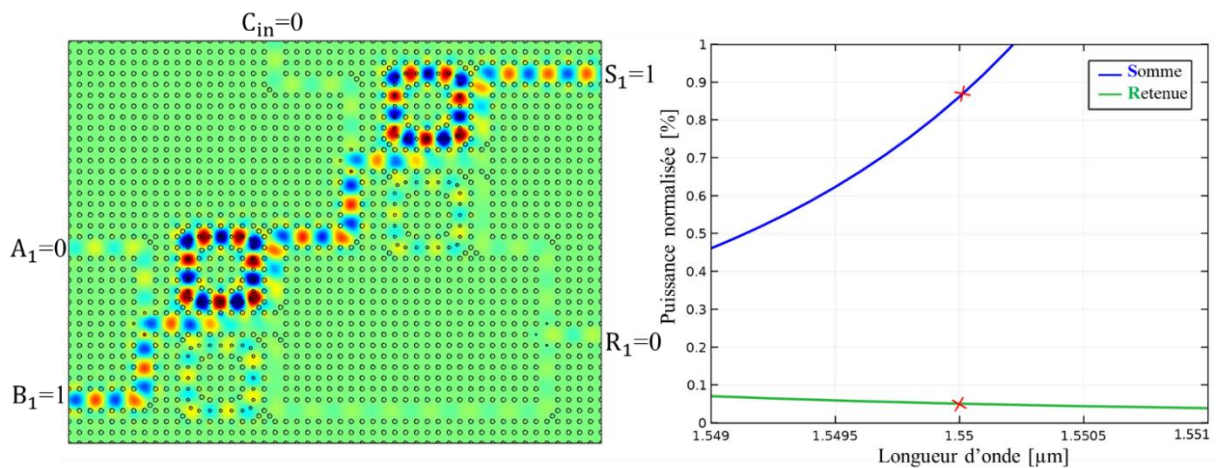
La **figure III-15** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme et la retenue.



**Figure III-15** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#2 :  $A_1, B_1, C_{in}=1,0,0$ .

**Cas #3** : Un port d'entrée Pe2 est activé «  $B_1$  : ON » ( $A_1=0$  et  $B_1=1$  et  $C_{in}=0$ ), le même principe de cas#1. Si on injecte un signal optique lumineux dans le port d'entrée  $B_1$ , le signal optique passe par le guide d'onde W2 vers le guide d'onde W3, la longueur d'onde de signal optique lumineux est la même longueur d'onde de résonance autour de  $1,55 \mu\text{m}$  de résonateur en anneau

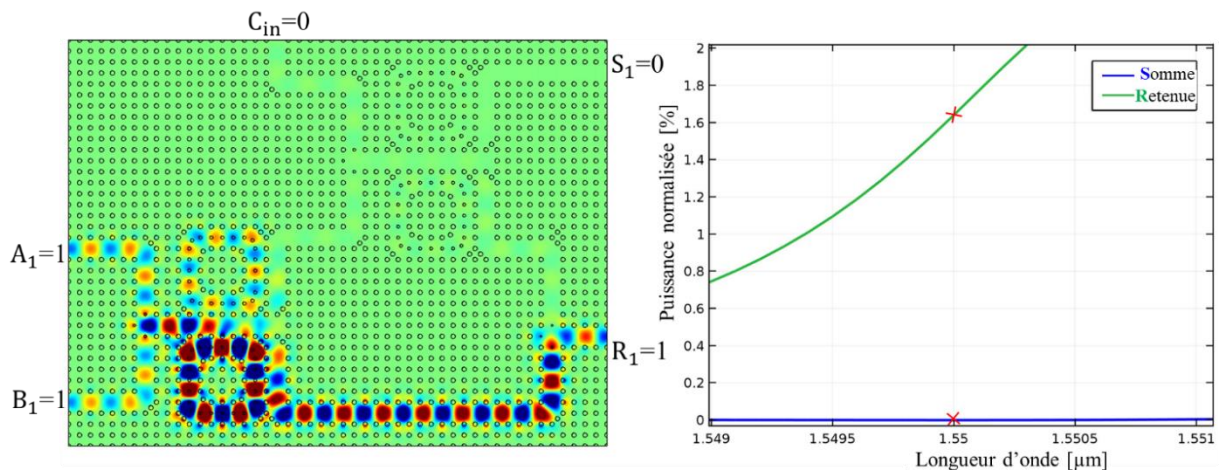
$R1_{90}$ , dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R1_{90}$  et transmis vers le guide d'onde d'entrée W5 de 2<sup>ème</sup> demi-additionneur et passe vers le guide d'onde W6. Par conséquent, la longueur d'onde de signal optique de guide d'onde W6 est la même longueur d'onde de résonance autour de  $1,55 \mu\text{m}$  de résonateur en anneau  $R2_{90}$ , dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W6 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R2_{90}$  et transmis à travers le guide d'onde d'entrée W7 vers le port de sortie Ps1 de la somme  $S_1$ . Comme montre la **figure III-5**, la longueur d'onde de résonance des résonateurs en anneau  $R1_{80}$  et  $R2_{80}$  est autour de  $1,538 \mu\text{m}$  (différent de la longueur d'onde du signal  $1,55 \mu\text{m}$ ), dans ce cas aucun couplage entre les guides d'ondes (W3, W6) et les anneaux ( $R1_{80}$ ,  $R2_{80}$ ). L'état logique du port de sortie Ps1 de la somme «  $S_1$  » est à "1" et l'état logique du port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_1$  » est à "0". La puissance normalisée de la somme et la retenue est égale à 88 % et 3 %, respectivement. La **figure III-16** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme et la retenue.



**Figure III-16** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#3 :  $A_1, B_1, C_{in} = 0, 1, 0$ .

**Cas #4** : Deux ports d'entrée Pe1 et Pe2 sont activés «  $A_1$  et  $B_1$ : ON » ( $A_1=1$  et  $B_1=1$  et  $C_{in}=0$ ), On injecte deux signaux optiques lumineux dans les ports d'entrée  $A_1$  et  $B_1$ ; les signaux optiques sont combinés et transmis par les guides d'ondes W1 et W2 vers le guide d'onde W3. L'intensité de puissance optique de guide d'onde W3 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet Kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R1_{80}$  et transmis aux guides d'onde W9 et W10 vers le

port de sortie Ps2 de la retenue  $R_1$ . Comme montre la **figure III-6**, la longueur d'onde de résonance de  $R_{180}$  est autour de  $1,55 \mu\text{m}$ , et donc aucun couplage entre les guides d'ondes W3 et le résonateur en anneau  $R_{190}$ . L'état logique du port de sortie Ps1 de la somme «  $S_1$  » est à "0" et l'état logique du port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_1$  » est à "1". La puissance normalisée de la somme et de la retenue est égale à 1 % et 163 %, respectivement. La **figure III-17** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme et la retenue.

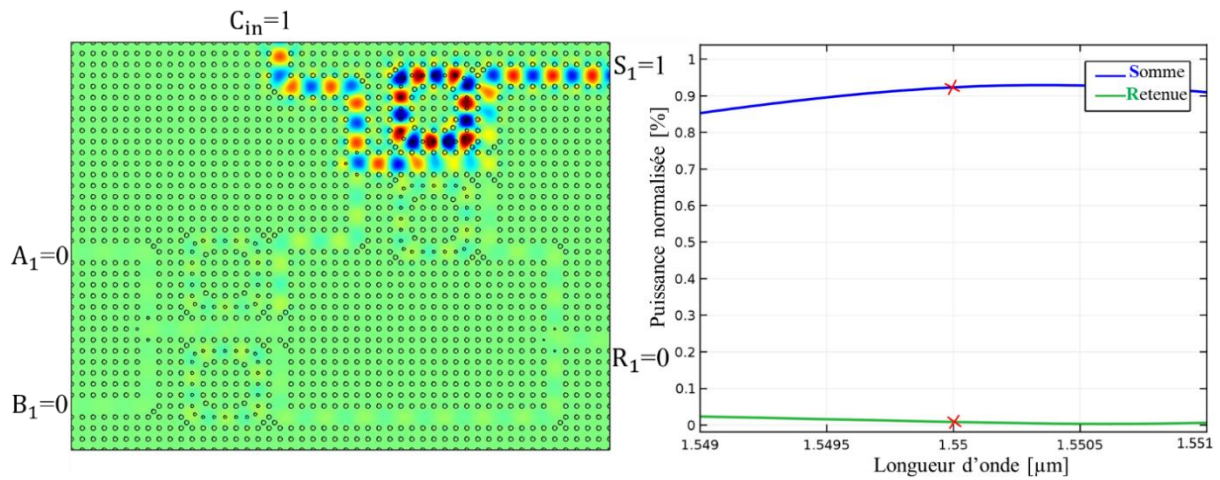


**Figure III-17** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#4 :  $A_1, B_1, C_{in} = 1, 1, 0$ .

**Cas #5** : Un port d'entrée Pe3 est activé « Cin: ON » ( $A_1=0$  et  $B_1=0$  et  $C_{in}=1$ ), le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée Cin passe par le guide d'onde W4 vers le guide d'onde W6; la longueur d'onde de signal optique lumineux est la même longueur d'onde de résonance autour de  $1,55 \mu\text{m}$  de résonateur en anneau  $R_{290}$ , dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W6 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{290}$  et transmis au guide d'onde W7 vers le port de sortie Ps1 de la somme  $S_1$ . Comme montre la **figure III-5**, la longueur d'onde de résonance de  $R_{280}$  est autour de  $1,538 \mu\text{m}$ , et donc aucun couplage entre les guides d'ondes W6 et le résonateur en anneau  $R_{280}$ .

L'état logique du port de sortie Ps1 de la somme «  $S_1$  » est à "1" et l'état logique du port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_1$  » est à "0". La puissance normalisée de la somme et de la retenue est égale à 92 % et 2 %, respectivement. La **figure III-18** montre la distribution du champ

électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme et la retenue.



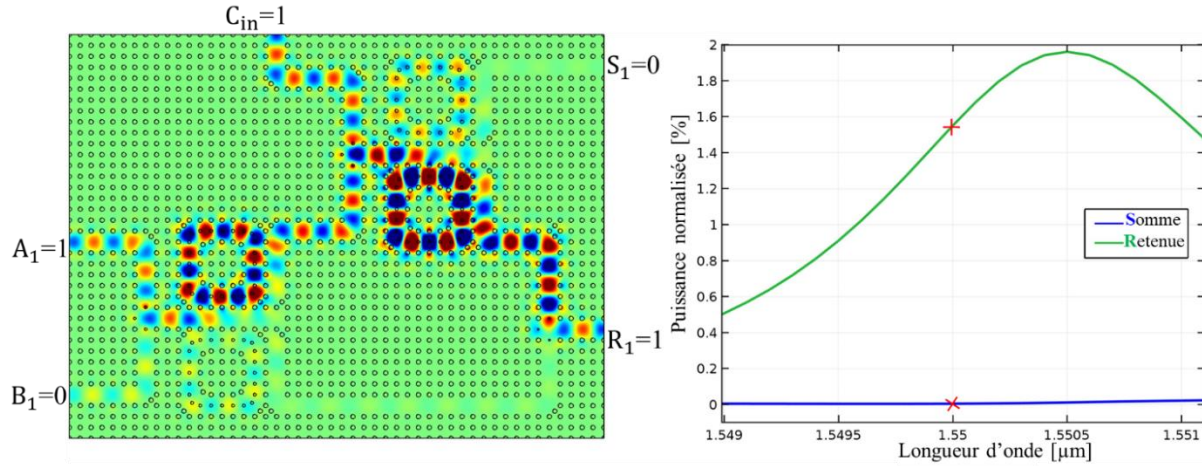
**Figure III-18** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#5 :  $A_1, B_1, C_{in} = 0, 0, 1$ .

**Cas #6**: Deux port d'entrée Pe1 et Pe3 sont activés «  $A_1$  et  $C_{in}$ : ON » ( $A_1=1$  et  $B_1=0$  et  $C_{in}=1$ ), le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $A_1$  passe par le guide d'onde W1 vers le guide d'onde W3, la longueur d'onde de signal optique lumineux est la même longueur d'onde de résonance autour de 1,55 μm de résonateur en anneau R1<sub>90</sub>, dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau R1<sub>90</sub> et transmis vers le guide d'onde d'entrée W5 de 2<sup>ème</sup> demi-additionneur.

Le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $C_{in}$  (2<sup>nd</sup> port d'entré de 2<sup>ème</sup> demi-additionneur) passe par le guide d'onde W4 est combiné avec le signal optique de guide d'onde W5 et transmis au guide d'onde W6. L'intensité de puissance optique de guide d'onde W6 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau R2<sub>90</sub> et R2<sub>80</sub> augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W6 sera couplée dans le résonateur en anneau R2<sub>80</sub> et transmis aux guides d'onde W8 et W10 vers le port de sortie Ps2 de la retenue R<sub>1</sub>.

L'état logique du port de sortie Ps1 de la somme «  $S_1$  » est à "0" et l'état logique du port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_1$  » est à "1". La puissance normalisée de la somme et de la retenue est égale à 1 % et 158 %, respectivement. La **figure III-19** montre la distribution du champ

électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme et la retenue.

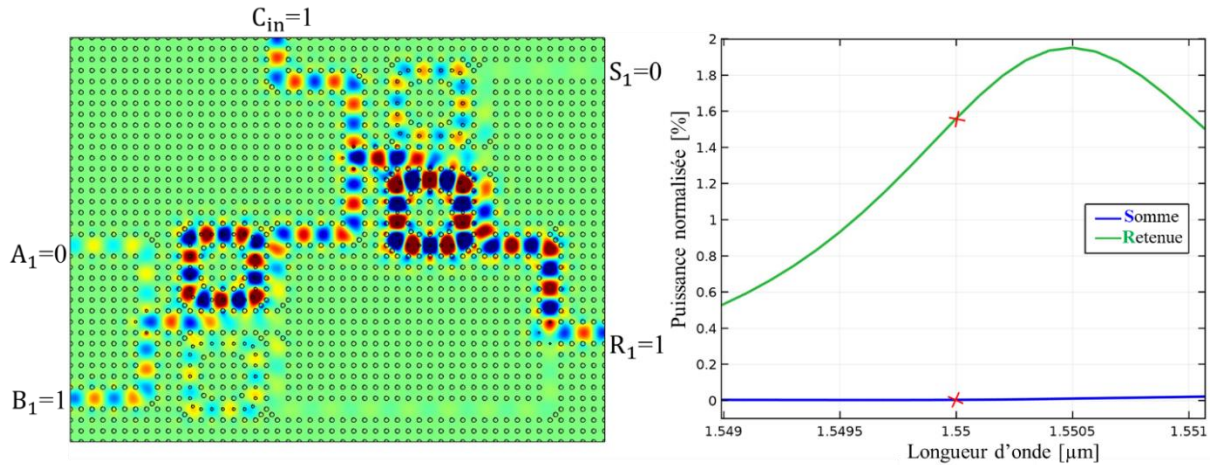


**Figure III-19** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#6 :  $A_1, B_1, C_{in} = 1, 0, 1$ ).

**Cas #7** : Deux port d'entrée  $Pe_2$  et  $Pe_3$  sont activés «  $B_1$  et  $C_{in}$ : ON » ( $A_1=0$  et  $B_1=1$  et  $C_{in}=1$ ), le même principe de cas#6, le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $B_1$  passe par le guide d'onde  $W_2$  vers le guide d'onde  $W_3$ , la longueur d'onde de signal optique lumineux est la même longueur d'onde de résonance autour de  $1,55 \mu\text{m}$  de résonateur en anneau  $R_{190}$ , dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{190}$  et transmis vers le guide d'onde d'entrée  $W_5$  de 2<sup>ème</sup> demi-additionneur.

Le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $C_{in}$  (2<sup>nd</sup> port d'entré de 2<sup>ème</sup> demi-additionneur) passe par le guide d'onde  $W_4$  est combiné avec le signal optique de guide d'onde  $W_5$  et transmis au guide d'onde  $W_6$ . L'intensité de puissance optique de guide d'onde  $W_6$  augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau  $R_{290}$  et  $R_{280}$  augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde  $W_6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{280}$  et transmis aux guides d'onde  $W_8$  et  $W_{10}$  vers le port de sortie  $Ps_2$  de la retenue  $R_1$ .

L'état logique du port de sortie Ps1 de la somme «  $S_1$  » est à "0" et l'état logique du port de sortie Ps2 de la retenue «  $R_1$  » est à "1". La puissance normalisée de la somme et de la retenue est égale à 1 % et 158 %, respectivement. La **figure III-20** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue

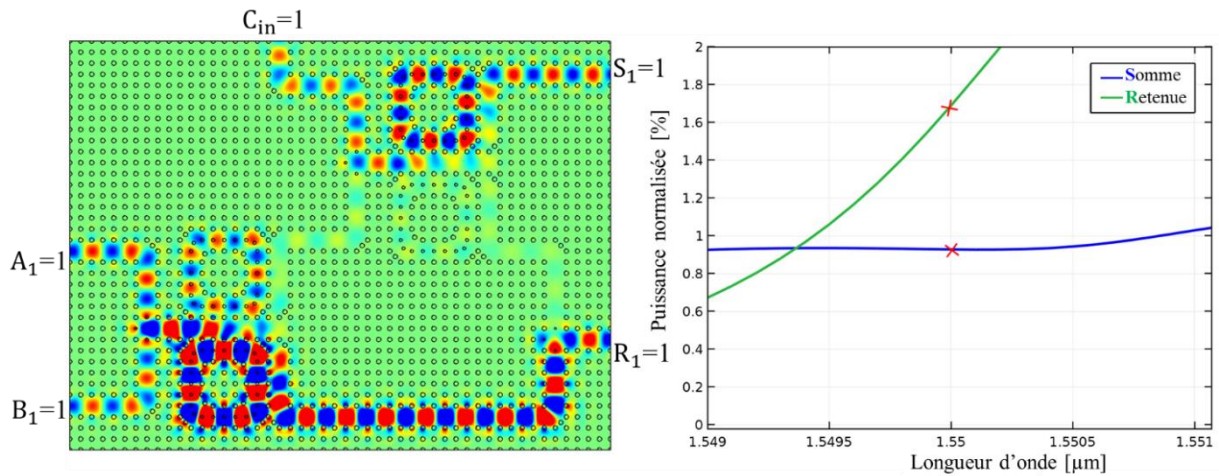


**Figure III-20** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#7 :  $A_1, B_1, C_{in} = 0,1,1$ ).

**Cas #8** : Tous les ports d'entrée Ps1, Ps2 et Ps3 sont activés «  $A_1, B_1$  et  $C_{in}$  : ON » ( $A_1=1$  et  $B_1=1$  et  $C_{in}=1$ ), On injecte deux signaux optiques lumineux dans les ports d'entrée  $A_1$  et  $B_1$  pour le premier demi-additionneur ; les signaux optiques sont combinés et transmis par les guides d'ondes W1 et W2 vers le guide d'onde W3. L'intensité de puissance optique de guide d'onde W3 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet Kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{180}$  et transmis aux guides d'onde W7 et W10 vers le port de sortie de la retenue  $R_1$ . Comme montre la **figure III-6**, la longueur d'onde de résonance de  $R_{190}$  est autour de 1,562  $\mu\text{m}$ , et donc aucun couplage entre les guides d'ondes W3 et le résonateur en anneau  $R_{190}$ .

Pour le second demi-additionneur, le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $C_{in}$  passe par le guide d'onde W4 vers le guide d'onde W6 ; la longueur d'onde de signal optique lumineux est la même longueur d'onde de résonance autour de 1,55  $\mu\text{m}$  de résonateur en anneau  $R_{290}$ , dans ce cas, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W6 sera

couplée dans le résonateur en anneau  $R_{290}$  et transmis au guide d'onde  $W_7$  vers le port de sortie de la somme  $S_1$ . Comme montre la **figure III-5**, la longueur d'onde de résonance de  $R_{280}$  est autour de  $1,538 \mu\text{m}$ , et donc aucun couplage entre les guides d'ondes  $W_6$  et le résonateur en anneau  $R_{280}$ . Dans ce cas, l'état logique du port de sortie  $Ps_1$  de la somme «  $S_1$  » et du port de sortie  $Ps_2$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1". La puissance normalisée de la somme et de la retenue est égale à 92 % et 170 %, respectivement. La **figure III-21** montre la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue.



**Figure III- 21** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#8 :  $A_1, B_1, C_{in} = 1, 1, 1$ ).

Les résultats de simulation pour tous les cas étudiés sont présentés dans le **tableau III-3**. Lorsque tous les ports d'entrée ( $A_1$  et  $B_1$  et  $C_{in}$ ) sont à un état logique "0", Les deux ports de sortie somme  $S_1$  et retenue  $R_1$  sont à un état logique «0». D'autre part, lorsqu'un seul signal optique de port d'entrée ( $A_1$  ou  $B_1$  ou  $C_{in}$ ) est un état logique "1", le port de sortie de la somme  $S_1$  est au niveau logique "1" et le port de sortie de la retenue  $R_1$  est au niveau logique "0". Si deux signaux de ports d'entrée ( $A_1 \& B_1$  ou  $A_1 \& C_{in}$  ou  $B_1 \& C_{in}$ ) sont à un état logique "1", le port de sortie de la somme  $S_1$  est à un niveau logique "0" et le port de sortie retenue  $R_1$  est au niveau logique "1". Enfin, quand tous les ports d'entrée ( $A_1$  et  $B_1$  et  $C_{in}$ ) sont à un niveau logique "1", les deux ports de sortie somme  $S_1$  et retenue  $R_1$  sont à un niveau logique "1".

| Cas | Entrées        |                |                 | Somme S <sub>1</sub> |                          | Retenue R <sub>1</sub> |                          |
|-----|----------------|----------------|-----------------|----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
|     | A <sub>1</sub> | B <sub>1</sub> | C <sub>in</sub> | Etat logique         | Puissance normalisée [%] | Etat logique           | Puissance normalisée [%] |
| #1  | 0              | 0              | 0               | 0                    | *                        | 0                      | *                        |
| #2  | 1              | 0              | 0               | 1                    | 86                       | 0                      | 4                        |
| #3  | 0              | 1              | 0               | 1                    | 88                       | 0                      | 3                        |
| #4  | 1              | 1              | 0               | 0                    | 1                        | 1                      | 163                      |
| #5  | 0              | 0              | 1               | 1                    | 92                       | 0                      | 2                        |
| #6  | 1              | 0              | 1               | 0                    | 1                        | 1                      | 158                      |
| #7  | 0              | 1              | 1               | 0                    | 1                        | 1                      | 158                      |
| #8  | 1              | 1              | 1               | 1                    | 92                       | 1                      | 170                      |

**Tableau III-3** : Table de vérité de l'additionneur complet.

Par conséquent, les résultats de la simulation démontrent que la structure proposée correspond à un additionneur complet fonctionne autour de la longueur d'onde de 1,55  $\mu\text{m}$ .

Les rapports de contraste est un paramètre utilisé pour évaluer la structure proposée. Le rapport de contraste est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$CR=10*\log[M_1/M_0]$$

Où :

$M_1$  et  $M_0$  sont le minimum et le maximum puissance normalisée aux ports de sortie de l'état logique 1 et 0, respectivement [16-25].

Les puissances normalisées maximale et minimale au port de sortie de la somme « S<sub>1</sub> » pour les états logiques 0 et 1 sont  $M_0=1\%$  et  $M_1=86\%$ , respectivement.

Par conséquent,  $M_0=4\%$  et  $M_1=158\%$  sont les valeurs maximales minimale de puissance normalisée au port de sortie de la retenue « R<sub>1</sub> » pour les niveaux logiques 0 et 1, respectivement. Selon les résultats de tableau III.3.

Les rapports de contraste pour les sorties de la somme « S<sub>1</sub> » et la retenue « R<sub>1</sub> » sont respectivement de 19,34 dB et 15,96 dB.

### III.5.1 Comparaison additionneur complet proposé avec les structures existantes

Pour l'évaluation et la validation de notre structure d'additionneur complet, nous comparons la structure proposée avec les travaux existants dans la littérature en termes de technique de conception, la taille de structure, les puissances de transmission normalisée de maximum logique 0 et minimum logique 1 pour chaque port de sortie Somme et Retenue, et les

rapports de contraste de port Somme et Retenue. La comparaison est présentée dans le **tableau III-4**.

La conception des additionneurs complet présentées dans les travaux [15], et [16] basé sur le principe de fonctionnement de demi-additionneur à base des cavités résonant non-linéaire de la réf [7]. Les additionneurs complets présentés dans les réfs [17-21] sont basés sur des résonateurs en anneau non-linéaire.

Dans notre structure, l'additionneur complet est basé sur deux résonateurs en anneau parallèle non-linéaire, la taille totale est égale à  $635 \mu\text{m}^2$ . De plus, les niveaux de maximum et le minimum de puissance normalisée de transmission et obtenus dans les sorties Somme et Retenue sont significativement différents par rapport aux recherches précédentes [15-20], ce qui donne un bon contraste. En comparaison avec structures présentées dans les réfs [22], [23] basées sur un résonateur et un point défaut linéaire, la structure proposée présente des rapports de contraste améliorés. C'est l'avantage de la non-linéarité par rapport aux caractéristiques de structure linéaires.

Les additionneurs à base des cavités non-linéaires présentées dans les réfs [24-25-26] différent que celle présentés dans les réfs [15], [16]. Les rapports de contraste de notre structure sont meilleurs mais la taille est plus grande par rapport aux réfs [24-25-26].

| Refs                   | Technique utilisée                             | Taille de structure [ $\mu\text{m}^2$ ] | Somme $S_1$               |                             |                           | Retenue $R_1$               |                           |                           | Min radius rods [nm] |
|------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|
|                        |                                                |                                         | Puissance [%] Max logic 0 | Puissance [%] Min logique 1 | Rapport de contraste [dB] | Puissance [%] Max logique 0 | Puissance [%] Min logic 1 | Rapport de contraste [dB] |                      |
| [15]                   | Cavité résonante non linéaire                  | 396                                     | 3                         | 53                          | 12.47                     | 10                          | 100                       | 10                        | 111                  |
| [16]                   | Cavité résonante non linéaire                  | 758.5                                   | 5                         | 90                          | 12.55                     | 2                           | 125                       | 17.95                     | 118                  |
| [17]                   | Résonateur en anneau non linéaire              | 439                                     | 5                         | 80                          | 12.04                     | 5                           | 60                        | 10.8                      | 125                  |
| [18]                   | Résonateur en anneau non linéaire              | 560                                     | 4                         | 80                          | 13.01                     | 4                           | 160                       | 16.02                     | 121                  |
| [19]                   | Résonateur en anneau non linéaire              | 1140                                    | 8                         | 74                          | 9.66                      | 3                           | 74                        | 13.92                     | 85                   |
| [20]                   | Résonateur en anneau non linéaire              | 663                                     | 3                         | 75                          | 13.97                     | 7                           | 120                       | 12.34                     | 118                  |
| [21]                   | Résonateur en anneau non linéaire              | 663                                     | 0.5                       | 85                          | 22.3                      | 1                           | 90                        | 19.54                     | 120                  |
| [22]                   | Nano résonateur linéaire/ interférence         | 183                                     | 10.5                      | 84.1                        | 9.03                      | 7                           | 82                        | 10.68                     | 50                   |
| [23]                   | Défaut ponctuel/interférence                   | 72                                      | 15                        | 90                          | 11                        | 30                          | 100                       | 5.22                      | 45                   |
| [24]                   | Cavité résonante non linéaire                  | 115                                     | 4                         | 86                          | 13.32                     | 3                           | 141                       | 16.72                     | 47                   |
| [25]                   | Cavité résonante non linéaire                  | 71                                      | 4                         | 84                          | 13.22                     | 5                           | 121                       | 13.84                     | 132                  |
| [26]                   | Cavité résonante non linéaire                  | 93                                      | 10                        | 85                          | 9.3                       | 4                           | 134                       | 15.25                     | 41                   |
| <b>Travail proposé</b> | <b>Résonateur à double anneau non linéaire</b> | <b>635</b>                              | <b>1</b>                  | <b>70</b>                   | <b>19.34</b>              | <b>8</b>                    | <b>160</b>                | <b>15.96</b>              | <b>80</b>            |

**Tableau III-4** : Comparaison des caractéristiques de l'additionneur complet proposé avec les structures trouvées dans la littérature

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, deux additionneurs tout optique à base des cristaux photoniques ont été proposés et simulés autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$  à l'aide de la méthode des éléments finis FEM et le logiciel COMSOL Multiphysique, les additionneurs sont conçus sur un réseau carré des tiges diélectrique en Silicium distribués dans l'air avec un indice de réfraction  $n=3.476$ , un rayon de  $118 \text{ nm}$  et une constante de fond de  $592 \text{ nm}$ . Le principe de fonctionnement des additionneurs sont basés sur les résonateurs en anneau non linéaire à effet kerr.

Deux résonateurs en anneau sont formés en supprimant des tiges diélectriques au cœur de résonateurs et les remplacés par des tiges non-linéaires en verre dopé de rayon  $90$  et  $80 \text{ nm}$ , respectivement. La première structure « demi-additionneur » est utilisé pour la sommation de deux bit ( $A_0, B_0$ ), les signaux optiques des entrées sont guidés vers l'un des ports de sortie a travers le résonateur en anneau. Les rapports de contraste de sortie somme  $S_0$  et retenue  $R_0$  sont autour de  $13,71 \text{ dB}$ ,  $13,67 \text{ dB}$ , la taille totale est de  $198,9 \mu\text{m}^2$  et des dimensions de  $15,3 \times 13 \mu\text{m}^2$ .

La deuxième structure « additionneur complet » est utilisée en général pour la sommation de trois bit ( $A_i, B_i, C_i$ ). L'additionneur complet proposé a été conçu en combinant deux demi-additionneurs optiques et une porte logique OR. La taille totale de la structure est égale à  $635 \mu\text{m}^2$ . Les rapports de contraste de sortie somme  $S_1$  et retenue  $R_1$  sont autour de  $19,34 \text{ dB}$  et  $15,96 \text{ dB}$ , respectivement.

Les deux additionneurs seront utilisés dans chapitre quatre pour la conception les additionneurs à N bit et en particulier les additionneurs 2 bit et 4 bits.

**Bibliographies**

1. Moungar, A., Badaoui, H., Abri, M.: 16-channels wavelength efficient demultiplexing around 1,31/1,55  $\mu\text{m}$  in 2D photonic crystal slab. *Optik, Int. J. Light and Electr. Opt.* 193, 162685 (2019).
2. S. Pathak, “Photonics Integrated Circuits”, *Nanoelectronics Devices*, Elsevier. *Circuits and Systems Advanced Nanomaterial*, pp. 219-270, Aug. 2019.
3. M. Moradi, M. Danaie, AA. Orouji, “Design and analysis of an optical full-adder based on nonlinear photonic crystal ring resonators”, *Optik*, Vol. 172, pp. 127-136, November 2018,
4. L. Mokhtari, H. Badaoui, M. Abri, A. Moungar, F. Lallam, and B. Rahmi, “Proposal of a New Efficient OR/XOR Logic Gates and All-Optical Nonlinear Switch in 2D Photonic Crystal Lattices”, *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 106, pp. 187–197, Oct. 2020.
5. B. Rahmi, H. Badaoui, M. Abri, “Original architecture of an efficient all-optical 2×4 photonic crystals decoder based on nonlinear ring resonators”, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 54, Sept. 2022.
6. H. Mondal, M. Sen, K. Goswami, “Design and analysis of all-optical 1-to-2-line decoder based on linear photonic crystal”, *IET Optoelectronics*, Vol. 13, pp. 191-195, Aug. 2019.
7. M. Neisy, M. Soroosh, K. Ansari-Asl, “All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities”, *Springer. Photonic Network Communications*, Vol. 35, pp. 245-250, Sept. 2017.
8. E. Haq Shaik, N. Rangaswamy, “Design of All-optical Photonic Crystal Half Adder with T-shaped Waveguides Using Path Difference Based Interference”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERSFALL)*, Singapore, pp.2596-2601, Nov 19-22 2017.
9. S. Serajmohammadi, H. Alipour-banaei, F. Mehdizadeh, “Proposal for realizing an all-optical half adder based on photonic crystals”, *Applied Optics*, Vol. 57, pp. 1617- 1621, Feb. 2018.
10. V.S. Mahesh, S. Savita, C.G. Sanjaykumar, B. Nagashettappa, “Modeling and Optimization of Optical Half Adder in Two Dimensional Photonic Crystals”, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 47, pp. 4136-4139, May. 2018.

11. M. Ebrahimi and S. Javahernia, “An Optical Half Adder Using Nonlinear Ring Resonator Based on Photonic Crystal”, *Journal of Optical Communications*, May. 2019.
12. M. Hosseinzadeh Sani, A. Asgariyan Tabrizi, H. Saghaei, R. Karim Zadeh, “An ultrafast all-optical half adder using nonlinear ring resonators in photonic crystal microstructure”, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 52, Feb. 2020.
13. K. Saadi, A. Kashaninia, R. Sabbaghi-Nadooshan, “All- optical half adder based on nonlinear triangular lattice photonic crystals with improved contrast ratio”, *IET Optoelectronics*, Jan. 2020.
14. K. Saadi, A. Kashaninia, R. Sabbaghi-Nadooshan, “All-optical half adder based on triangular lattice photonic crystals with uniform structural parameters”, *Photonic Network Communications*, Vol. 43, pp. 204- 211, Mar. 2022.
15. F. Cheraghi, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, “An ultra-compact all optical full adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities”, *Superlattices and Microstructures*. 113, pp.359-365, January 2018.
16. S. Naghizade, H. Saghaei, “A novel design of fast and compact all-optical full-adder using nonlinear resonant cavities”, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 53, N°. 262, April 2021.
17. H. Alipour-Banaei, H. Seif-Dargahi, “Photonic crystal based 1-bit full-adder optical circuit by using ring resonators in a nonlinear structure”, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Vol. 24 pp.29-34, May 2017.
18. M. Moradi, M. Danaie, AA. Orouji, “Design and analysis of an optical full-adder based on nonlinear photonic crystal ring resonators”, *Optik*, Vol. 172, pp. 127-136, November 2018,
19. M. Reza Geraili, S. Ebrahim Hosseini, M. Bagher Tavakoli, M. Shokooh-Saremi, “ A proposal for an all optical full adder using nonlinear photonic crystal ring resonators”, *Optik, International Journal for Light and Electron Optics* , Vol. 199, December 2019.
20. S. Naghizade, H. Saghaei, “Ultra-fast tunable optoelectronic full-adder based on photonic crystal ring resonators covered by graphene nanoshells” , *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol.142, August 2022.
21. S. Naghizade, H. Saghaei, “A novel design of all-optical full-adder using nonlinear X-shaped photonic crystal resonators”, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 53, N°154, March 2021.

22. M. Mohammadi, V. Fallahi, M. Seifouri, ‘‘Ultracompact all-optical full adders using an interference effect based on 2D photonic crystal nanoring resonators’’, *Journal of Computational Electronics*, Vol. 20, pp. 409-418, November 2020.
23. A. Morad Vali-Nasab, A. Mir, R. Talebzadeh, ‘‘ Design and simulation of an all optical full-adder based on photonic crystals’’, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 51, N°161 , May 2019.
24. M. J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, ‘‘ Designing an ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal cavities’’, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 52, N°196, March 2020.
25. M. J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, ‘‘ Design and analysis of a new compact all-optical full-adder based on photonic crystals’’, *Optik*, Vol. 227, February 2021.
26. M. J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, ‘‘Ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities’’, *Photonic Network Communications*, Vol. 41, pp. 93-101, October 2020.

# Chapitre IV :

**Conception des additionneurs à N-bit tout optique  
2DPhC à base des résonateurs en anneau non linéaires**

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons deux structures 2 et 4 bits d'additionneurs tout optique à base des cristaux photoniques. Les deux additionneurs sont basés sur le demi additionneur et l'additionneur complet étudiés dans le chapitre précédent. Le logiciel COMSOL Multiphysique est basé sur la méthode numériques FEM (*Finite Element Method*) est utilisé pour simuler la distribution de champ électromagnétiques à l'intérieur des structures proposées autour de la longueur d'onde  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ .

Au début de ce chapitre, nous présentons un additionneur de 2 bits qui se compose de deux étages, étage de demi additionneur et additionneur complet adaptés pour fonctionner dans la bande de deuxième fenêtre de transmission optique autour  $1,55 \mu\text{m}$ , se terminant par les résultats de distribution du champ électrique, un tableau des puissances normalisées, les rapports de contraste, et une comparaison des résultats avec les travaux de littérature. Ensuite, nous simulons un additionneur de 4 bits qui se compose de quatre étages, le premier étage est de demi additionneur et trois étages additionneur complet. Finalement, nous généralisons le circuit final d'additionneur à N bits.

## IV.2 Proposition additionneur tout optique 2 bit à base 2DPhCs non linéaire

La structure de l'additionneur 2 bits est une combinaison d'un demi-additionneur et d'un additionneurs complet liés entre eux. La **figure IV-1** montre le schéma-bloc et la table de vérité de l'additionneur de deux nombres binaires à 2 bits ( $A=A_1A_0$  et  $B=B_1B_0$ ). Les paires de bits «  $A_i$  » et «  $B_i$  » sont additionnés colonne par colonne et les retenues «  $R_i$  » sont propagées vers la gauche d'additionneur en additionneur.

Le principe de fonctionnement et les simulations de demi-additionneur et additionneur complet sont étudiés dans le chapitre précédent. D'après l'étude paramétrique (Voir la section III.2 de chapitre III), la suture du crystal photonique à deux dimensions 2D est composée par une matrice carrée  $3 \times 3$  de tiges cylindriques diélectriques de Silicium (Si) distribué dans l'air. Les paramètres choisis comme suit :

- Le rayon de la tige :  $r = 118 \text{ nm}$ .
- Constante de réseau de fond (distance entre de tiges voisins) :  $a = 592 \text{ nm}$ .
- L'indice de réfraction des tiges diélectriques sont caractérisées par  $n=3,476$  autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ .

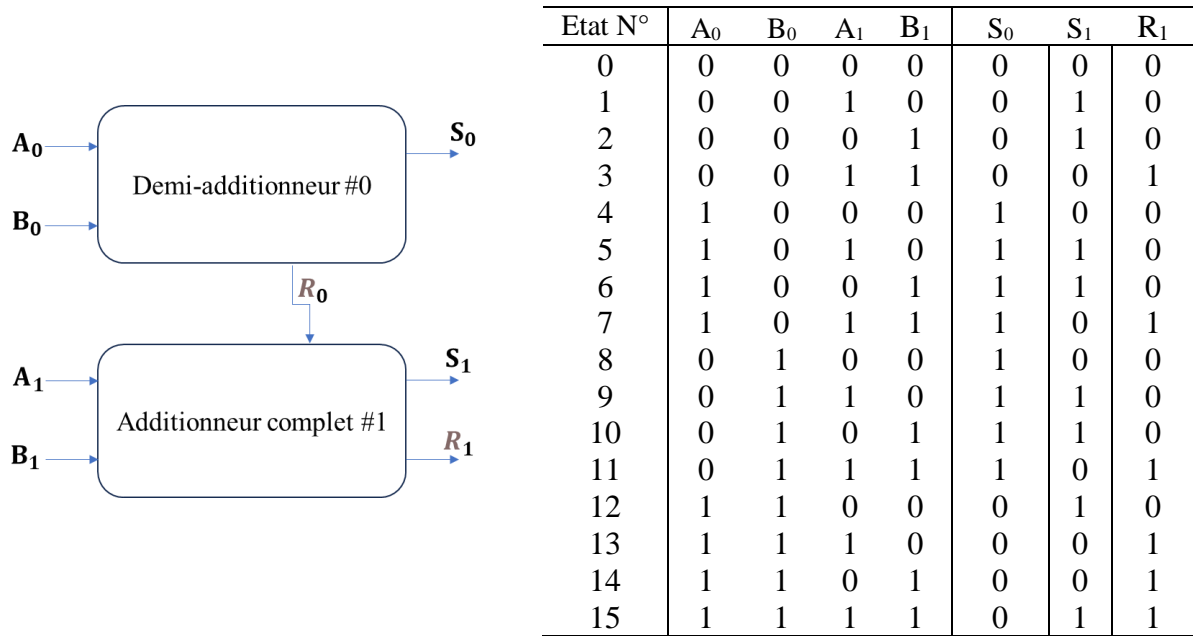


Figure IV-1 : Schéma-bloc et la table de vérité du circuit d'additionneur 2-bit proposé.

La figure IV-2 montre l'additionneur tout optique 2-bit à base de résonateurs en anneau non-linéaire 2DPHCs.

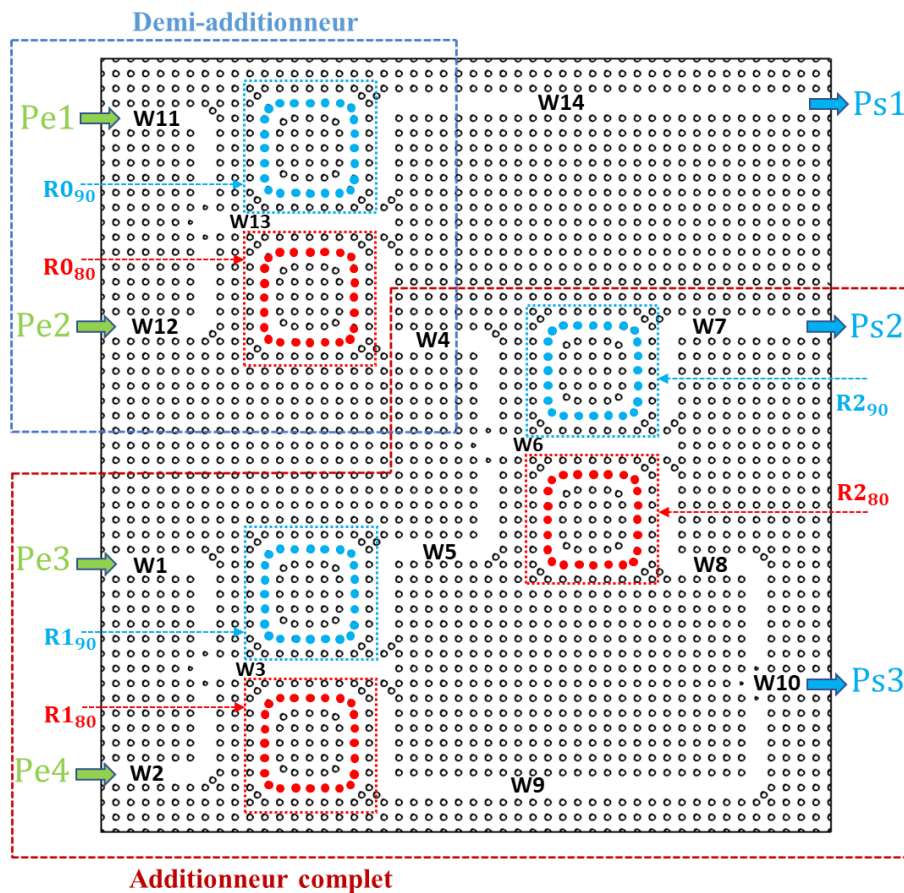


Figure IV-2 : Additionneur tout optique 2-bit à base 2DPHCs.

La structure est conçue en mettant en cascade deux blocs d'additionneur (bloc demi additionneur et bloc additionneur complet). L'additionneur 2-bit tout optique proposé est composé par :

- 06 résonateurs en anneau non-linéaire ( $R_{0_{90}}$ ,  $R_{0_{80}}$ ,  $R_{1_{90}}$ ,  $R_{1_{80}}$ ,  $R_{2_{90}}$  et  $R_{2_{80}}$ ),
- 14 guides d'ondes ( $W_n$ ,  $n= 1 \dots 14$ ),
- 04 ports d'entrée ( $Pe_1$ ,  $Pe_2$ ,  $Pe_3$  et  $Pe_4$ ) : représente les bits des nombres binaires  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_1$  et  $B_1$ .
- 04 ports de sortie ( $Ps_1$ ,  $Ps_2$  et  $Ps_3$ ) : représente les bits de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et le retenue  $C_1$ .

### IV.2.1 Simulations et résultats

La structure finale a été simulé à l'aide de logiciel COMSOL. Nous avons divisé la simulation en 4 cas suivant l'état de demi-additionneur, et chaque cas contient 4 états de l'additionneur complet. Pour cela, 04 sources optiques de type Gaussien ont été utilisées aux ports d'entrée  $Pe_1$ ,  $Pe_2$ ,  $Pe_3$  et  $Pe_4$  avec une longueur d'onde centrale de  $1,55 \mu\text{m}$  et l'intensité optique égale à  $10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ .

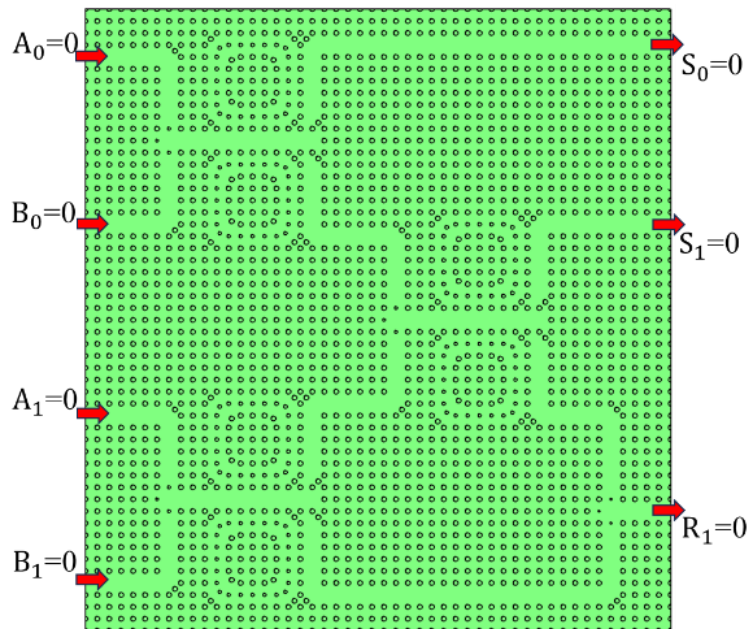
Les **figures IV-3** à **IV-7** montrent la distribution du champ électrique à l'intérieur de l'additionneur 2-bit et le diagramme de puissance optique normalisée en fonction de la longueur d'onde aux ports de sortie Somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et Retenue «  $R_1$  » pour les différents cas des niveaux logiques des ports d'entrée  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_1$  et  $B_1$ .

**Cas#1** : Lorsque deux ports d'entrée du demi-additionneur sont désactivés ( $A_0B_0=00$ ), le port de sorite  $Ps_1$  de la somme «  $S_0$  » de demi-additionneur est égale à "0". Dans ce cas, nous avons distingué 4 états pour l'additionneur complet de la structure ( $A_1B_1=00$ ,  $A_1B_1=10$ ,  $A_1B_1=01$ ,  $A_1B_1=11$ ) et peuvent être résumés comme suit :

**1-**  $A_0B_0=00$  et  $A_1B_1=00$ , Lorsque tous les ports d'entrée  $Pe_1$ ,  $Pe_2$ ,  $Pe_3$  et  $Pe_4$  sont à l'état inactive "OFF", la puissance optique des ports de sortie  $Ps_1$  et  $Ps_2$  et  $Ps_3$  sont à l'état "OFF". Par conséquent, les sommes «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à "0". La **figure IV-3** montre le cas initial de l'additionneur à 2-bit,  $A_0B_0=00$  et  $A_1B_1=00$ .

**2-**  $A_0B_0=00$  et  $A_1B_1=10$  : Un seul port d'entrée  $Pe_3$  est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $A_1$  passe par le guide d'onde  $W_1$  vers le guide d'onde  $W_3$ . Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le

résonateur en anneau  $R1_{90}$  et transmis vers le guide d'onde  $W5$  et passe vers le guide d'onde  $W6$ . Par ailleurs, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R2_{90}$  et transmis à travers le guide d'onde d'entrée  $W7$  vers le port de sortie  $Ps2$  de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'ondes ( $W3$ ,  $W6$ ) et les anneaux ( $R1_{80}$ ,  $R2_{80}$ ). Les états logiques des ports de sortie  $Ps1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "0", "1" et "0", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 0%, 86 % et 4 %, respectivement. La **figure IV-3 (a)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme «  $S_0$  : 0% », «  $S_1$  : 86% » et la retenue «  $R_1$  : 4% ».

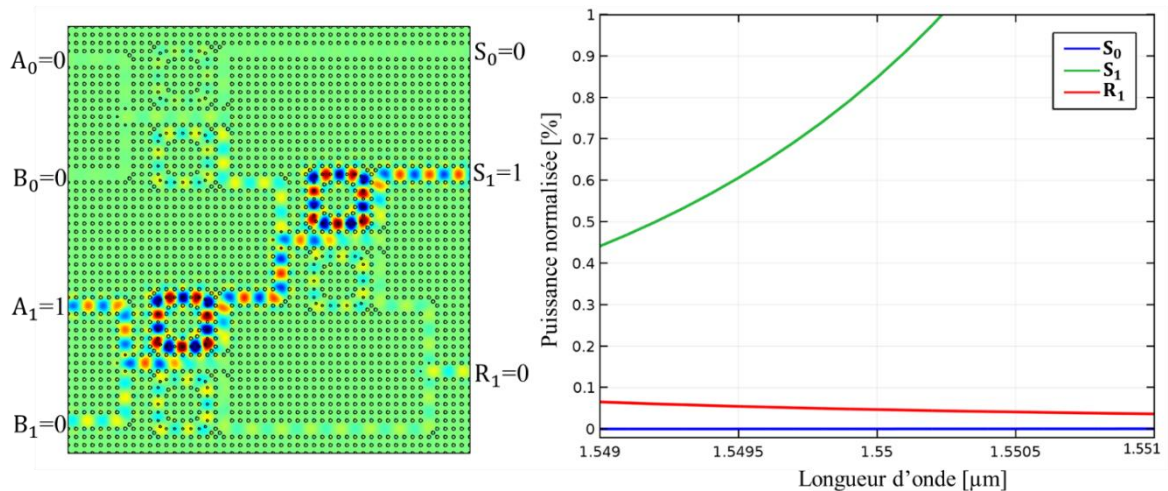


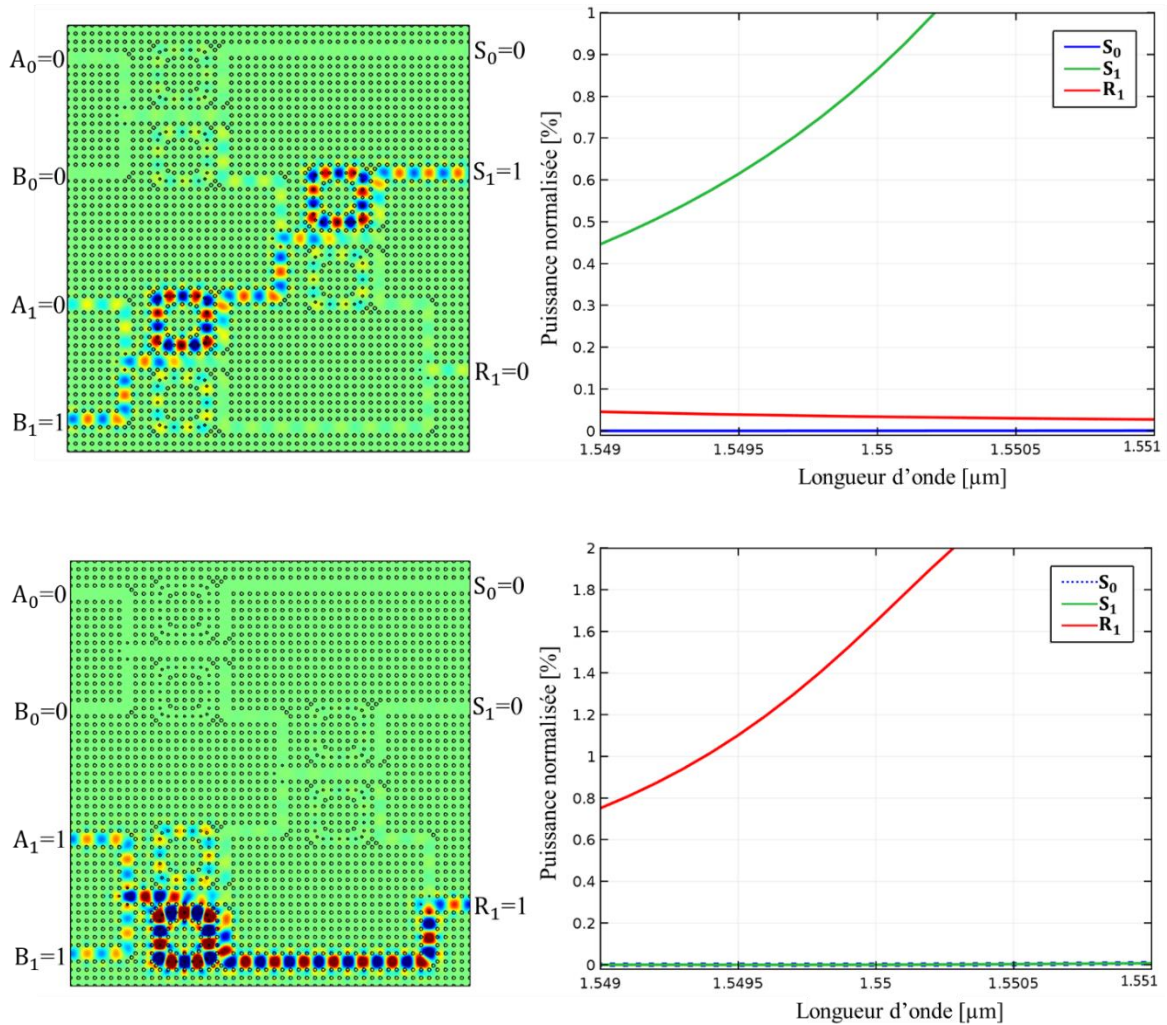
**Figure IV-3** : La structure de l'additionneur 2 bit dans le cas initial (Cas#1 :  $A_0B_0=00/ A_1B_1=00$ ).

**3-**  $A_0B_0=00$  et  $A_1B_1=01$  : Un seul port d'entrée  $Pe4$  est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $B_1$  passe par le guide d'onde  $W2$  vers le guide d'onde  $W3$ . Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R1_{90}$  et transmis vers le guide d'onde  $W5$  et passe vers le guide d'onde  $W6$ . Par ailleurs, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R2_{90}$  et transmis à travers le guide d'onde  $W7$  vers le port de sortie  $Ps2$  de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'ondes ( $W3$ ,  $W6$ ) et les anneaux ( $R1_{80}$ ,  $R2_{80}$ ). Les états logiques des ports de sortie  $Ps1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "0", "1" et "0", respectivement. Les

valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 0%, 88 % et 3 %, respectivement. La **figure IV-3 (b)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme «  $S_0$  : 0% », «  $S_1$  : 88% » et la retenue «  $R_1$  : 3% ».

**4-  $A_0B_0=00$  et  $A_1B_1=11$**  : Deux ports d'entrée  $Pe_3$  et  $Pe_4$  sont à l'état active "ON", deux signaux optiques lumineux sont injectées dans les ports d'entrée  $A_1$ ,  $B_1$ . L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde  $W_3$  augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{180}$  et transmis aux guides d'onde  $W_9$  et  $W_{10}$  vers le port de sortie  $Ps_3$  de la retenue «  $R_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'onde  $W_3$  et l'anneau  $R_{90}$ . Les états logiques des ports de sortie  $Ps_1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps_3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "0", "0" et "1", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 0%, 1 % et 163 %, respectivement. La **figure IV-3 (c)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme «  $S_0$  : 0% », «  $S_1$  : 1% » et la retenue «  $R_1$  : 163% ».





**Figure IV-4 :** Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#1 :  $A_0B_0=00$  & b)  $A_1B_1=10$ , c)  $A_1B_1=01$  et d)  $A_1B_1=11$ .

**Cas#2 :** Un port d'entrée Pe1 de demi-additionneur est à l'état active « ON », ( $A_0B_0=10$ ), le signal optique lumineux de port d'entrée Pe1 se propage dans le guide d'onde W11 vers le guide d'onde W13 et sera couplée dans le résonateur en anneau R0<sub>90</sub>. Ensuite, ce signal transmis au guide d'onde W14 vers le port de sortie Ps1 de la somme «  $S_0$  » de demi-additionneur. L'état logique de la somme «  $S_0$  » est égale à "1". Dans ce cas, 4 états ont été distingués pour l'additionneur complet de la structure ( $A_1B_1=00, A_1B_1=10, A_1B_1=01, A_1B_1=11$ ) et peuvent être résumés comme suit :

**1-**  $A_0B_0=10$  et  $A_1B_1=00$ , Lorsque deux ports d'entrée Pe3 et Pe4 sont à l'état inactive "OFF", la puissance optique des ports de sortie Ps2 et Ps3 sont à l'état "OFF". Par conséquent, les sommes «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1", "0", "0". Les valeurs des puissances

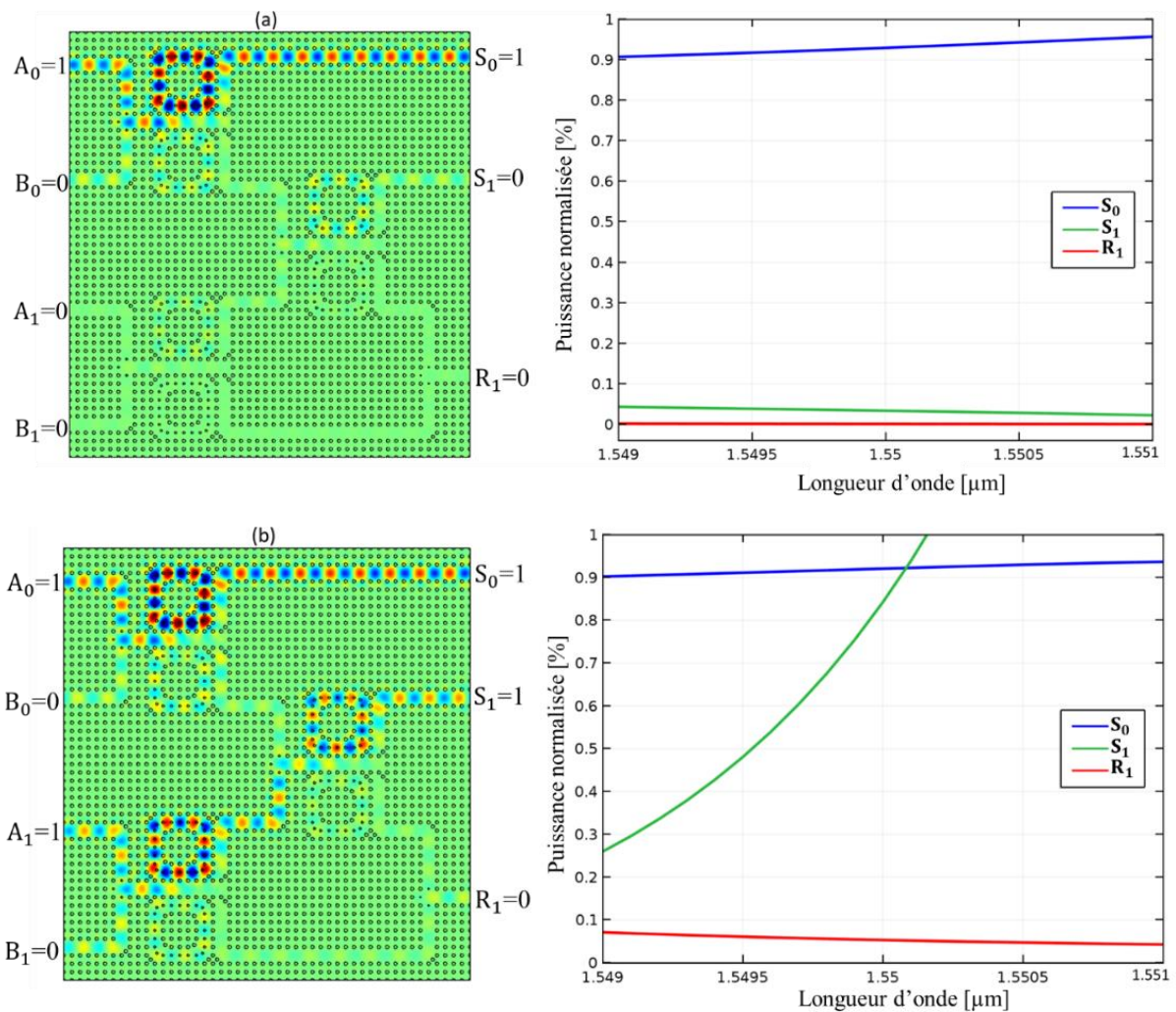
normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 92%, 2% et 0%, respectivement. La **figure IV-5 (a)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

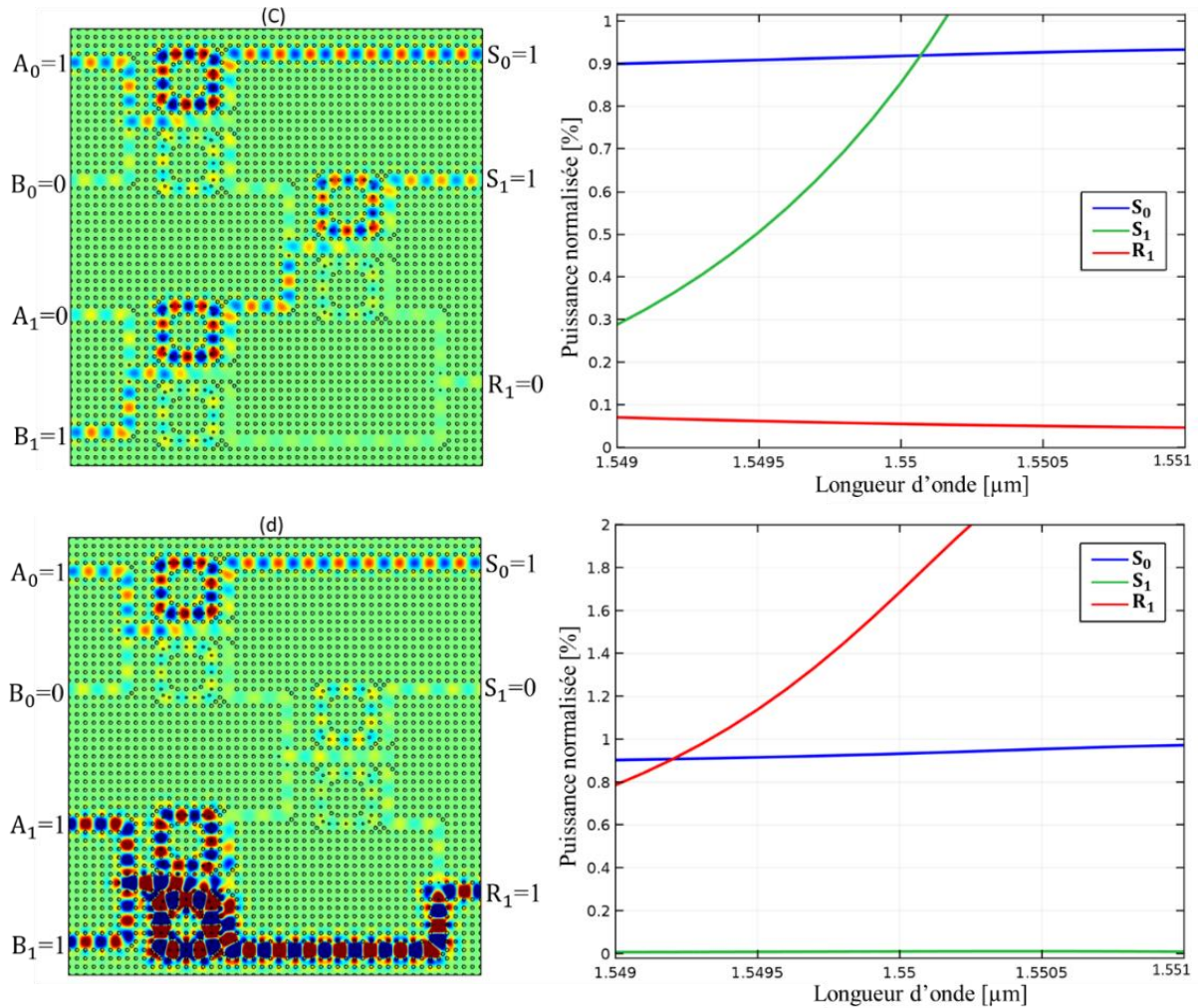
**2-**  $A_0B_0=10$  et  $A_1B_1=10$  : Le port d'entrée  $Pe_3$  est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté du port d'entrée  $A_1$  passe par le guide d'onde  $W_1$  vers le guide d'onde  $W_3$ . Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{190}$  et se propage dans le guide d'onde  $W_5$  et transmis vers le guide d'onde  $W_6$ . Par ailleurs, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{290}$  et transmis à travers le guide d'onde  $W_7$  vers le port de sortie  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'ondes ( $W_3$ ,  $W_6$ ) et les anneaux ( $R_{180}$ ,  $R_{280}$ ). Les états logiques des ports de sortie  $Ps_1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps_3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1", "1" et "0", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 92%, 86 % et 5 %, respectivement. La **figure IV-5 (b)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

**3-**  $A_0B_0=10$  et  $A_1B_1=01$  : Le port d'entrée  $Pe_4$  est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté du port d'entrée  $B_1$  passe par le guide d'onde  $W_2$  vers le guide d'onde  $W_3$ . Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{190}$  et se propage dans le guide d'onde  $W_5$  et transmis vers le guide d'onde  $W_6$ . Par ailleurs, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{290}$  et transmis à travers le guide d'onde  $W_7$  vers le port de sortie  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'ondes ( $W_3$ ,  $W_6$ ) et les anneaux ( $R_{180}$ ,  $R_{280}$ ). Les états logiques des ports de sortie  $Ps_1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps_3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1", "1" et "0", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 92%, 88 % et 5 %, respectivement. La **figure IV-5 (c)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

**4-**  $A_0B_0=10$  et  $A_1B_1=11$  : Deux ports d'entrée  $Pe_3$  et  $Pe_4$  sont à l'état active "ON", deux signaux optiques lumineux sont injectés dans les ports d'entrée  $A_1$ ,  $B_1$ . L'intensité de puissance de signal

optique combinée dans guide d'onde W3 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau R1<sub>80</sub> et transmis aux guides d'onde W9 et W10 vers le port de sortie Ps3 de la retenue « R<sub>1</sub> » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'onde W3 et l'anneau R1<sub>90</sub>. Les états logiques des ports de sortie Ps1 de la somme « S<sub>0</sub> », Ps2 de la somme « S<sub>1</sub> » et Ps3 de la retenue « R<sub>1</sub> » sont égales à "1", "0" et "1", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme « S<sub>0</sub> », « S<sub>1</sub> » et la retenue « R<sub>1</sub> » sont égales à 0%, 1 % et 163 %, respectivement. La **figure IV-5 (d)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et la retenue R<sub>1</sub>.





**Figure IV-5** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#2 :  $A_0B_0=10$  & a)  $A_1B_1=00$ , b)  $A_1B_1=10$ , c)  $A_1B_1=01$  et d)  $A_1B_1=11$ .

**Cas#3** : Un port d'entrée Pe2 de demi-additionneur est à l'état active « ON », ( $A_0B_0=01$ ), le signal optique lumineux de port d'entrée Pe2 se propage dans le guide d'onde W12 vers le guide d'onde W13 et sera couplée dans le résonateur en anneau R0<sub>90</sub>. Ensuite, ce signal transmis au guide d'onde W14 vers le port de sortie Ps1 de la somme «  $S_0$  » de demi-additionneur. L'état logique de la somme «  $S_0$  » est égale à "1". Dans ce cas, 4 états ont été distingués pour l'additionneur complet de la structure ( $A_1B_1=00$ ,  $A_1B_1=10$ ,  $A_1B_1=01$ ,  $A_1B_1=11$ ) et peuvent être résumés comme suit :

**1-**  $A_0B_0=01$  et  $A_1B_1=00$ , Lorsque deux ports d'entrée Pe3 et Pe4 sont à l'état inactive "OFF", la puissance optique des ports de sortie Ps2 et Ps3 sont à l'état "OFF". Par conséquent, les sommes «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1", "0", "0". Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 94%, 2% et 0%, respectivement. La **figure IV-6 (a)** représente la distribution du champ électrique et le

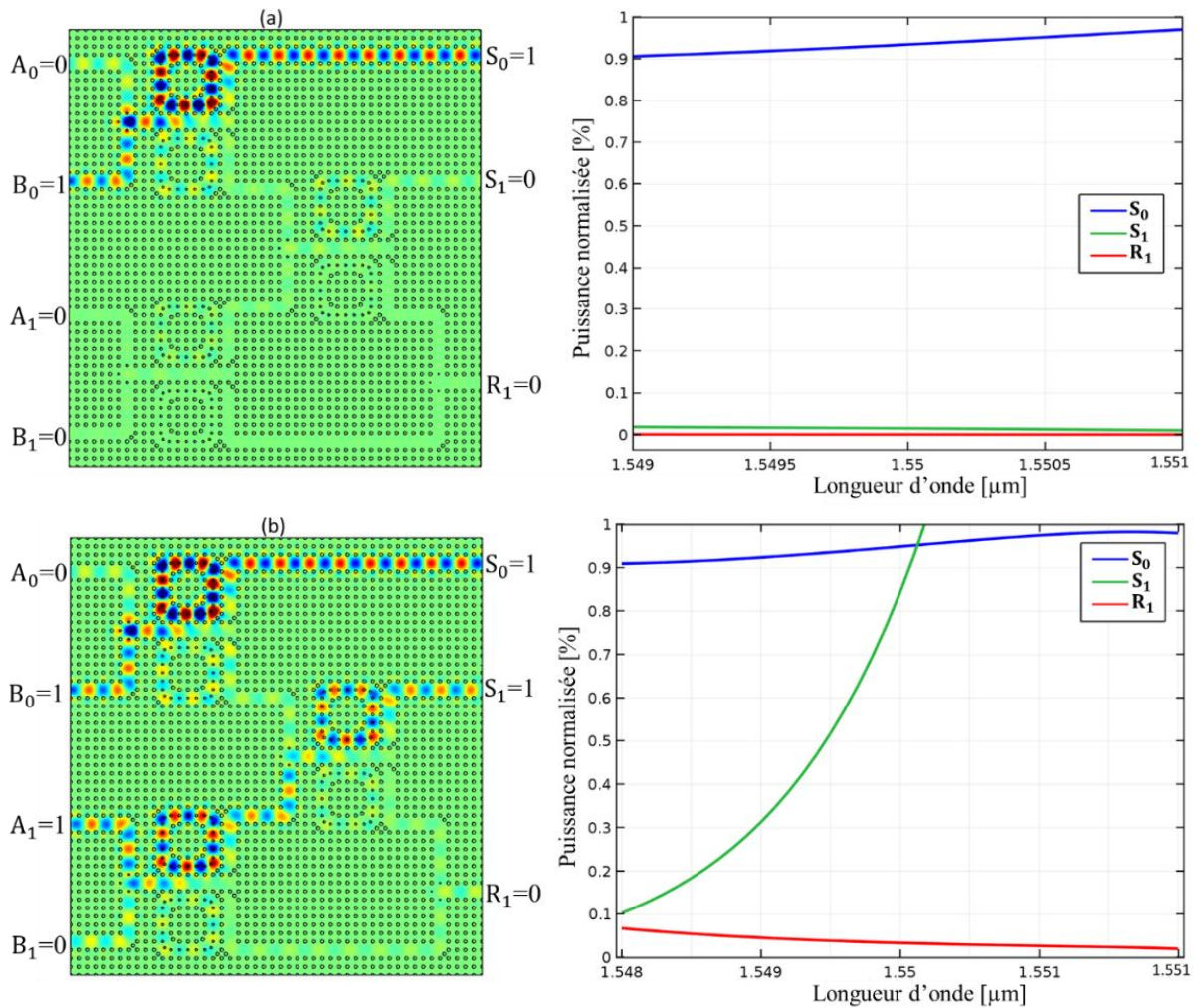
diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

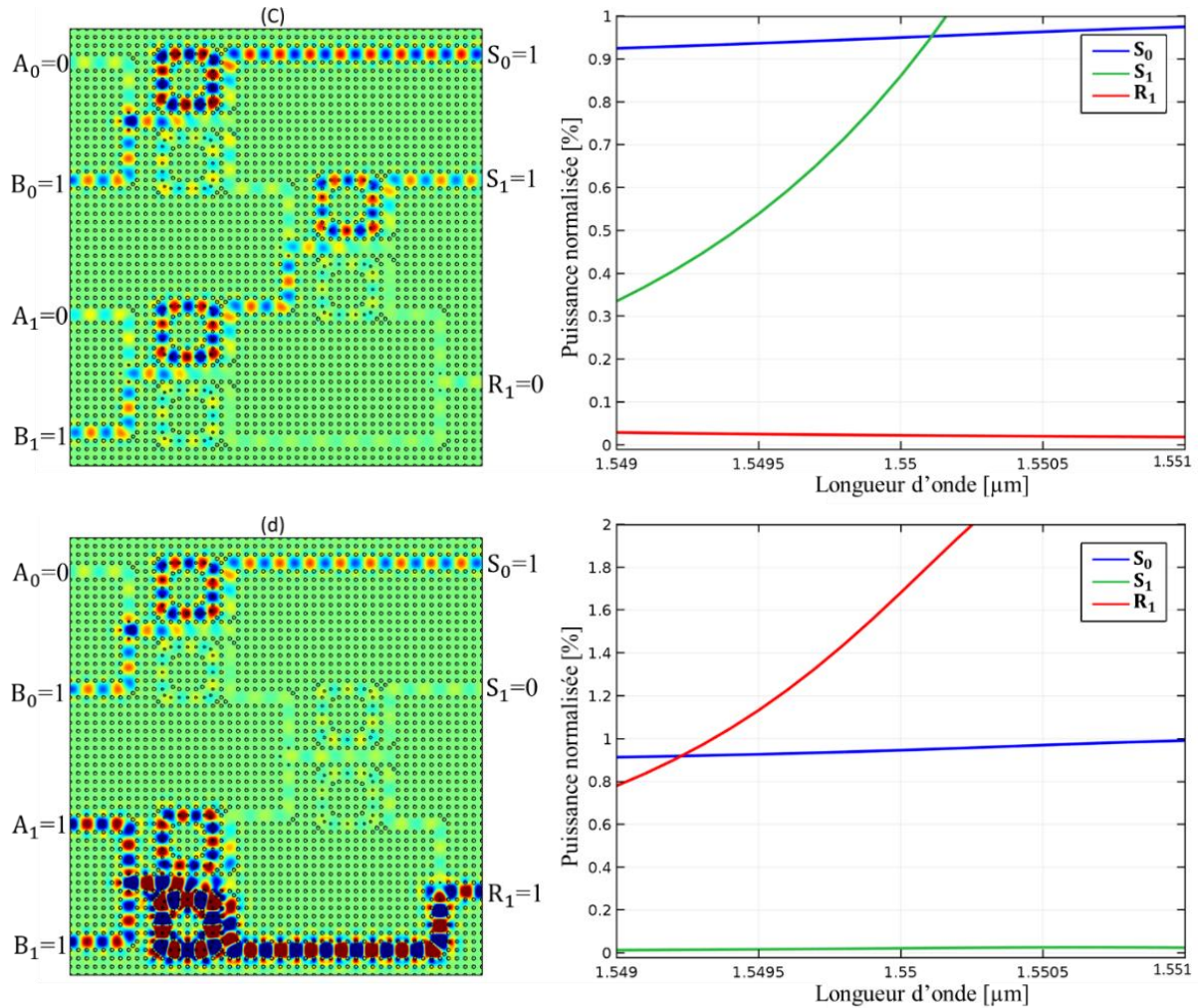
**2-**  $A_0B_0=01$  et  $A_1B_1=10$  : Le port d'entrée  $Pe_3$  est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté du port d'entrée  $A_1$  passe par le guide d'onde  $W_1$  vers le guide d'onde  $W_3$ . Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{190}$  et se propage dans le guide d'onde  $W_5$  et transmis vers le guide d'onde  $W_6$ . Par ailleurs, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{290}$  et transmis à travers le guide d'onde  $W_7$  vers le port de sortie  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'ondes ( $W_3$ ,  $W_6$ ) et les anneaux ( $R_{180}$ ,  $R_{280}$ ). Les états logiques des ports de sortie  $Ps_1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps_3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1", "1" et "0", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 94%, 86 % et 4 %, respectivement. La **figure IV-6 (b)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

**3-**  $A_0B_0=01$  et  $A_1B_1=01$  : Le port d'entrée  $Pe_4$  est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté du port d'entrée  $B_1$  passe par le guide d'onde  $W_2$  vers le guide d'onde  $W_3$ . Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_3$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{190}$  et se propage dans le guide d'onde  $W_5$  et transmis vers le guide d'onde  $W_6$ . Par ailleurs, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde  $W_6$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{290}$  et transmis à travers le guide d'onde  $W_7$  vers le port de sortie  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'ondes ( $W_3$ ,  $W_6$ ) et les anneaux ( $R_{180}$ ,  $R_{280}$ ). Les états logiques des ports de sortie  $Ps_1$  de la somme «  $S_0$  »,  $Ps_2$  de la somme «  $S_1$  » et  $Ps_3$  de la retenue «  $R_1$  » sont égales à "1", "1" et "0", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 94%, 88 % et 3 %, respectivement. La **figure IV-6 (c)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

**4-**  $A_0B_0=01$  et  $A_1B_1=11$  : Deux ports d'entrée  $Pe_3$  et  $Pe_4$  sont à l'état active "ON", deux signaux optiques lumineux sont injectés dans les ports d'entrée  $A_1$ ,  $B_1$ . L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde  $W_3$  augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison

de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau R1<sub>80</sub> et transmis aux guides d'onde W9 et W10 vers le port de sortie Ps3 de la retenue « R<sub>1</sub> » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'onde W3 et l'anneau R1<sub>90</sub>. Les états logiques des ports de sortie Ps1 de la somme « S<sub>0</sub> », Ps2 de la somme « S<sub>1</sub> » et Ps3 de la retenue « R<sub>1</sub> » sont égales à "1", "0" et "1", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme « S<sub>0</sub> », « S<sub>1</sub> » et la retenue « R<sub>1</sub> » sont égales à 0%, 1 % et 163 %, respectivement. La **figure IV-6 (d)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et la retenue R<sub>1</sub>.





**Figure IV-6 :** Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#3 :  $A_0B_0=01/$  a)  $A_1B_1=00$ , b)  $A_1B_1=10$ , c)  $A_1B_1=01$  et d)  $A_1B_1=11$ .

**Cas#4 :** Deux ports d'entrée  $Pe_1$  et  $Pe_2$  sont à l'état active "ON", les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_0, B_0$  sont combinés à un seul signal, qui se transmet vers le guide d'onde  $W_{13}$ . L'intensité de puissance de signal optique combinée dans le guide d'onde  $W_{13}$  augmente et est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet Kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde  $W_{13}$  sera couplée dans le résonateur en anneau  $R_{080}$  et se propage dans le guide d'onde  $W_4$  et, de plus, aucun couplage entre les guides d'onde  $W_{13}$  et l'anneau  $R_{090}$ . Par conséquent, la somme «  $S_0$  » des bits  $A_0$  et  $B_0$  de demi-additionneur est égale à 0 et son retenue (signal de guide d'onde  $W_4$ ) est égale à 1 sera sommée avec  $A_1, B_1$  (le cas d'additionneur complet avec  $C_{in}=1$ ). Dans ce cas, 4 états ont été distingués pour l'additionneur complet de la structure ( $A_1B_1=00, A_1B_1=10, A_1B_1=01, A_1B_1=11$ ) et peuvent être résumés comme suit :

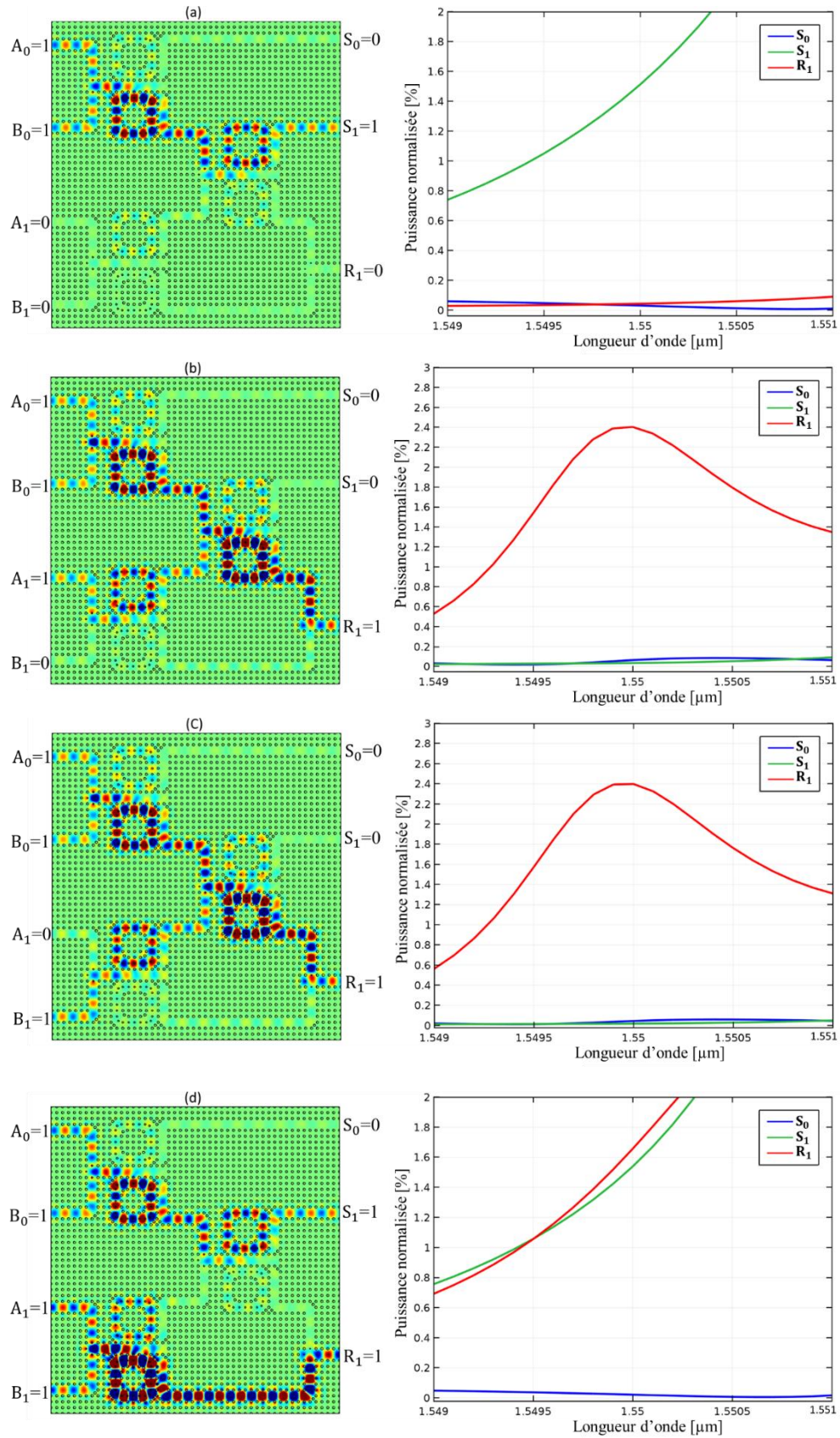
**1-**  $A_0B_0=11$  et  $A_1B_1=00$ , Lorsque deux ports d'entrée Pe3 et Pe4 sont à l'état inactive "OFF", la puissance optique des ports d'entrée Pe3 et Pe4 de  $A_1$  et  $B_1$  sont égales à 0. Donc, aucun signal optique se propage vers le guide d'onde W5. Le signal optique dans le guide d'onde W4 (retenue de demi-additionneur  $C_{in}=1$ ) transmis vers le guide d'onde W6. Par ailleurs, le signal optique sera couplé dans le résonateur R2<sub>90</sub> et transmis à travers le guide d'onde W7 vers Ps2 de la somme «  $S_1$  » et, de plus, aucun couplage entre le guide d'onde W6 et le résonateur en anneau R2<sub>80</sub>. Par conséquent, l'état logique des sorties «  $S_0$  », «  $S_1$  » et «  $R_1$  » sont égales à "0", "1" et "0", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 2%, 152% et 3%, respectivement. La **figure IV-7 (a)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

**2-**  $A_0B_0=11$  et  $A_1B_1=10$  : Le port d'entrée Pe3 est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $A_1$  passe par le guide d'onde W1 vers le guide d'onde W3. Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau R1<sub>90</sub> et se propage dans le guide d'onde W5. Ce signal sera combiné avec le signal optique transmis par le demi-additionneur (retenue de demi-additionneur  $C_{in}=1$ ) de guide d'onde W4. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans le guide d'onde W6 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W6 sera couplée dans le résonateur en anneau R2<sub>80</sub> et transmis aux guides d'onde W8 et W10 vers le port de sortie Ps3 de la retenue «  $R_1$  » et, de plus, aucun couplage entre le guide d'onde W6 et l'anneau R2<sub>90</sub>. Par conséquent, l'état logique des sorties «  $S_0$  », «  $S_1$  » et «  $R_1$  » sont égales à "0", "0" et "1", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme «  $S_0$  », «  $S_1$  » et la retenue «  $R_1$  » sont égales à 2%, 1% et 240%, respectivement. La **figure IV-7 (b)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme  $S_0$ ,  $S_1$  et la retenue  $R_1$ .

**3-**  $A_0B_0=11$  et  $A_1B_1=01$  : Le port d'entrée Pe4 est à l'état active "ON", le signal optique lumineux est injecté dans le port d'entrée  $B_1$  passe par le guide d'onde W2 vers le guide d'onde W3. Ensuite, la puissance optique de signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau R1<sub>90</sub> et se propage dans le guide d'onde W5. Ce signal sera combiné avec le signal optique transmis par le demi-additionneur (retenue de demi-additionneur  $C_{in}=1$ ) de

guide d'onde W4. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans le guide d'onde W6 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W6 sera couplée dans le résonateur en anneau R2<sub>80</sub> et transmis aux guides d'onde W8 et W10 vers le port de sortie Ps3 de la retenue « R<sub>1</sub> » et, de plus, aucun couplage entre le guide d'onde W6 et l'anneau R2<sub>90</sub>. Par conséquent, l'état logique des sorties « S<sub>0</sub> », « S<sub>1</sub> » et « R<sub>1</sub> » sont égales à "0", "0" et "1", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme « S<sub>0</sub> », « S<sub>1</sub> » et la retenue « R<sub>1</sub> » sont égales à 2%, 1% et 240%, respectivement. La **figure IV-7 (c)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et la retenue R<sub>1</sub>.

**4-** A<sub>0</sub>B<sub>0</sub>=11 et A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>=11 : Deux ports d'entrée Pe3 et Pe4 sont à l'état active "ON", deux signaux optiques lumineux sont injectés dans les ports d'entrée A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W3 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W3 sera couplée dans le résonateur en anneau R1<sub>80</sub> et transmis aux guides d'onde W9 et W10 vers le port de sortie Ps3 de la retenue « R<sub>1</sub> » et, de plus, aucun couplage entre les guides d'onde W3 et l'anneau R1<sub>90</sub>. Le signal optique dans le guide d'onde W4 (retenue de demi-additionneur Cin =1) transmis vers le guide d'onde W6. Par ailleurs, le signal optique sera couplé dans le résonateur R2<sub>90</sub> et transmis à travers le guide d'onde W7 vers Ps2 de la somme « S<sub>1</sub> » et, de plus, aucun couplage entre le guide d'onde W6 et le résonateur en anneau R2<sub>80</sub>. Par conséquent, l'état logique des sorties « S<sub>0</sub> », « S<sub>1</sub> » et « R<sub>1</sub> » sont égales à "0", "1" et "1", respectivement. Les valeurs des puissances normalisées de la somme « S<sub>0</sub> », « S<sub>1</sub> » et la retenue « R<sub>1</sub> » sont égales à 2%, 153 % et 169 %, respectivement. La **figure IV-7 (d)** représente la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde de la somme S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et la retenue R<sub>1</sub>.



**Figure IV-7** : Distribution du champ électrique (à gauche) et diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue (à droite), Cas#4 :  $A_0B_0=11$  & a)  $A_1B_1=00$ , b)  $A_1B_1=10$ , c)  $A_1B_1=01$  et d)  $A_1B_1=11$ .

Les résultats de simulation pour les différents cas étudiés sont présentés dans le **tableau IV-1**.

| Cas | Entrées        |                |                |                | Somme (S <sub>0</sub> ) |                            | Somme (S <sub>1</sub> ) |                          | Retenue (R <sub>1</sub> ) |                          |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|     | A <sub>0</sub> | B <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | B <sub>1</sub> | Etat logique            | Puissance normalisée e [%] | Etat logique            | Puissance normalisée [%] | Etat logique              | Puissance normalisée [%] |
| #1  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0                       | 0                          | 0                       | 0                        | 0                         | 0                        |
|     | 0              | 0              | 1              | 0              | 0                       | 0                          | 1                       | <b>86</b>                | 0                         | 4                        |
|     | 0              | 0              | 0              | 1              | 0                       | 0                          | 1                       | 88                       | 0                         | 3                        |
|     | 0              | 0              | 1              | 1              | 0                       | 0                          | 0                       | 1                        | 1                         | <b>163</b>               |
| #2  | 1              | 0              | 0              | 0              | 1                       | 92                         | 0                       | <b>2</b>                 | 0                         | 0                        |
|     | 1              | 0              | 1              | 0              | 1                       | <b>92</b>                  | 1                       | 86                       | 0                         | 5                        |
|     | 1              | 0              | 0              | 1              | 1                       | 92                         | 1                       | 88                       | 0                         | <b>5</b>                 |
|     | 1              | 0              | 1              | 1              | 1                       | 92                         | 0                       | 1                        | 1                         | 167                      |
| #3  | 0              | 1              | 0              | 0              | 1                       | 94                         | 0                       | 2                        | 0                         | 0                        |
|     | 0              | 1              | 1              | 0              | 1                       | 94                         | 1                       | 86                       | 0                         | 4                        |
|     | 0              | 1              | 0              | 1              | 1                       | 94                         | 1                       | 88                       | 0                         | 3                        |
|     | 0              | 1              | 1              | 1              | 1                       | 94                         | 0                       | 2                        | 1                         | 168                      |
| #4  | 1              | 1              | 0              | 0              | 0                       | <b>2</b>                   | 1                       | 152                      | 0                         | 3                        |
|     | 1              | 1              | 1              | 0              | 0                       | 2                          | 0                       | 1                        | 1                         | 240                      |
|     | 1              | 1              | 0              | 1              | 0                       | 2                          | 0                       | 1                        | 1                         | 240                      |
|     | 1              | 1              | 1              | 1              | 0                       | 2                          | 1                       | 153                      | 1                         | 169                      |

**Tableau IV-1** : Résultats de simulation pour les différents cas de l'additionneur 2-bit.

Le rapport de contraste de chaque port de sortie Ps<sub>1</sub>, Ps<sub>2</sub> et Ps<sub>3</sub> de la somme S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et la retenue R<sub>1</sub> est calculés à l'aide de la formule suivante :

$$CR=10 \times \log (M_1/M_0),$$

Où : M<sub>1</sub> et M<sub>0</sub> sont le minimum et le maximum puissance normalisée aux ports de sortie S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et R<sub>1</sub> de l'état logique 1 et 0, respectivement [1], [2], [3].

D'après les résultats du tableau IV.1, les puissances normalisées minimale et maximale (M<sub>1</sub>/M<sub>0</sub>) aux ports de sortie S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et R<sub>1</sub> pour les états logiques 1 et 0 sont (92/2), (86/2) et (163/5) respectivement. En conséquence, les rapports de contraste des sorties S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub> et R<sub>1</sub> sont respectivement de 16,62 dB, 16,33 dB et 15,13 dB.

Les résultats de simulation démontrent que la structure proposée correspond à un additionneur 2 bit fonctionne autour de la longueur d'onde de 1,55 μm.

## IV.2.2 Comparaison additionneur 2 bit proposé avec les structures existantes

Dans cette section, on présente une comparaison entre l'additionneur 2-bit proposé et les structures des travaux récents on termes la technique, nombre des ports, l'application, matériel non linéaire utilisé, l'indice de réfraction, la taille de la structure, et la méthode de simulation.

| Ref             | Technique utilisée                  | Nombre des Ports | Application             | Matériel non linéaire        | Indice de réfraction                            | Taille de structure [ $\mu\text{m}^2$ ] | Rapport de contraste [dB]<br>S0, S1, R1 | Méthode de simulation |
|-----------------|-------------------------------------|------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|
|                 |                                     |                  |                         |                              | Linéaire & Effet kerr [ $\text{m}^2/\text{w}$ ] |                                         |                                         |                       |
| [6]             | Nonlinear PhCRRs and Two FA         | 12               | 2-bit adder/substractor | NA                           | NA                                              | NA                                      | NA                                      | FDTD/PWEM             |
| [7]             | Nonlinear PhCRRs and Two FA         | 10               | 2-bit additionneur      | silicon nanocrystals (Si-nc) | $1.5 \& 10^{-16}$                               | 681                                     | NA                                      | FDTD/PWEM             |
| Travail proposé | Nonlinear PhCRRs and One HA+ One FA | 7                | 2-bit additionneur      | Doped glass                  | $1.4 \& 10^{-14}$                               | 893                                     | 16,62/<br>16,33/<br>15,13               | FEM/PWEM              |

**Tableau IV-2** : Comparaison l'additionneur proposé avec les structures précédentes.

NA : Non appliqué

Comme présenté dans le **tableau IV-2**, quelques travaux ont été publiés et peuvent être utilisés pour effectuer une addition/soustraction de 2 bits [6], ou seulement l'opération d'addition, [7]. Les deux structures [6], [7] sont réalisées en mettant en cascade deux additionneurs complets. La structure proposée est réalisée en mettant en cascade un demi-additionneur et un additionneur complet présentés dans les références [4], [5], avec sept ports d'entrée/sortie et une taille de  $893 \mu\text{m}^2$ .

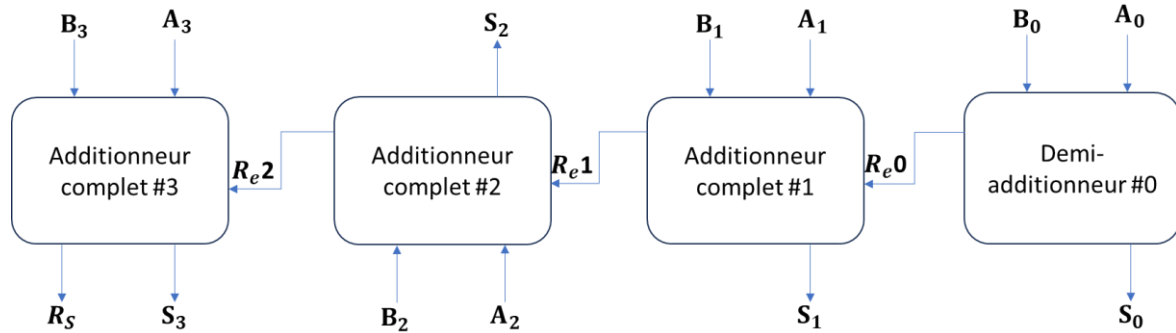
Autre comparaison importante, pour évaluer les performances de l'additionneur 2 bits, tous les cas ont été simulés (16 cas) et de calculer les rapports de contraste des ports de sortie S0, S1, R1 ont été calculés. Un autre avantage important de la structure proposée est qu'il est possible de concevoir un additionneur optique pour effectuer une addition de n bits.

### IV.3 Conception additionneur tout optique 4-bit à base 2D PhC non linéaires

La structure de l'additionneur 4 bits est une combinaison d'un demi-additionneur et de trois additionneurs complets. En général, le principe de fonctionnement de l'additionneur 4 bits est le processus de quatre additionneurs liés entre eux. La **Figure IV-8** montre le schéma-blocs de l'additionneur de deux nombres binaires à 4 bits ( $A=A_3A_2A_1A_0$  et  $B=B_3B_2B_1B_0$ ). Les paires de bits «  $A_i$  » et «  $B_i$  » sont additionnés colonne par colonne et les retenues «  $R_{ei}$  » sont

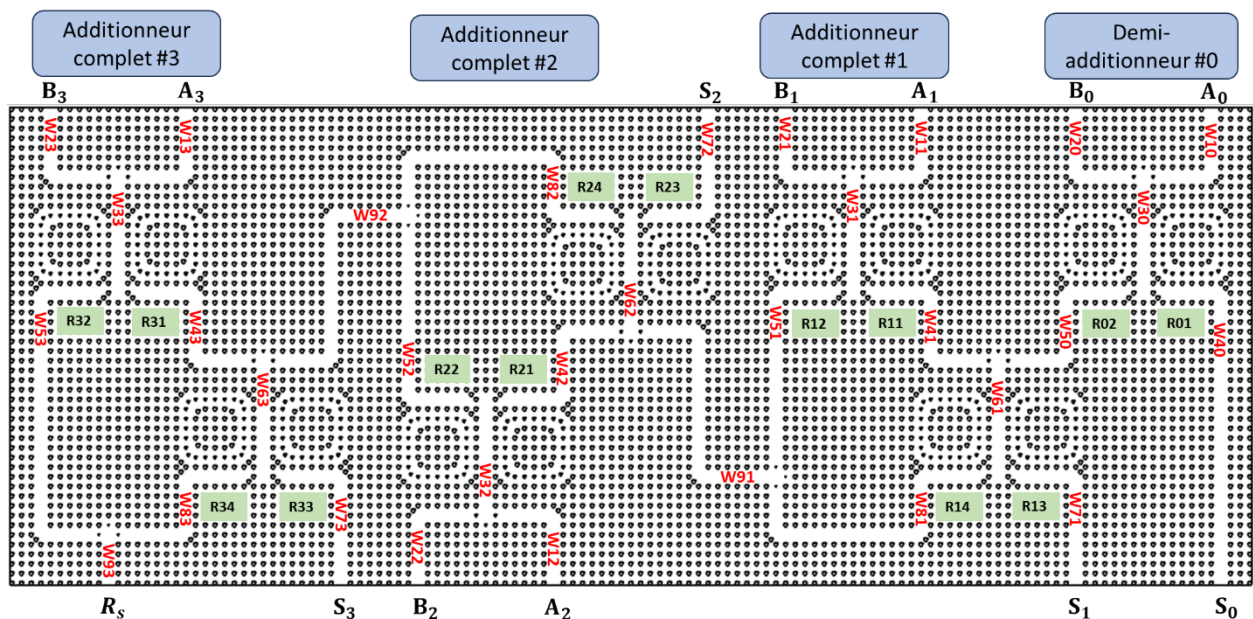
propagées vers la gauche et additionné au nombre suivant, ce type de l'additionneur est appelé *additionneur par propagation de retenues*.

Pour la conception la structure numérique tout optique proposée, en mettant en cascade un demi-additionneur et trois additionneurs complets détaillée dans le chapitre précédent. La **figure IV-9**, montre l'additionneur tout optique 4-bit à base 2DPhC.



**Figure IV-8** : Schéma-blocs général de l'additionneur 4-bit.

Tous les paramètres utilisés ont été discuté dans le chapitre précédent (l'indice de réfraction de silicium, constante périodique, rayon de tiges), la longueur d'ondes, diagramme de bande BIP, et la méthode de simulation.



**Figure IV-9** : Additionneur tout optique 4-bit à base 2D cristal photonique 2DPhC.

### IV.3.1 Simulation et résultats

Nous avons simulé la structure finale afin d'évaluer la fonctionnalité de la structure proposée. Trois cas ont été étudiés : cas#1(A=1111 et B=1111), cas#2 (A=1010 et B=1111), et

cas#3 ( $A=0101$  et  $B=1010$ ). Pour cela, huit sources optiques de type Gaussien ont été utilisées aux ports d'entrée  $A_i$  et  $B_i$  avec une longueur d'onde centrale de  $1,55 \mu\text{m}$  et l'intensité optique égale à  $10 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ .

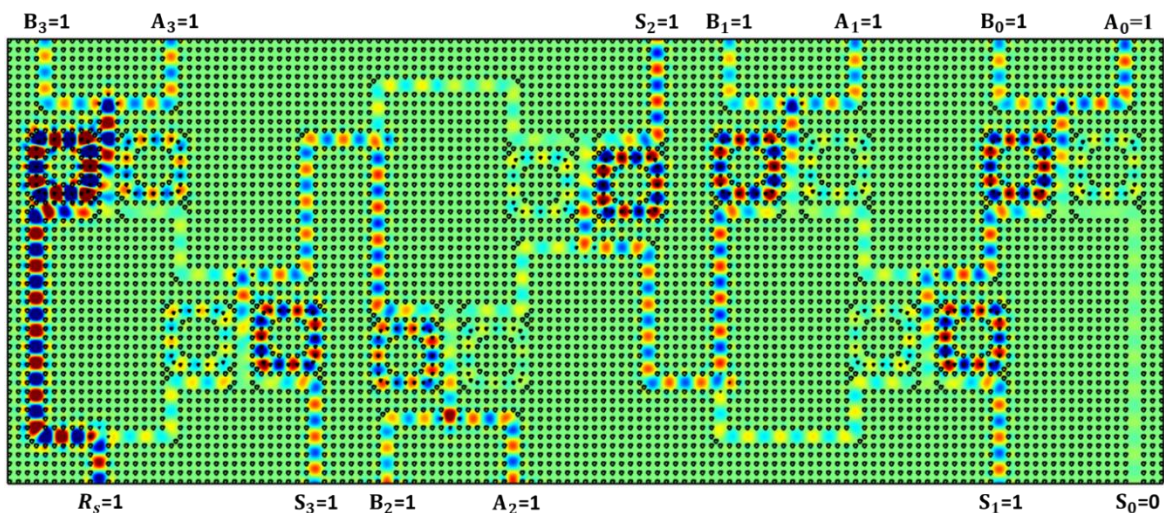
La distribution du champ électrique et la puissance normalisée de l'additionneur 4-bit ont présentés dans les **figure IV-10** à **IV-15**.

**Cas #1** : Ce cas représente la somme de deux nombres binaires  $A=1111$  et  $B=1111$ . L'opération de l'addition est détaillée ci-dessous :

**1-** Demi additionneur #0 : Lorsque deux ports d'entrée sont à l'état active "ON", ( $A_0 = B_0=1$ ). Les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_0$ ,  $B_0$  sont combinés à un seul signal, qui se transmis vers le guide d'onde W30. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W30 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W30 sera couplée dans le résonateur en anneau R02 et se propage dans le guide d'onde W30 vers W50 et, de plus, aucun couplage entre le guide d'onde W30 et l'anneau R01. Par conséquent, la somme de deux bits  $A_0$ ,  $B_0$  au port de sortie  $S_0$  est égale à 0, et la retenue du demi additionneur #0 est égale à 1 et sera sommé avec  $A_1$ ,  $B_1$  de l'additionneur complet #1 à travers le guide d'onde W50.

**2-** Additionneur complet #1 : Lorsque deux ports d'entrée sont à l'état active "ON", ( $A_1 = B_1=1$ ). Les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_1$ ,  $B_1$  sont combinés à un seul signal, qui se transmis vers le guide d'onde W31. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W31 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W31 sera couplée dans le résonateur en anneau R12 et se propage dans le guide d'onde W51 et sera transmise vers le guide W91. Par conséquent, la retenue de l'additionneur #1 est égale à 1 et sera sommé avec  $A_2$ ,  $B_2$  de l'additionneur complet #2 à travers le guide d'onde W91. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W31 et l'anneau R11. Le signal optique de demi additionneur #0 se propage dans le guide d'onde W50, W61 et le signal sera transmise vers la sortie  $S_1$  à travers le résonateur en anneau R13. Donc, la somme de deux bits  $A_1$ ,  $B_1$  au port de sortie  $S_1$  est égale à 1.

**3-** Additionneur complet #2 : Lorsque deux ports d'entrée sont à l'état active "ON", ( $A_2 = B_2=1$ ). Les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_2, B_2$  sont combinés à un seul signal, qui se transmet vers le guide d'onde W32. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W32 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W32 sera couplée dans le résonateur en anneau R22 et se propage dans le guide d'onde W32 vers W52 et sera transmise vers le guide W92. Par conséquent, la retenue de l'additionneur #2 est égale à 1 et sera sommé avec  $A_3, B_3$  de l'additionneur complet #3 à travers le guide d'onde W92. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W32 et l'anneau R21. Le signal optique de l'additionneur complet #1 se propage dans le guide d'onde W91, W62 et le signal sera transmise vers la sortie  $S_2$  à travers le résonateur en anneau R23. Donc, la somme de deux bits  $A_2, B_2$  au port de sortie  $S_2$  est égale à 1.

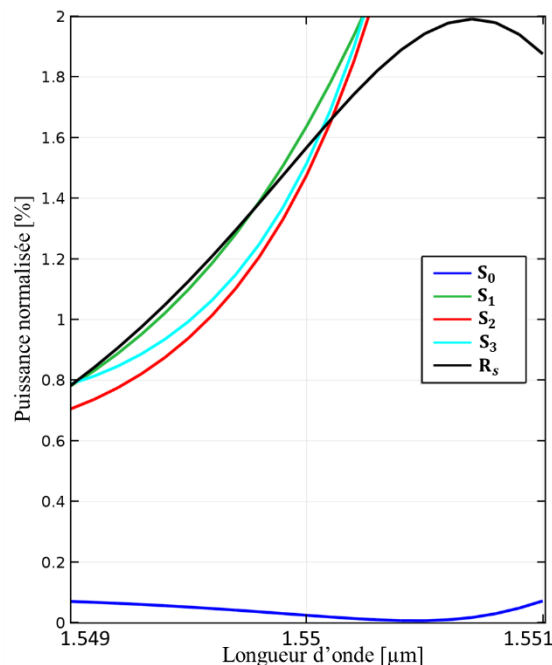


**Figure IV-10 :** Distribution du champ électrique de l'additionneur 4-bit Cas#1 :  $A=1111$  and  $B=1111$ ).

**4-** Additionneur complet #3 : Lorsque deux ports d'entrée sont à l'état active "ON", ( $A_3 = B_3=1$ ). Les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_3, B_3$  sont combinés à un seul signal, qui sera transmis vers le guide d'onde W33. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W33 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W33 sera couplée dans le résonateur en anneau R32 et se propage dans le guide d'onde W33, W53 et sera

transmise vers le guide W93. Par conséquent, le retenue «  $R_s$  » de l'additionneur #3 est égale à 1. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W33 et l'anneau R31. Le signal optique de l'additionneur complet #2 se propage dans le guide d'onde W92, W63 et le signal sera transmise vers la sortie  $S_3$  à travers le résonateur en anneau R33. Donc, la somme de deux bits  $A_3, B_3$  au port de sortie  $S_3$  est égale à 1.

Les figures IV-10 et IV-11 représentent la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde des ports de sortie. D'après le diagramme, les puissances normalisées à la sortie  $S_0, S_1, S_2, S_3$ , and  $R_s$  sont égale à 2%, 163%, 153%, 155%, et 158%.



**Figure IV-11** : Diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue de l'additionneur 4-bit Cas#1 :  $A=1111$  and  $B=1111$ ).

**Cas #2** : Ce cas représente la somme de deux nombres binaires  $A=1010$  et  $B=1111$ . L'opération de l'addition est détaillée ci-dessous :

**1-** Demi additionneur #0 : Un port d'entrée est à l'état active "ON", ( $A_0=0$  et  $B_0=1$ ). Le signal optique lumineux de port  $B_0$  se propage dans le guide d'onde W20 vers le guide d'onde W30 et sera couplé dans le résonateur en anneau R01. Ensuite, ce signal sera transmis au guide d'onde W40 vers le port de sortie  $S_0$  de demi-additionneur #0. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W30 et l'anneau R02. Donc, la somme de deux bits  $A_0, B_0$  au port de sortie  $S_0$  est égale à 1 et la retenue de demi additionneur #0 est égale à 0.

2- Additionneur complet #1 : Deux ports d'entrée sont à l'état active "ON", ( $A_1 = B_1=1$ ). Les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_1$ ,  $B_1$  sont combinés à un seul signal, qui se transmet vers le guide d'onde W31. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W31 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W31 sera couplée dans le résonateur en anneau R12 et se propage dans le guide d'onde W51 et sera transmise vers le guide W91. Par conséquent, la retenue de l'additionneur #1 est égale à 1 et sera sommée avec  $A_2$ ,  $B_2$  de l'additionneur complet #2 à travers le guide d'onde W91. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W31 et l'anneau R11, et la puissance optique de demi additionneur #0 dans le guide d'onde W50 vers W61 est nulle. Donc, la somme de deux bits  $A_1$ ,  $B_1$  au port de sortie  $S_1$  est égale à 0.

3- Additionneur complet #2 : Un port d'entrée est à l'état active "ON", ( $A_2 =0$  et  $B_2=1$ ). Le signal optique lumineux de port  $B_2$  se propage dans le guide d'onde W22 vers le guide d'onde W32 et sera couplé dans le résonateur en anneau R21. Ensuite, ce signal sera transmis au guide d'onde W42. Les deux signaux optiques lumineux dans les guides d'onde W42 et W91 (retenue de l'additionneur #1) sont combinés à un seul signal, qui sera transmis vers le guide d'onde W62. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W62 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé de résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr.

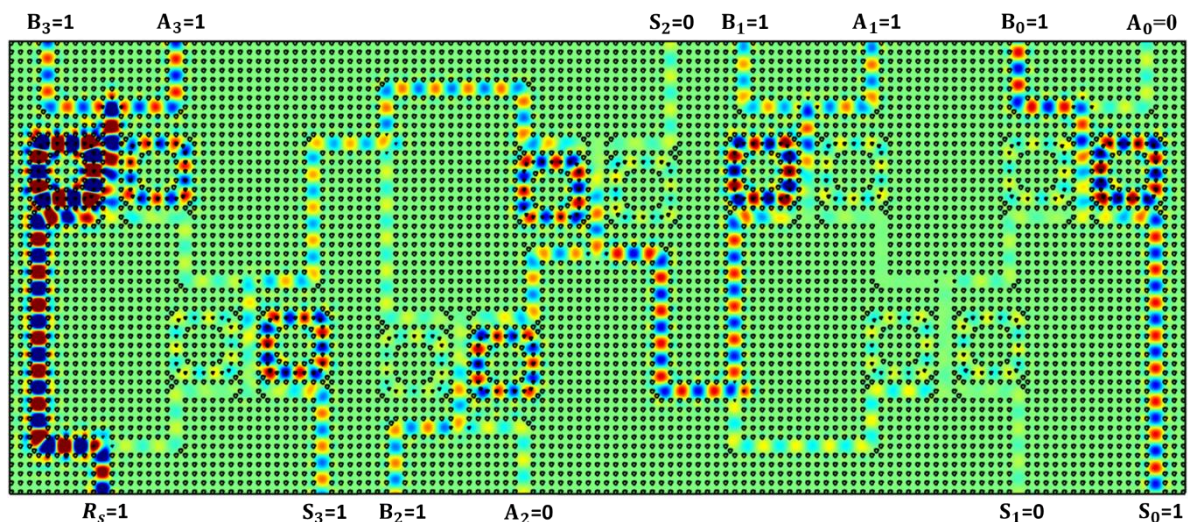
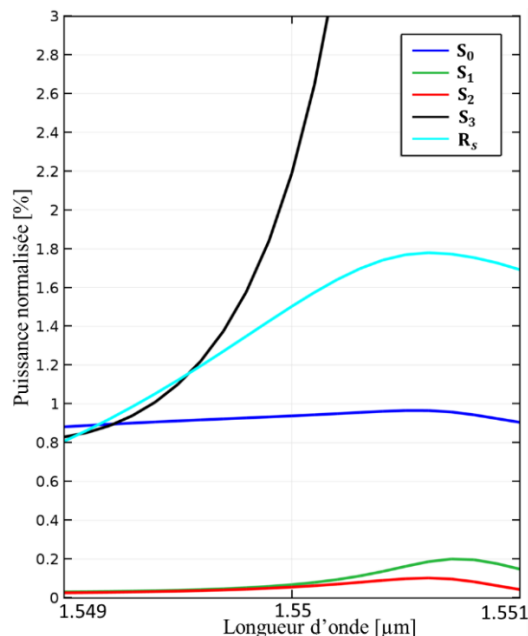


Figure IV-12 : Distribution du champ électrique de l'additionneur 4-bit Cas#2 :  $A=1010$  and  $B=1111$ ).

Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W62 sera couplée dans le résonateur en anneau R24 et se propage dans le guide d'onde W52 et sera transmise vers le guide W92. Par conséquent, la retenue de l'additionneur #2 est égale à 1 et sera sommée avec  $A_3$ ,  $B_3$  de l'additionneur complet #3 à travers le guide d'onde W92. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W62 et l'anneau R23. Donc, la somme de deux bits  $A_2$ ,  $B_2$  au port de sortie  $S_2$  est égale à 0.

**4- Additionneur complet #3 :** Lorsque deux ports d'entrée sont à l'état active "ON", ( $A_3 = B_3=1$ ). Les deux signaux optiques lumineux des ports d'entrée  $A_3$ ,  $B_3$  sont combinés à un seul signal, qui sera transmis vers le guide d'onde W33. L'intensité de puissance de signal optique combinée dans guide d'onde W33 augmente est égale à  $2 \times I_0$  et, par conséquent, l'indice de réfraction des tiges diélectriques en verre dopé des résonateurs en anneau augmente en raison de l'effet kerr. Dans ce cas, la puissance optique du signal lumineux de guide d'onde W33 sera couplée dans le résonateur en anneau R32 et se propage dans le guide d'onde W33, W53 et sera transmise vers le guide W93. Par conséquent, la retenue  $R_s$  de l'additionneur #3 est égale à 1. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde W33 et l'anneau R31. Le signal optique de l'additionneur complet #2 se propage dans le guide d'onde W92, W63 et le signal sera transmis vers la sortie  $S_3$  à travers le résonateur en anneau R33. Donc, la somme de deux bits  $A_3$ ,  $B_3$  au port de sortie  $S_3$  est égale à 1.



**Figure IV-13 :** Diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue de l'additionneur 4-bit Cas#2 : A=1010 and B=1111).

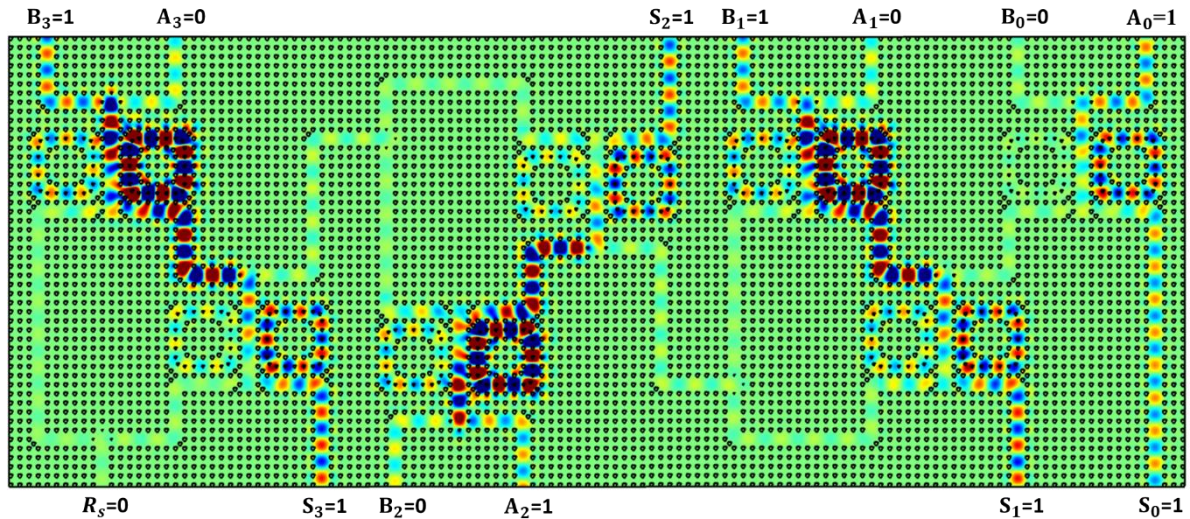
Les figures IV-12 et IV-13 représentent la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde des ports de sortie. D'après le diagramme, les puissances normalisées à la sortie  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , and  $S_4$  sont égales à 93%, 2%, 2%, 220%, et 153%.

**Cas #3 :** Ce cas représente la somme de deux nombres binaires  $A=0101$  et  $B=1010$ . L'opération de l'addition est détaillée ci-dessous :

**1-** Demi additionneur #0 : Un port d'entrée est à l'état active "ON", ( $A_0=1$  et  $B_0=0$ ). Le signal optique lumineux de port  $A_0$  se propage dans le guide d'onde  $W_{20}$  vers le guide d'onde  $W_{30}$  et sera couplé dans le résonateur en anneau  $R_{01}$ . Ensuite, ce signal sera transmis au guide d'onde  $W_{40}$  vers le port de sortie  $S_0$  de demi-additionneur #0. D'autre part, aucun couplage entre le guide d'onde  $W_{30}$  et l'anneau  $R_{02}$ . Donc, la somme de deux bits  $A_0$ ,  $B_0$  au port de sortie  $S_0$  est égale à 1 et la retenue de demi additionneur #0 est égale à 0.

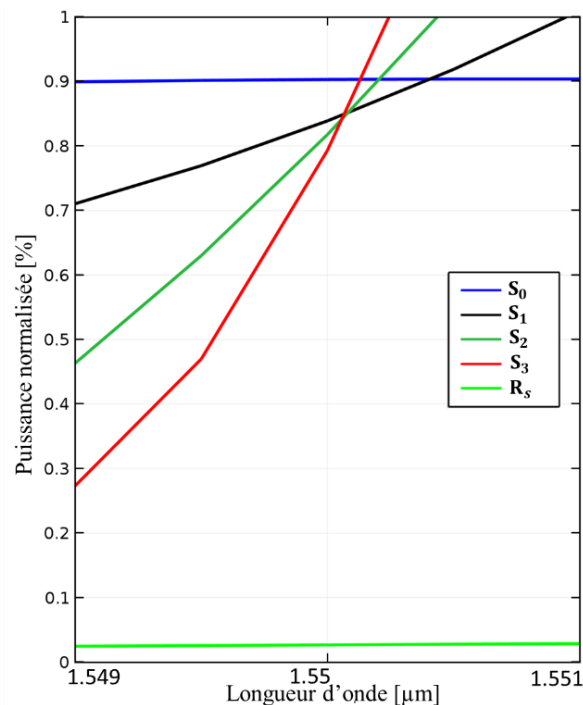
**2-** Additionneur complet #1 : Un port d'entrée est à l'état active "ON", ( $A_1=0$  et  $B_1=1$ ). Le signal optique lumineux de port  $B_1$  se propage dans le guide d'ondes  $W_{21}$  et  $W_{31}$ . Le signal est couplé dans le résonateur en anneau  $R_{11}$  et transmis aux guides d'ondes  $W_{41}$  et  $W_{61}$  (la puissance optique dans le guide  $W_{50}$  est nulle). Ensuite, le signal de guide  $W_{61}$  sera couplé dans le résonateur  $R_{13}$  et transmis vers la sortie  $S_1$  à travers  $W_{71}$ . D'autre part, aucun signal optique sera couplé dans les résonateurs  $R_{12}$  et  $R_{14}$  et transmis vers les guides  $W_{51}$ ,  $W_{81}$  et  $W_{91}$ . Par conséquent, la retenue de l'additionneur complet #1 est égale à 0, et la somme de deux bits  $A_1$ ,  $B_1$  au port de sortie  $S_1$  est égale à 1.

**3-** Additionneur complet #2 : Un port d'entrée est à l'état active "ON", ( $A_2=1$  et  $B_2=0$ ). Le signal optique lumineux de port  $A_2$  se propage dans le guide d'ondes  $W_{12}$  et  $W_{32}$ . Le signal est couplé dans le résonateur en anneau  $R_{21}$  et transmis aux guides d'ondes  $W_{42}$  et  $W_{62}$  (la puissance optique dans le guide  $W_{91}$  est nulle). Ensuite, le signal de guide  $W_{62}$  sera couplé dans le résonateur  $R_{23}$  et transmis vers la sortie  $S_2$  à travers  $W_{72}$ . D'autre part, aucun signal optique sera couplé dans les résonateurs  $R_{22}$  et  $R_{24}$  et transmis vers les guides  $W_{52}$ ,  $W_{82}$  et  $W_{92}$ . Par conséquent, la retenue de l'additionneur complet #2 est égale à 0, et la somme de deux bits  $A_2$ ,  $B_2$  au port de sortie  $S_2$  est égale à 1.



**Figure IV-14** : Distribution du champ électrique de l'additionneur 4-bit Cas#3 : A=0101 and B=1010).

**4- Additionneur complet #3** : Un port d'entrée est à l'état active "ON", ( $A_3=1$  et  $B_3=0$ ). le signal optique lumineux de port  $B_3$  se propage dans le guide d'ondes  $W_{23}$  et  $W_{33}$ . Le signal est couplé dans le résonateur en anneau  $R_{31}$  et transmis aux guides d'ondes  $W_{43}$  et  $W_{63}$  (la puissance optique dans le guide  $W_{92}$  est nulle). Ensuite, le signal de guide  $W_{63}$  sera couplé dans le résonateur  $R_{33}$  et transmis vers la sortie  $S_3$  à travers  $W_{73}$ .



**Figure IV-15** : Diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde pour la Somme et Retenue de l'additionneur 4-bit Cas#2 : A=0101 and B=1010).

D'autre part, aucun signal optique sera couplé dans les résonateurs R32 et R34 et transmis vers les guides W53, W83 et W93. Par conséquent, le retenue Rs de l'additionneur complet #3 est égale à 0, et la somme de deux bits  $A_3$ ,  $B_3$  au port de sortie  $S_3$  est égale à 1.

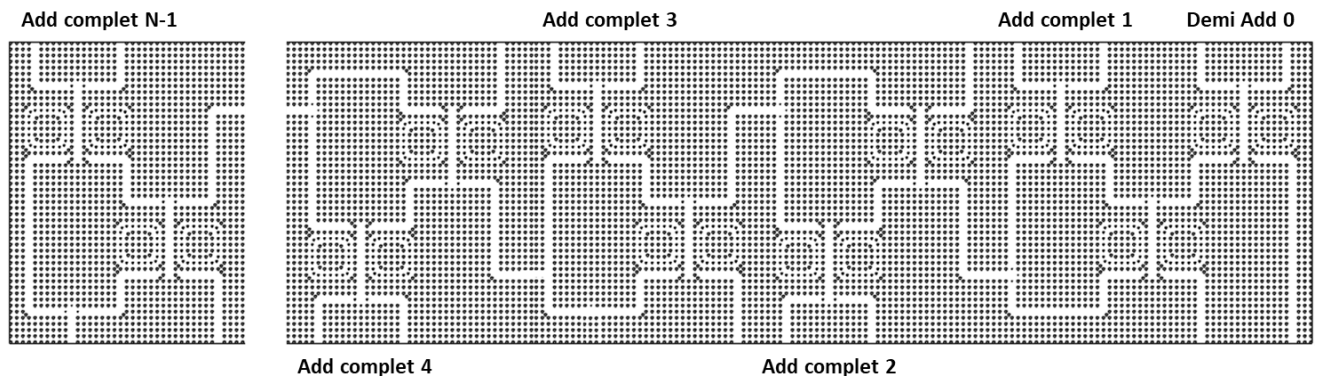
Les **figures IV-14 et IV-15** représentent la distribution du champ électrique et le diagramme de la puissance normalisée vs la longueur d'onde des ports de sortie. D'après le diagramme, les puissances normalisées à la sortie  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , and Rs sont égale à 95%, 85%, 82%, 80%, et 2%. Les résultats de simulation des trois cas étudiés sont présentés dans le **tableau IV-3**.

|                                                 | Cas #1 |     |     |     |   | Cas #2 |     |   |   |    | Cas #3 |    |    |    |    |
|-------------------------------------------------|--------|-----|-----|-----|---|--------|-----|---|---|----|--------|----|----|----|----|
| Le nombre binaire A<br>$A_3 A_2 A_1 A_0$        | 1      | 1   | 1   | 1   | 1 | 1      | 0   | 1 | 0 | 1  | 0      | 1  | 0  | 1  |    |
| Le nombre binaire B<br>$B_3 B_2 B_1 B_0$        | 1      | 1   | 1   | 1   | 1 | 1      | 1   | 1 | 1 | 1  | 1      | 0  | 1  | 0  |    |
| La somme de A et B<br>$C_{out} S_3 S_2 S_1 S_0$ | 1      | 1   | 1   | 1   | 0 | 1      | 1   | 0 | 0 | 1  | 0      | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Puissance normalisée [%]                        | 158    | 155 | 153 | 163 | 2 | 153    | 220 | 2 | 2 | 93 | 2      | 80 | 82 | 85 | 95 |

**Tableau IV-3** : Les résultats de simulation des trois cas étudiés.

#### IV.4 Additionneur tout optique à N-bit 2DhC à base de RAs non linéaires

Pour généraliser un additionneur optique à base cristaux photoniques de N bits en utilisant un demi additionneur et N-1 additionneurs complets. Comme montre la **figure IV-16**.



**Figure IV- 16** : Additionneur tout optique à N-bit 2DPhC à base de RAs non linéaires.

#### IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons proposé de nouvelle topologie d'additionneur à cristaux photoniques à base des résonateurs en anneaux. La distribution du champ électrique et la puissance normalisée ont été étudiées en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics basé sur la méthode des éléments finis FEM.

Tout d'abord un additionneur tout optique 2-bits à base 2DPhC a été conçu et simulé. Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus de l'additionneur avec les travaux déjà publiés.

Le deuxième additionneur est de 4 bits d'addition à base des résonateurs en anneaux non linéaire, trois cas d'addition ont été simulés. Enfin, nous avons généralisé la structure à N bits d'additionneur. La structure proposée pour application dans les systèmes de communication des circuits photoniques intégrés.

## Bibliographies

1. M. J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, ‘’ Designing an ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal cavities’’, *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 52, N°196, March 2020.
2. M. J. Maleki, A. Mir, M. Soroosh, ‘’ Design and analysis of a new compact all-optical full-adder based on photonic crystals’’, *Optik*, Vol. 227, February 2021.
3. Naghizade, S., Saghaei, H.: A novel design of fast and compact all-optical full-adder using nonlinear resonant cavities. *Opt. Quant. Electron.* 53, 262–275. (2021).
4. Ikhlef, A., Badaoui H, Mehadji, A and Rahmi, B, ‘’Efficient Design of an Optical Half-Adder Based on Nonlinear Photonic Crystal Ring Resonators’’, *International Journal of Microwave and Optical Technology*, Vol.18 N°.02, March 2023.
5. Ikhlef, A., Badaoui, H., Abri, M. et al. Proposal of an efficient all optical photonic crystal full adder based nonlinear ring resonators. *Opt Quant Electron* 55, 774 (2023).
6. Saghar Sadegh-Bonab, Hamed Alipour-Banaei, A novel proposal for an all-optical 2-bit adder/subtractor based on photonic crystal ring resonators, *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, Volume 39, 2020, 100777, ISSN 1569-4410,
7. Hojjat Sharifi, ‘’ All-optical photonic crystal two-bit adder design’’, *journal of innovations in computer science and engineering*, Vol. 1 N°1, May 2023.
8. Wei-Yu Chiu, Tai-Wei Huang, Yen-Hsiang Wu, Yi-Jen Chan, Chia-Hung Hou, Hung-Ta Chien, and Chii-Chang Chen, "A photonic crystal ring resonator formed by SOI nano-rods," *Opt. Express* 15, 15500-15506 (2007).
9. Sang Hoon Kim, L. Ki-Dong, K. Ja-Yeon, K. Min-Ki and P. Seong-Ju, ‘’ Fabrication of photonic crystal structures on light emitting diodes by nanoimprint lithography’’, 2007 *Nanotechnology* 18 055306,
10. Uttara Biswas, Chittaranjan Nayak, Jayanta Kumar Rakshit, "Fabrication techniques and applications of two-dimensional photonic crystal: history and the present status," *Opt. Eng.* 62(1) 010901 (23 December 2022).

## Conclusion générale et perspectives

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit est une étude, conception par simulation et optimisation de nouvelle topologie d'additionneur tout optique à base des cristaux photoniques bidimensionnelles dans le domaine non linéaire à effet Kerr.

Pour cela, le premier chapitre de ce manuscrit été consacré à un rappel sur les principes de base liés aux l'optique non-linéaire et les cristaux photoniques, où nous avons présenté brièvement les différentes méthodes non linéaires du second, et troisième ordre et en particulier l'effet Kerr. Ensuite, nous avons présenté les différents types de cristaux photoniques, ainsi que leurs propriétés électromagnétiques, telle que l'étude de diagramme de bande pour préciser la bande interdit photonique BIPs bidimensionnels, et l'exploiter pour but de conception des structures en optique intégrée qui serve dans le domaine de télécommunications autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ . Enfin, nous avons donnés deux exemples de résonateur en anneau dans le domaine linéaire et non linéaire.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes techniques de conception des composantes optiques à base 2DPhC, chaque technique a ses propres avantages et inconvénients. Nous avons sélectionné la méthode de conception à base des résonateurs en anneau non linéaire à effet de Kerr pour étudier un nouveau dispositif d'additionneur.

Dans un premier temps, nous avons simulé la structure déconnectée carré 2DPhC, dans le but d'étudier le diagramme de bande interdite et fixer les paramètres physiques en utilisant la méthode de décomposition en ondes plane PWEM à l'aide de logiciel COMSOL Multiphysique. La structure déconnectée carré 2DPhC est caractérisée par des tiges cylindriques diélectriques de Silicium (Si) à un indice de réfraction  $n=3,476$  autour de la longueur d'onde  $1,55 \mu\text{m}$ , un rayon  $r=118 \text{ nm}$  et une constante de fond  $a=592 \text{ nm}$ .

Notre choix s'est orienté vers les résonateurs en anneaux à base de 2DPhC qui représentent une voie ultime pour la conception des additionneurs tout optiques avec des rapports de contraste très élevé, faible puissance de transition ainsi qu'une facilité d'intégration aux circuits optiques. Dans ce cas, nous avons étudié les résonateurs double anneaux à l'intérieur de la structure 2DPhC de tiges diélectriques non-linéaires de verre dopé à effet Kerr.

Dans le cas non-linéaire ; en présence d'une excitation de puissance à intensité élevée, l'indice de réfraction du milieu effet Kerr non-linéaire augmente et la puissance normalisée dans les ports de sorties change entre un état élevé ON à un état de faible OFF. L'intensité de puissance utilisée pour nos simulations est plus faible que celle des additionneurs récemment publiés.

Dans cette thèse, nous avons détaillé les étapes de conception de circuit d'un additionneur tout optique à base 2DPhC pour la sommation de deux nombres A et B de N bit qui fonctionne dans la bande des longueurs d'onde de la fenêtre de transmission autour de 1,55  $\mu\text{m}$ . Tout d'abord, nous avons étudié quatre dispositifs suivants : demi additionneur, additionneur complet 1 bit, additionneur 2 bits, additionneur 4 bits, et enfin nous avons généralisé le circuit à N bits d'addition.

Notons que, dans cette thèse, les résultats de simulations exposés, telle que la puissance normalisée et la distribution du champ électromagnétique à travers les structures sont basés sur la méthode FEM, réalisés à l'aide de logiciel COMSOL Multiphysique.

Au troisième chapitre, deux conceptions d'additionneur ont été présentées où le premier est un demi additionneur formé par deux résonateurs en anneau parallèles non linéaires, et cinq guides d'ondes. Le demi additionneur proposé est caractérisé par des rapports de contraste de l'ordre de 13,71 dB, et 13,67 dB, avec une taille de 198,9  $\mu\text{m}^2$ . Le deuxième additionneur proposé a été conçu en combinant deux demi-additionneurs et une porte logique OR. L'additionneur complet est caractérisé par des rapports de contraste de l'ordre de 19,34 dB et 15,96 dB, avec une taille de 635  $\mu\text{m}^2$ .

Le quatrième chapitre a été consacré pour la conception un additionneur à N bits. Tout d'abord, nous avons réalisé deux additionneurs 2 et 4 bits et ces derniers ont été utilisés pour la validation le circuit final de sommation de deux nombres binaires à N bit. Pour généraliser un additionneur optique à base 2DPhC de N bits en utilisant en cascade un demi additionneur et N-1 additionneurs complets.

Recommandations et perspectives : Pour la suite de ce travail, nous envisageons les recommandations et perspectives suivantes :

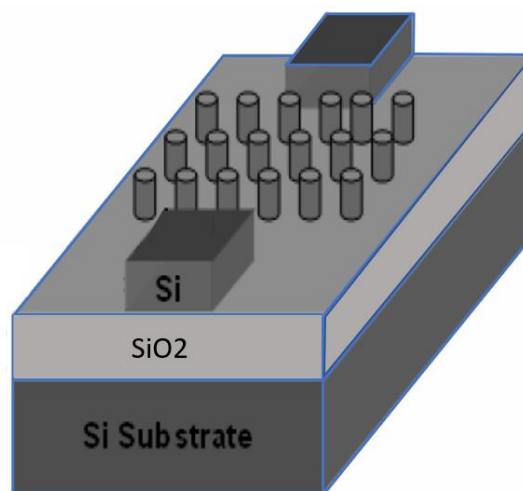
- ✓ Conception un additionneur bi-bande non linéaire à effet kerr : L'objectif est de réaliser une seule composante d'additionneur 2DPhC fonctionne simultanément dans les deux bandes 1,31  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$ . Ce travail est en cours et sera publié prochainement.
- ✓ Conception Additionneur & Soustracteur complet non linéaire : la composante permet de réaliser simultanément les deux opérations d'addition et soustraction.

Les additionneurs à cristaux photoniques 2DPhC à effet Kerr offrent un potentiel significatif pour les applications de traitement optique de l'information. En continuant à exploiter et développer ces dispositifs. Il est possible de réaliser des progrès importants dans divers domaines de l'optique et photonique.

## Annexe A

### Proposition technique de fabrication

L'étape technique de fabrication est importante pour la réalisation et commercialisation des dispositifs à cristaux photonique bidimensionnels. Nous proposons ici la technologie SOI (Silicon On Insulator) pour la fabrication de la structure toute optique 2DPhC. La structure 2DPhC à base de la technologie SOI (Silicon On Insulator) est illustrée dans la **figure A-1**. La technologie SOI compte plusieurs procédés industriels qui ont été développés pour réaliser un film de silicium sur une couche isolante.



**Figure A- 1** : Schéma de structure 2DPhC à base de la technologie SOI.

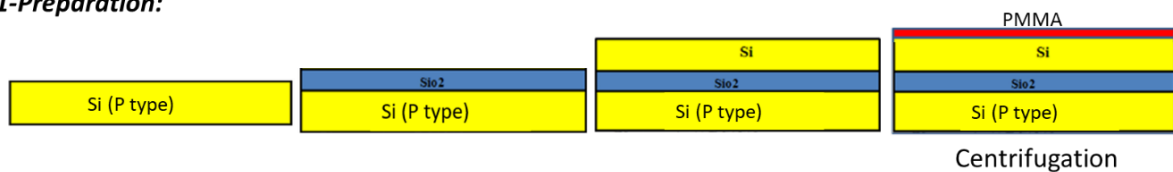
Plusieurs techniques utilisées pour la lithographie [1]. Voici quelques techniques couramment utilisées dans la fabrication des cristaux photoniques : Lithographie par faisceau d'électrons (*EBL : E-beam lithography*), Lithographie aux rayons X (*Deep x-ray lithography*), Lithographie holographique (*Holographic lithography*), Lithographie UV profonde (*Deep UV lithography*), et Lithographie par nano impression (*Nanoimprint lithography*), sont déjà rapportées. Chaque lithographie présente des avantages et des limitations en termes de coût, de précision, de taille des structures produites et de matériaux compatibles. Le choix de la technique dépend souvent des exigences spécifiques de l'application des cristaux photoniques.

La lithographie par faisceau d'électrons (EBL) est une technique puissante pour la fabrication 2DPhC (résonateurs, guides d'ondes...), offrant une résolution élevée, une grande flexibilité de conception et la possibilité de créer des structures complexes à l'échelle nanométrique. EBL est largement utilisée dans la recherche et l'industrielle pour développer de nouveaux dispositifs photoniques plus performants.

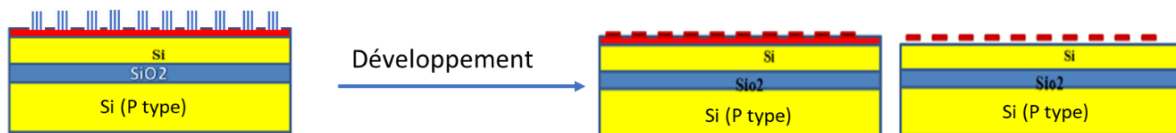
Les étapes de fabrication par EBL illustrées dans la **figure A-2** [2].

- Une première étape de préparation, la structure 2DPhC est constituée de deux couches de Silicium (Si), séparées par une couche d'isolant dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>). La plaquette SOI est fabriquée avec des couches empilées de Si-SiO<sub>2</sub>-Si. Ensuite, une couche de résine à base PMMA (poly-méthyl méthacrylate) est déposée sur la SOI.
- Une seconde étape, qui est l'écriture, par lithographie faisceau électronique (e-beam lithography), c'est-à-dire avec un faisceau d'électrons, du masque dans la résine de PMMA, suivie de la révélation par dissolution des zones exposées.
- Une troisième étape, gravure sèche plus profonde du substrat de type DRIE (Deep Reactive Ion Etching) à travers le masque de résine PMMA pour graver les tiges, et une technique à base de lithographie électronique. Le reste de PMMA est supprimé.

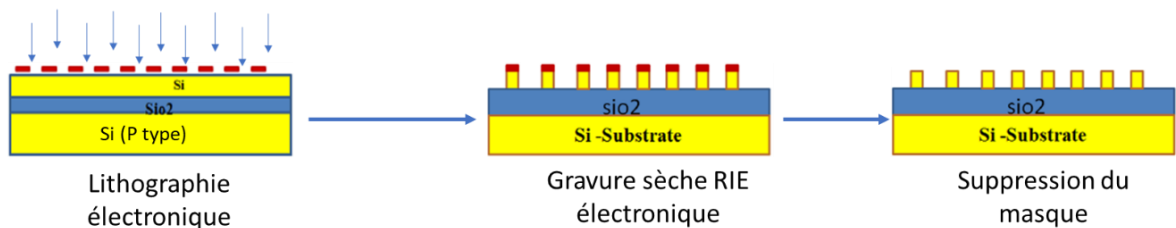
**1-Préparation:**



**2-Définition du masque:**



**3-Transfert sur masque:**

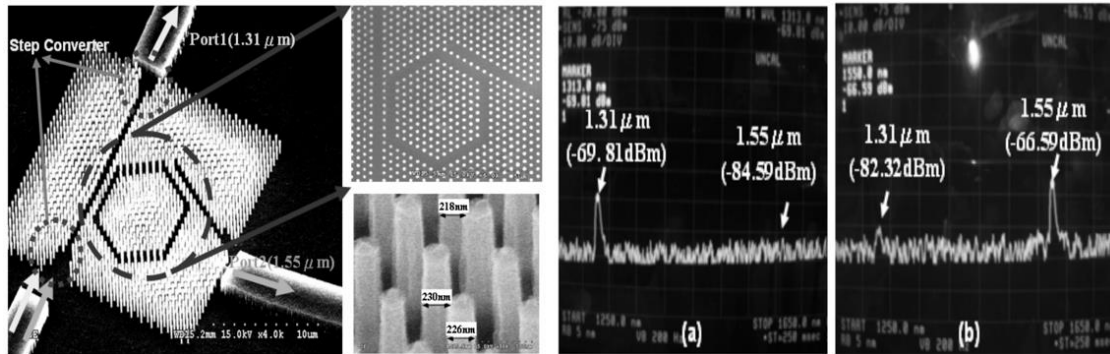


**Figure A- 2** : Schéma des étapes de fabrication des structure 2DPhC.

Une fois l'additionneur à 2DPhC est fabriqué, il est caractérisé et testé pour vérifier ses performances optiques et sa conformité aux spécifications de conception.

Un travail a été publié sur *la fabrication et mesure d'un résonateur en anneau à crystal photonique formé par SOI Silicon-on-Insulator* [3]. Le résonateur en anneau permet de séparer

simultanément les longueurs d'onde  $1.31 \mu\text{m}$  et  $1.55 \mu\text{m}$  (voir la **figure A-3**). Le dispositif a été fabriqué par la méthode « EBL : E-beam lithography ».



**Figure A- 3** : Fabrication un résonateur en anneau à base SOI et la technique EBL.

## Bibliographie :

1. Uttara Biswas, Chittaranjan Nayak, and Jayanta Kumar Rakshit “Fabrication techniques and applications of two-dimensional photonic crystal: history and the present status”, Optical Engineering, dec 2022.
2. Prabha, K.R., Kavitha, V., Robinson, S. et al. Two-dimensional photonic crystal-based half adder: a review. J Opt 51, 415–436 (2022).
3. Chiu, W. Y., Huang, T. W., Wu, Y. H., Chan, Y. J., Hou, C. H., Chien, H. T., & Chen, C. C. (2007). A photonic crystal ring resonator formed by SOI nano-rods. *Optics Express*, 15(23), 15500-15506.

---

## Publications et conférences

### ❖ Les publications internationales

1. **Ikhlef, A.**, Badaoui H, Mehadji, A and Rahmi, B, “Efficient Design of an Optical Half-Adder Based on Nonlinear Photonic Crystal Ring Resonators”, *International Journal of Microwave and Optical Technology*, Vol.18, N°.02, 23 March 2023. <https://ijmot.com/VOL-18-NO-2.aspx>
2. **Ikhlef, A.**, Badaoui, H., Abri, M. *et al.* Proposal of an efficient all optical photonic crystal full adder based nonlinear ring resonators. *Optical and Quantum Electronics*, 55, 774, 29 June 2023. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05063-6>
3. **Ikhlef, A.**, Badaoui, H., Abri, M. A new proposal of an optical 2-bit adder based on 2D photonic crystal ring resonators. *Optical and Quantum Electronics*, **55**, 1077, 26 September 2023. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05330-6>
4. **Ikhlef, A.**, Badaoui, H. & Abri, M. Application of nonlinear kerr effect 2D PhC-based ring resonators for design all optical 4-bit adder. *Optical and Quantum Electronics*, 56, 384, 05 January 2024. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05583-1>

### ❖ Les Communications Internationales :

1. **Ikhlef, A.**, Badaoui, H., Abri, M “Design of an All-Optical Half-Adder Around 1.31  $\mu\text{m}$  Based on Nonlinear 2DPhCRRs”, *The 1st International Conference on Advances in Electronics, Control and Computer Technologies “ICAECCT’23”*, 26 October 2023, Mascara. <https://icaecct23.com/program.html>



## Efficient Design of an Optical Half-Adder Based on Nonlinear Photonic Crystal Ring Resonators

Abdallah Ikhlef, Hadjira Badaoui, Abri Mehadji\* and Bachir Rahmi

STIC Laboratory, Faculty of technology  
University of Tlemcen, Algeria.  
E-mail: [abrim2002@yahoo.fr](mailto:abrim2002@yahoo.fr)

**Abstract**-In this paper, we have proposed a novel design and simulated an all-optical 1-bit half-adder based on photonic crystal. The fundamental structure is a square lattice of 2D Silicon rods, operating around the central wavelength of 1550 nm. The proposed half adder is composed of an optical combiner with two input ports, A and B are used for excitation power, and two parallel nonlinear ring resonators with two output ports, S and C, which are SUM and CARRY, respectively. In the creation of a nonlinear ring resonators at the resonant wavelength of 1550 nm and 1538 nm, respectively, we replaced the central rods with defect rods made of doped glass with a linear refractive index and nonlinear Kerr coefficient are about 1.4 and  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>/W. The optical intensity 10 mW/ $\mu\text{m}^2$  is used at the input ports A and B. The contrast ratios for output ports SUM and CARRY are about 13.71 dB, 13.67 dB and the total footprint is 198.9  $\mu\text{m}^2$ . The proposed structure has the advantage of simple design and small size with dimensions of  $15.3 \times 13 \mu\text{m}^2$ . The normalized power values are low which correspond to 0 state in the output, whereas the power is reasonably high at output for logic stat 1, the power level for logic states "0" and "1" is equal to 4% and 94% respectively. The power difference with high and low logic values improves the constant ratios and reduce the bit error rate BER. The finite element method FEM and Plane-wave expansion PWE method are used to simulate the proposed structure under COMSOL Multiphysics software.

**Index Terms**- Half-adder, Photonic crystal, Kerr effect, Nonlinear, Ring resonator.

### I. INTRODUCTION

With the limitations of the electronic and optoelectronics components to the emission and reception blocks in optical communication system

networks, such as high bandwidth, decrease the noise (signal/noise ratio SNR), increase the maximum data rate, high-speed transmission and ultra-fast processing [1] ... etc. In recent years, the research in this domain has been directed toward the design of all optical components: Bragg grating [2-3-4], Amplifiers EDFA [5], and Crystal photonics [6-7]. In reality, in all-optical communication systems and networks, the functions, such as sending, receiving, and processing the data should be done using optical signals and without using electrical-to-optical signal conversion and vice versa [8]. Photonic crystals (PCs) are periodic dielectric materials with different refractive indices which are very suitable for controlling light-wave propagation. Photonic crystals (PCs) can be divided into three main groups: one (1DPC), two (2DPC), and three-dimensional (3DPC) structures [9-10]. Each of these structures can be used for different optical applications. Photonic crystals (PCs) are characterized by a photonic band gap (PBG) which enables them to design optical [11]. So far, several all-optical devices have been studied and designed for the third transmission window operated around 1550 nm wavelength using a photonic crystal, such as encoders [12], decoders [1-13], optical filters [14-22], demultiplexers [6-20], logic gates [7-18-19], splitters [15-21], comparators [26], multipliers [17], subtractors [23-27], optical adders [16], [28-35].

One of the major applications of photonic crystals (PCs) is the design and development of optical adders. It can be classified into two types: half adders and full adders. A half adder is realized through various mechanisms, such as self-



## Proposal of an efficient all optical photonic crystal full adder based nonlinear ring resonators

Abdallah Ikhlef<sup>1</sup> · Hadjira Badaoui<sup>1</sup> · Mehadji Abri<sup>1</sup> · Bachir Rahmi<sup>1</sup>

Received: 1 April 2023 / Accepted: 9 June 2023

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2023

### Abstract

In this paper, we have presented a new design of an all-optical full-adder using dual nonlinear ring resonators. The PhC based full adder consists of three input ports (A, B, and Cin), two half adders based nonlinear ring resonators, a logic gate stage, and two output ports for ‘‘SUM’’ and ‘‘CARRY’’. The footprint and contrast ratios of the proposed full adder are about  $635 \mu\text{m}^2$ , 19.34 dB, and 15.96 dB, respectively. The advantages of non-linearity are the normalized power difference with high and low logical values improves the constant ratios. The plane wave expansion (PWE) and the finite element methods are used to study the photonic band structure and the light propagation inside the full adder under COMSOL Multiphysics Software.

**Keywords** Optical full adder · Nonlinear Kerr effect · Ring resonators · Photonic crystal

### 1 Introduction

In recent years, important research has been carried out on optical signal processing for telecommunications networks due to the advantages of optical signal processing. Optical processing means that no electrical-optical/optical-electrical signal conversion has been used, which may be more cost-efficient. Moreover, the signal bandwidth can be much larger than electrical processing, as the optical signal processor can operate at higher bit rates. The all-optical-fast processing signal is very important for networks and optical communication technology transmitting high-speed data signals. The research in this domain has been directed toward the design of all optical devices, such as fiber photonic crystal (Irawan et al. 2022; Eid et al. 2021; Selim Hossain et al. 2021) photonic crystal (Mokhtari et al.

---

✉ Hadjira Badaoui  
elnbh@yahoo.fr  
Abdallah Ikhlef  
ikhlef.abdallah@gmail.com  
Mehadji Abri  
abrim2002@yahoo.fr  
Bachir Rahmi  
bachirrahmi39@gmail.com

<sup>1</sup> STIC Laboratory, Faculty of Technology, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria



# A new proposal of an all optical 2-bit adder based on 2D photonic crystal ring resonators

Abdallah Ikhlef<sup>1</sup> · Hadjira Badaoui<sup>1</sup> · Mehadji Abri<sup>1</sup>

Received: 23 June 2023 / Accepted: 25 August 2023

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2023

## Abstract

In this paper, we propose a new design of an all-optical 2-bit adder based on Photonic Crystal nonlinear ring resonators. The proposed structure is designed by cascading one optical half adder and one full adder composed of nonlinear ring resonators. The Photonic Crystal (PhC) based 2-bit adder consists of four input ports ( $A_0$ ,  $B_0$ ,  $A_1$ , and  $B_1$ ), and three output ports for SUM and CARRY ( $S_0$ ,  $S_1$ , and  $C_1$ ). The contrast ratios of the output ports  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $C_1$  are about 16.62 dB and 16.33 dB, and 15.13 dB, respectively. The optical 2-bit adder is simulated at the C-band communication window (at the wavelength 1550 nm). The plane wave expansion (PWEM) and the finite element methods are used to study the photonic band structure and the light propagation inside the optical 2-bit adder.

**Keywords** Optical adder · Photonic crystal · Ring resonators · Contrast ratio

## 1 Introduction

Optical data processing is very important in all-optical networks. The research in this domain has been directed towards the design of all-optical devices, photonic crystals (PhCs) are one of the most promising candidates. Photonic crystals (PhCs) are an optical nanostructures in which the refractive index of the medium is characterized by periodic variations (Wabnitz and Benjamin 2015). One of the most important devices based on photonic crystals (PhCs) for designing optical data processing are an all-optical adders (Vali-Nasab et al. 2019; Mohammadi et al. 2021; Neisy et al. 2018; Cheraghi et al. 2018; Naghizade and Saghaei 2021a, 2022, 2021b; Maleki et al. 2020, 2021a, 2021b; Saadi et al. 2021; Sani et al. 2020a; Ikhlef et al. 2023a, 2023b; Alipour-Banaei and Seif-Dargahi 2017; Moradi et al. 2018; Geraili et al. 2019).

---

✉ Hadjira Badaoui  
elnbh@yahoo.fr

Abdallah Ikhlef  
ikhlef.abdallah@gmail.com

Mehadji Abri  
abrim2002@yahoo.fr

<sup>1</sup> STIC Laboratory, Faculty of Technology, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria



# Application of nonlinear kerr effect 2D PhC-based ring resonators for design all optical 4-bit adder

Abdallah Ikhlef<sup>1</sup> · Hadjira Badaoui<sup>1</sup> · Mehadji Abri<sup>1</sup>

Received: 1 August 2023 / Accepted: 13 October 2023

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature 2024

## Abstract

In this paper, a new structure of 2D photonic crystals for all-optical 4-bit adder based on kerr effect and ring resonators is proposed. The fundamental rods are made of silicon material with a refractive index is about 3.476 around a wavelength 1550 nm. The lattice constant of the PhC structure, and the radii of fundamental dielectric rods are about 592 nm, and 118 nm, respectively. The structure is designed using in a cascade one half adder and three full adders. The optical adder is composed of nonlinear ring resonators, input ports ( $A_i$ ,  $B_i$ ), and output ports ( $S_i$ ,  $C_i$ ). The ring resonators R1 and R2 based on the optical kerr effect are created by replacing  $2 \times 24$  dielectric rods are made of nonlinear material doped glass with a linear and nonlinear refractive index of 1.4 and  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>/W, respectively. The radii of these dielectric rods are 90 nm and 80 nm. The input and output ports are located in the best position, and the total footprint is about 2229  $\mu\text{m}^2$ . We used COMSOL Multiphysics Software based on the plane wave expansion and the finite element methods to simulate the photonic band gap diagram and the light propagation inside the PhC structure. The proposed 4-bit adder can be used in the next generation of optical computer systems applications and photonic integrated circuit communication.

**Keywords** Full adder · Kerr effect · 2D photonic crystal · Ring resonator · Half adder · Nonlinear

## 1 Introduction

The ultra-fast processing of nonlinear optical phenomena takes advantage of signal processing and computing to perform high-speed operations either on analog and digital signals directly in the optical domain and without using electrical-to-optical signal conversion

---

✉ Hadjira Badaoui  
elnbh@yahoo.fr

Abdallah Ikhlef  
ikhlef.abdallah@gmail.com

Mehadji Abri  
abrim2002@yahoo.fr

<sup>1</sup> STIC Laboratory, Faculty of Technology, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria

## Résumé :

Les cristaux photoniques bidimensionnels (2DPhC) sont des matériaux diélectriques nanostructurés dont l'indice de réfraction change périodiquement dans l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, ce qui a un impact sur la propriété de propagation du milieu. Par conséquent, les 2DPhC sont caractérisés par une bande interdite photonique (PBG), dans laquelle la propagation des ondes lumineuses est interdite. Dans ce cas, la modification de la périodicité de la structure par insertion de défauts ponctuels et/ou de guides d'onde permet de guider la lumière selon une direction choisie, et les fréquences appartenant à la bande interdite peuvent apparaître. Cette caractéristique permet de concevoir de nombreux composants en optique intégrée tels que les additionneurs optiques. Ce travail de thèse présenté dans ce manuscrit, est une étude, conception par simulation et optimisation de nouveau additionneur tout-optique à base 2DPhC dans le domaine non linéaire où l'indice de réfraction change sous l'excitation d'un champ intense ce qui est connu par l'effet Kerr. Dans un premier temps, nous avons simulés un résonateur double anneau basé sur l'effet Kerr, le résonateur est créé par des tiges diélectriques non linéaire de verre dopé et de forme carré à l'intérieur. Ensuite, deux additionneurs (demi et additionneur complet) de base ont été conçus sur une taille de la structure 2DPhC plus petite, et faible intensité de puissance. Dans le but de validation le circuit général à N bit d'addition, deux additionneurs 2 et 4 bits ont été simulés. L'additionneur à N bit est conçu en utilisant en cascade un demi-additionneur et (N-1) additionneurs complets. Les simulations des dispositifs présentées dans cette thèse sont basées sur les méthodes des éléments finis FEM et des ondes planes PWEM à l'aide de logiciel COMSOL Multiphysique.

**Mots clés :** Cristaux photoniques bidimensionnels, additionneur, résonateurs annulaires, effet kerr, non linéarité.

## ملخص:

البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد (2DPhC) عبارة عن مواد عازلة ذات بنية نانوية حيث يتغير معامل انكسارها بشكل دوري بترتيب الطول الموجي للضوء، مما يؤثر على خاصية انتشار الضوء في الوسط الشفاف. ولذلك، البلورات الضوئية ثنائية الأبعاد تتميز بفجوة الحزمة الضوئية، حيث يُمنع انتشار الموجات الضوئية. في هذه الحالة، تغيير دورية البنية البلورية الضوئية عن طريق إدخال ثقوب دائرية و/أو حذف على شكل خط مجموعة من الثقوب دائرية يجعل من الممكن توجيه الضوء في الاتجاه المختار، ويمكن أن تظهر الترددات التي تنتمي إلى فجوة الحزمة الضوئية (BIP). هذه الخاصية تسمح لنا بإمكانية تصميم العديد من المركبات في البصريات المتكاملة مثل الجوامع المنطقية البصرية. إن العمل المقدم في هذه الأطروحة عبارة عن دراسة وتصميم عن طريق المحاكاة وإضافة جديدة لجامع منطقي بصري تعتمد على خاصية اللاخطية حيث يتغير معامل الانكسار تحت تأثير مجال مكثف يُعرف بتأثير كبير. أولاً، قمنا بمحاكاة رنانات ذو حلقة مزدوجة بناءً على تأثير كبير، حيث يتم تشغيل الرنان بواسطة قضبان عازلة تتميز بمعامل انكسار اللاخطية مصنوعة من الزجاج المخدر ومربعة الشكل من الداخل. بعد ذلك، تم تصميم جامعين أساسيين (نصف جامع وجامع كامل)، يتميز كل جامع بحجم صغير وكثافة طاقة ضعيفة مقارنة مع الأعمال السابقة. اعتمدنا في عمليات محاكاة الدارات المقدمه في هذه الأطروحة على طرق العناصر المحدودة (FEM) والموجات المسطحة (PWEM) باستخدام برنامج المحاكاة كومصول ملتيفيزيك.

**الكلمات الرئيسية:** بلورات ضوئية ثنائية الأبعاد، الجامع، رنانات حلقيّة، تأثير كبير، اللاخطية.

## Abstract:

Two-dimensional photonic crystals (2DPhC) are nanostructured dielectric materials whose refractive index changes periodically in the order of the wavelength of light, which impacts the propagation property of the medium. Therefore, 2DPhCs are characterized by a photonic band gap (PBG), in which the propagation of light waves is prohibited. This characteristic makes it possible to design numerous components in integrated optics such as optical adders. The work presented in this manuscript is a study, design by simulation and optimization of a new all-optical adder based on 2DPhC in the nonlinear domain where the refractive index changes under the excitation of an intense field which is known by the Kerr effect. Firstly, we simulated a double ring resonator based on the Kerr effect, the resonator is driven by non-linear dielectric rods doped of glass and square shape. Then, two basic adders (half and full adder) were designed on a smaller 2DPhC structure size, and lower power intensity. To validate the proposal N-bit addition circuit, 2- and 4-bit adders were simulated. The N-bit adder is designed using a cascade of half adder and (N-1) full adders. All simulations presented in this thesis are based on finite element FEM and plane wave PWEM methods using COMSOL Multiphysics software.

**Keywords:** Two-dimensional photonic crystals, adder, ring resonators, kerr effect, nonlinearity.