

---

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Option Électronique  
Spécialité Micro-optoélectronique

présenté par

ABBAD KHADIDJA

&

HAYA NESRINE

---

# Etude, modélisation et simulation d'un micro résonateur optique

---

Proposé par : Bounemri Ammar

Année Universitaire 2015-2016

## Remerciements

---

*Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir accordé la santé, le courage et les moyens pour suivre nos études et la volonté pour la réalisation de ce travail, sans oublier nos parents qui n'ont lésiné sur aucun problème pour nous apporter toute l'aide nécessaire pour atteindre ce niveau qui nous permettra d'assurer notre avenir.*

*Nous remercions :*

*Nos Vifs et sincères remerciements à notre promoteur: Bounemri Ammar qui a bien voulu prendre en charge et diriger notre travail, pour sa gentillesse, ses aides précieuses, avec beaucoup de rigueur et de patience, ses critiques et ses conseils éclairés qui ont été très biens bénéfiques*

*Sans oublier Mr. Habib Sami et Mme. Bougherira Nadia pour leur aide.*

*On remercie aussi:*

*Mr. Nacer Saïd Professeur au Département d'électronique de l'université blida 1*

*On remercie les membres de jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*A toutes et à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail.*

*A la fin nous remercions tous nos collègues de la promotion*

*micro optoélectronique 2016.*

---

**ملخص:** هذا العمل يحتوي على دراسة و محاكاة المرينات المكرونية وه ذه الأخيرة عبارة على مضمار سباق تسمح لنا برسم الاستجابة الطيفية , عامل الجودة , النطاق الطيفي الحر , طول الإقتران. النموذج المستخدم لهذا العمل هو تشاو و ياريف جولتسمان.

**كلمات المفاتيح :** المرينات المكرونية , الاستجابة الطيفية , عامل الجودة , الدقة , نطاق الطيفي الحرة , طول الإقتران.

---

**Résumé :** Ce travail porte sur l'étude et la simulation d'un microrésonateur en forme d'hippodrome. La simulation a pour objectif d'évaluer les paramètres caractéristiques tel que, la réponse spectrale, les paramètres spécifiques qui sont le coefficient de qualité, l'intervalle spectral libre, la finesse et la longueur de couplage. Les modèles utilisés dans cette étude sont le modèle de Chao et Yariv-Gottesman.

**Mots clés :** microrésonateur, réponse spectrale, coefficient de qualité, Intervalle spectral libre, finesse, longueur de couplage.

---

**Abstract:** The goal of this study is to simulate a racetrack microresonator. Evaluation of the main parameters of the microresonator as quality coefficient, free spectral range, finesse and coupling length is treated. Chao's and Yariv-Gottesman's models are used.

**Keywords:** microresonator, free spectral range, quality coefficient, finesse, coupling length, Spectral repanse.

---

## Listes des acronymes et abréviations

$\lambda$  : La longueur d'onde.

$c$  : La vitesse de la lumière dans le vide.

$v$  : vitesse de propagation.

$v_\phi$  : vitesse de phase de l'onde optique.

$\mu_r$  : perméabilité magnétique

$\epsilon_r$  : permittivité électrique

$\theta_1$  : L'angle de réfraction.

$\theta_2$  : L'angle d'incident.

$n_1, n_2$  : Le milieu incident de réfraction et respectivement.

$a_1, a_2$  : Champ optique.

$b_1, b_2$  : champ de transmission.

$n_{\text{eff}}$  : indice effectif.

$k, k'$  : Coefficient de couplage.

$\tau$  : Transmission guide rectiligne.

$\tau'$  : Transmission cavité.

$\alpha_i$  : Facteur de perte.

$L_c$  : Longueur de couplage.

$\lambda_c$  : Longueur d'onde de résonance.

ISL : L'intervalle spectral de résonance.

$\delta\lambda$  : largeur de raie de résonance.

$Q$  : facteur de qualité.

$F$  : la finesse.

WGM : Whispering Gallery Modes (mode de galerie).

$H(\lambda)$  : Fonction de transmission d'un microrésonateur.

$n_{\text{eff\_TE}}$  : Indice effectif en polarisation TE.

# Table des matières

Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Notions de base sur l'optique guidée.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction.....	3
I.2 Guide d'onde.....	3
I.3 La longueur d'onde.....	3
I.4 L'indice de réfraction.....	4
I.5 Dispersion du matériau.....	5
I.6 Propriétés caractéristiques de propagation d'une onde optique : cas du guide plan.....	5
I.6.1 Guide d'onde planaire à couches diélectriques.....	5
a-Notions de modes de propagation.....	6
I.6.2 Approche d'optique géométrique dans le guide d'onde plan.....	6
a- Première configuration : $\theta < \theta_s$ .....	8
b- Deuxième configuration : $\theta_c < \theta < \theta_s$ .....	8
c- Troisième configuration : $\theta_s$ et $\theta_c < \theta$ .....	8
I.7 Indice effectif.....	9
I.8 Notion d'onde évanescente.....	10
I.9 Conclusion.....	10
<b>Chapitre II : Microrésonateur en forme d'hippodrome.....</b>	<b>11</b>
II.1 Introduction.....	11
II.2 Forme géométriques d'un microrésonateur.....	11
II.2.1 Définition .....	11
II.3 Technologie de fabrication.....	13
II.3.1 Différents type de couplage.....	13
II.4 Théorie du micro résonateur en forme d'hippodrome à couplage latéral.....	14
II.4.1 Grandeurs de couplage.....	14
II.4.2 Réponse spectrale du microrésonateur en forme d'hippodrome.....	15

II.4.3 Paramètres caractéristiques du microrésonateur.....	19
a- L'intervalle spectral libre (ISL).....	19
b- la largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ ).....	20
c- le facteur de Qualité ( $Q$ ).....	20
d- La Finesse ( $F$ ) .....	20
e-Influence du couplage.....	21
II.5 Unité pratique de la réponse spectrale.....	21
II.6 Conclusion.....	22
<b>Chapitre III : Simulation et Analyse.....</b>	<b>23</b>
III.1 Introduction.....	23
III.2 Simulation et résultat du modèle chao.....	23
III.2.1 Organigramme générale de finissant la fonction de transmission.....	24
a-Fonction de transmission du microrésonateur .....	25
b- L'intervalle spectral libre (ISL) .....	25
c-la largeur de rai de résonance ( $\delta\lambda$ ).....	26
d-Déduction des paramètres $Q$ et $F$ .....	27
III.2.2 Influence de la longueur de couplage ( $L_c$ ) sur le coefficient de transmission.....	28
III.2.3 Influence de coefficients de couplage sur la réponse spectral $H(\lambda)$ .....	30
III.3 Simulation et résultat de modèle Yariv et Gottesman.....	30
III.4 Conclusion.....	32
Conclusion générale.....	33
Annexe .....	34
Bibliographie.....	40

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Guide d'onde optique.....	4
<b>Figure I.2</b> : Longueur d'onde .....	4
<b>Figure I.3</b> : Représentation graphique de guide planaire à couches diélectriques.....	6
<b>Figure I.4</b> : Phénomène de réflexion-réfraction entre deux milieux d'indice de refraction $n_1$ et $n_2$ .....	7
<b>Figure I.5</b> : propagation de la lumière dans un guide en fonction de l'angle d'indice $\theta$ : (a) : $\theta < \theta_s$ ; (b) : $\theta_c < \theta < \theta_s$ ; (c) : $\theta_c$ et $\theta_s < \theta$ .....	8
<b>Figure I.6</b> : Principe de guidage de la lumière dans un guide plan.....	8
<b>Figure I.7</b> : Principe de guidage par réflexion totale : mise en évidence de l'onde évanescente.....	10
<b>Figure II.1</b> : Formes géométriques de la cavité résonante.....	11
<b>Figure II.2</b> : Microrésonateur en forme d'hippodrome.....	12
<b>Figure II.3</b> : Schématisation du confinement de la lumière par réflexion interne totale dans trois type de microrésonateurs circulaires (a) micro-anneau en régime de modes guidés,(b) micro-anneau en régime de modes de galerie,(c)micro-disque en régime de mode de galerie.....	13
<b>Figure.II.4</b> : Structure d'un microresonateur : (a) couplage lateral ;(b)couplage vertical.....	14
<b>Figure II.5</b> : Propagation des champs dans le microrésonateur.....	15
<b>Figure II.6</b> : Réponse spectrale du microrésonateur.....	18
<b>Figure II.7</b> : Bio détection à l'aide de microrésonateur à mode galerie.....	21
<b>Figure III.1</b> : Organigramme du programme transmission spectrale de microrésonateur optique.....	24
<b>Figure III.2</b> : Spectre en transmission de la réponse du micro résonateur.....	25
<b>Figure III.3</b> : L'intervalle spectral libre(ISL).....	26
<b>Figure III.4</b> : La largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ ).....	27
<b>Figure III.5</b> : la variation de coefficient de transmission $H(\lambda)$ en fonction de variation de la longueur.....	28
<b>Figure III.6</b> : La longueur d'onde critique en fonction de la longueur de la Cavite.....	29
<b>Figure III.7</b> : Différentes valeur des coefficients de couplage tau et k.....	30
<b>Figure III.8</b> : Spectre en transmission de la réponse.....	31

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1 :</b> Coefficient de transmission d'un micro résonateur suivant différent auteur.....	19
<b>Tableau III.1:</b> Les résultats de l'intervalle spectral libre (ISL).....	26
<b>Tableau III.2 :</b> Les résultats de la largeur de raie résonance ( $\delta\lambda$ ) .....	27
<b>Tableau III.3 :</b> Les résultats des caractéristiques d'un micro résonateur optique.....	27
<b>Tableau III.4 :</b> Les résultats La longueur d'onde critique en fonction de la longueur de la Cavite.....	29
<b>Tableau III.5 :</b> Résumé des résultats des modèles de chao et yariv Gottesman.....	31



# Introduction générale

---

De nos jours la micro-photonique, technique basée sur l'utilisation des structures de dimensions micrométriques permettant l'étude des caractéristiques physiques de la lumière (en tant qu'onde électromagnétique), est un domaine en pleine évolution. Ce domaine s'inscrit dans ce qu'on nomme l'optique guidée. Le développement de micro-capteurs optiques est rendu possible en s'intéressant aux différents mécanismes physiques extérieurs que l'on souhaite caractériser, et en affectant l'un des attributs de l'onde électromagnétique guidée, comme par exemple son amplitude, sa polarisation, sa cohérence, sa direction de propagation, ou même sa phase. Diverses méthodes de détection, basées sur la modulation d'une information caractérisant l'onde électromagnétique s'inscrivent dans l'état de l'art de la technique où l'on peut citer:

- **La modulation d'intensité lumineuse** : basée sur la détection de la lumière transmise à la sortie d'un dispositif comparée à la lumière injectée dans ce dernier, l'amplitude de l'onde étant modifiée relativement à l'action d'une perturbation du milieu dans lequel le microsystème est plongé.
- **La modulation de polarisation** : consistant à analyser l'état de polarisation d'une onde électromagnétique issue d'un dispositif composé d'un matériau sensible à un champ électrique ou magnétique environnant.
- **La modulation de cohérence temporelle** : reposant sur une technique de codage des retards optiques appliquée à la transmission et au multiplexage de signaux, et basée sur l'introduction de retards optiques significatifs supérieurs à la longueur de cohérence de la source.

- **La modulation de phase** : fonctionnant sur le principe d'altération, par une intervention du milieu extérieur, de la phase de l'onde se propageant dans le micro-capteur (de type interférométrique par exemple).

Dans le cadre de ce mémoire, on s'intéresse au comportement d'un micro-résonateur qui constitue une des structures micrométriques utilisées dans la micro-photonique. Néanmoins le domaine d'étude étant vaste, notre travail a été restreint uniquement à l'étude, par simulation, des paramètres caractéristiques du micro-résonateur.

Pour ce faire l'organisation de notre mémoire a été élaborée comme suit :

- Le premier chapitre a pour objet de donner les notions de base sur l'optique guidée afin de bien cerner les objectifs de ce travail et de ne pas s'y éloigner dans l'espace théorique très large de ce domaine.
- Le deuxième chapitre définit la théorie des modèles utilisés, en simulation.
- Le troisième et dernier chapitre expose les résultats de la simulation et leur analyse.
- Une conclusion générale finalise le travail de ce mémoire.

# Chapitre 1 Notion de base sur l'optique guidée

---

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre seront énoncées quelques notions de base nécessaires à la compréhension de l'optique guidée [1].

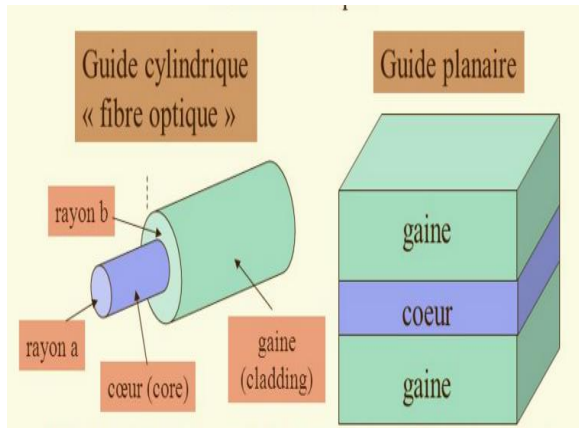
## I.2 Guide d'onde

Un guide d'ondes est un système physique qui sert à guider l'onde électromagnétiques ou les ondes acoustiques, pour les maintenir confinées dans un milieu particulier, sur une certaine distance. Dans le cas des guides d'ondes optiques ce système physique sert comme support de transport de l'énergie lumineuse d'un point vers un autre point. Un tel système est utilise de nos jours dans les communications optiques, le traitement optique du signal et peut servir entre autre a des fonctions de couplage, de multiplexage et d'amplification. Le plus connu du grand public est la fibre optique (Figure I.1) [2]

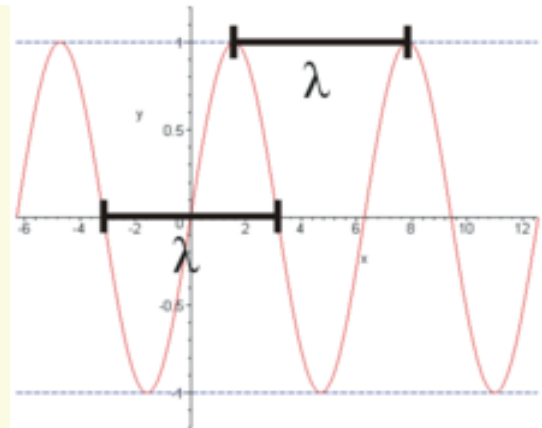
## I.3 La longueur d'onde

La longueur d'onde peut être définie comme la distance séparant deux crête successives d'une onde périodique (Figure I.2) [3] .Elle est communément notée par la lettre grecque  $\lambda$  (lambda) et représente l'équivalent spatial de la période temporelle. Ainsi pour une onde périodique de fréquence  $\nu$ , se propageant dans le vide avec une vitesse correspondant à la célérité  $c$  en m/s (valeur approximative  $c \sim 3 \cdot 10^8$  m/s), sa longueur d'onde dans le vide est défini par :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{Eq I-1}$$



**Figure I.1 :** Guide d'onde optique



**Figure I.2 :** Longueur d'onde

## I.4 L'indice de réfraction

L'indice de réfraction est défini comme étant le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide et la vitesse de la lumière dans le matériau considéré. Il dépend de la longueur d'onde du faisceau lumineux. La valeur de cet indice pour une radiation électromagnétique de fréquence  $\nu$  ou de longueur d'onde  $\lambda$  est donnée par la relation suivante :

$$n = \frac{c}{v_\varphi} \quad \text{Eq I-2}$$

Où  $v_\varphi$  représente la vitesse de phase de l'onde optique dans le milieu considéré. La vitesse de phase peut être déterminée à partir de la théorie de Maxwell, elle peut s'exprimer par :

$$v_\varphi = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad \text{Eq I-3}$$

Où  $\epsilon_r$  et  $\mu_r$  représentent respectivement la permittivité électrique relative et la perméabilité magnétique relative du milieu. Dans le cas des matériaux diélectriques, dont la perméabilité magnétique est proche de 1, on aura par conséquent

$$n^2 = \epsilon_r \quad \text{Eq I-4}$$

## I.5 Dispersion du matériau

La notion de dispersion se traduit par le fait que le matériau utilisé (comme guide d'onde) possède un indice de réfraction optique variable en fonction de la fréquence ou de la longueur d'onde d'excitation. Cette dépendance de l'indice a une influence directe sur les équations de propagation de la lumière dans le guide, car cette notion induit une variation de la vitesse de phase propre au milieu. La formule de Cauchy permet de calculer (selon le matériau utilisé) et par la méthode des moindres carrés l'indice de réfraction :

$$n(\lambda) = \sum_{k=0} \frac{A_k}{\lambda^{2k}} \quad \text{Eq I-5}$$

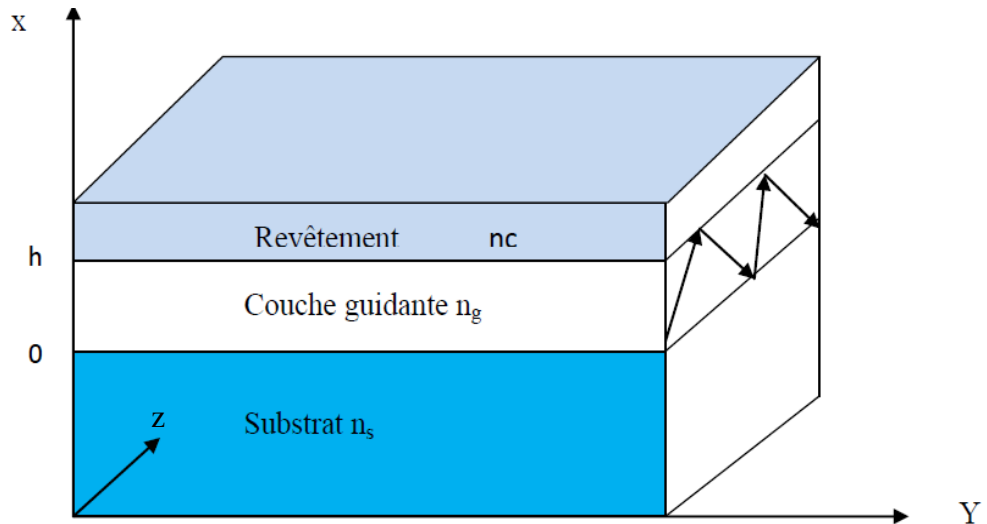
Ou :

$A_k$  : représente le  $k^{\text{ième}}$  coefficient de la série d'ordre  $k$ .

## I.6 Propriétés caractéristiques de propagation d'une onde optique : cas du guide plan.

### I.6.1 Guide d'onde planaire à couches diélectriques:

Le guide d'onde plan est un empilement de trois couches de matériaux d'indices de réfraction différents (figure (I.3)). La lumière se propage préférentiellement dans la couche d'indice de réfraction  $n_g$ . Si celle-ci est entourée de deux couches, l'une inférieure dite substrat et d'indice de réfraction  $n_s$  et l'autre couche supérieure dite couverture d'indice de réfraction  $n_c$ . La lumière est confinée selon l'axe vertical ( $x$ ) et se propage dans la direction ( $z$ ).



**Figure I.3** : Représentation graphique du guide planaire à couches diélectriques.

### **a- Notions de modes de propagation**

L'expérience la plus simple pour comprendre la notion de modes consiste à injecter une lumière monochromatique (onde ayant une seule fréquence, une seule couleur) dans le guide, puis d'observer, à l'aide d'une caméra, le nombre de taches à la sortie du guide. Les différentes taches représentent des profils d'intensité stable qui se propagent dans le guide sans déformation. Un mode guide peut donc être défini comme une distribution transverse de l'onde optique dont le profil (amplitude et phase) restent constants le long de la direction de propagation. Il est caractérisé par une constante de propagation  $\beta$  qui représente le module du vecteur d'onde.

### **I.6.2 Approche d'optique géométrique dans le guide d'onde plan**

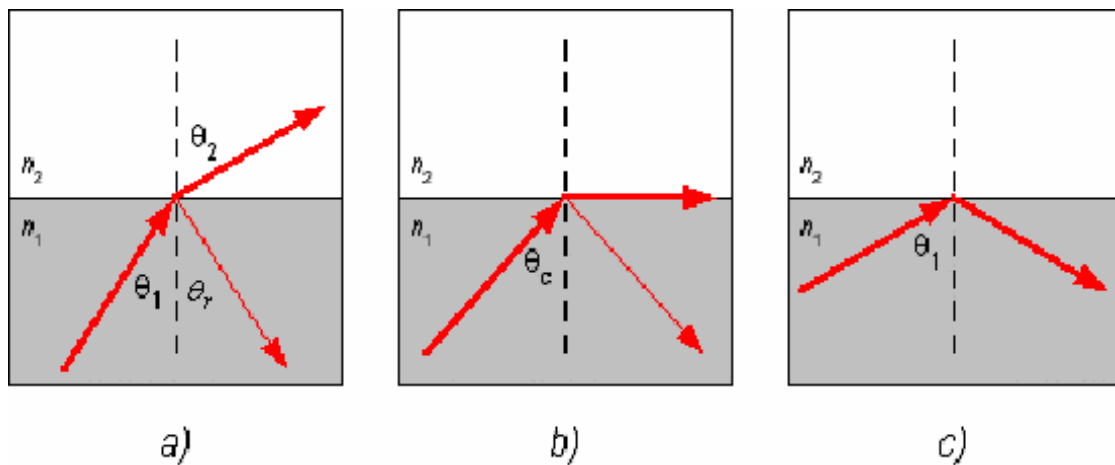
La lumière est confinée par réflexion totale aux interfaces couche guidante-substrat et couche guidante-revêtement. En considérant la lumière qui se propage dans la couche guidante en tant que rayon lumineux on obtient un trajet en forme de zigzag (Figure I.3). Ce sont la réflexion et la réfraction aux interfaces qui déterminent ce trajet. Elles sont régies par la loi de Snell-Descartes qui formule la dépendance entre l'angle de réflexion  $\theta_1$  et l'angle de réfraction  $\theta_2$  d'un rayon incident à l'interface de deux milieux d'indices de réfraction respectivement  $n_1$  et  $n_2$  (Figure I.4(a)).

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2 \quad \text{Eq I-6}$$

L'équation (Eq I-6) montre qu'il existe un angle incident pour lequel le rayon est réfracté à un angle de  $90^\circ$  dans le milieu 2 (figure I.4(b)). Cet angle appelé angle critique  $\theta_{rc}$  est défini par :

$$\theta_{rc} = \left( \sin \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \right)^{-1} \quad \text{Eq I-7}$$

Pour tout rayon incident dont l'angle d'incidence sera supérieur à l'angle critique, il n'y a alors pas de rayon réfracté et seul subsiste le rayon réfléchi : c'est le phénomène de réflexion totale (figure I.4(c)).



**Figure I.4** : Phénomène de réflexion- réfraction entre deux milieux d'indice de refraction  $n_1$  et  $n_2$

Dans le cas du modèle d'un guide planaire à trois couches ( $n_c$  et  $n_s < n_g$ ), les angles critiques des interfaces peuvent être définis comme suit :

- Pour la couche guidante - couche de confinement inférieure

$$\theta_c = \left( \sin \left( \frac{n_c}{n_g} \right) \right)^{-1} \quad \text{Eq I-8}$$

-Pour la couche guidante - couche de confinement supérieure

$$\theta_s = \left( \sin \left( \frac{n_s}{n_g} \right) \right)^{-1} \quad \text{Eq I-9}$$

A partir de ces deux angles critiques, trois configurations concernant l'angle d'incidence  $\theta$ , sur les interfaces cœur-substrat et cœur-superstrat (revêtement), peuvent exister :

**a- Premier configuration :  $\theta < \theta_c$**

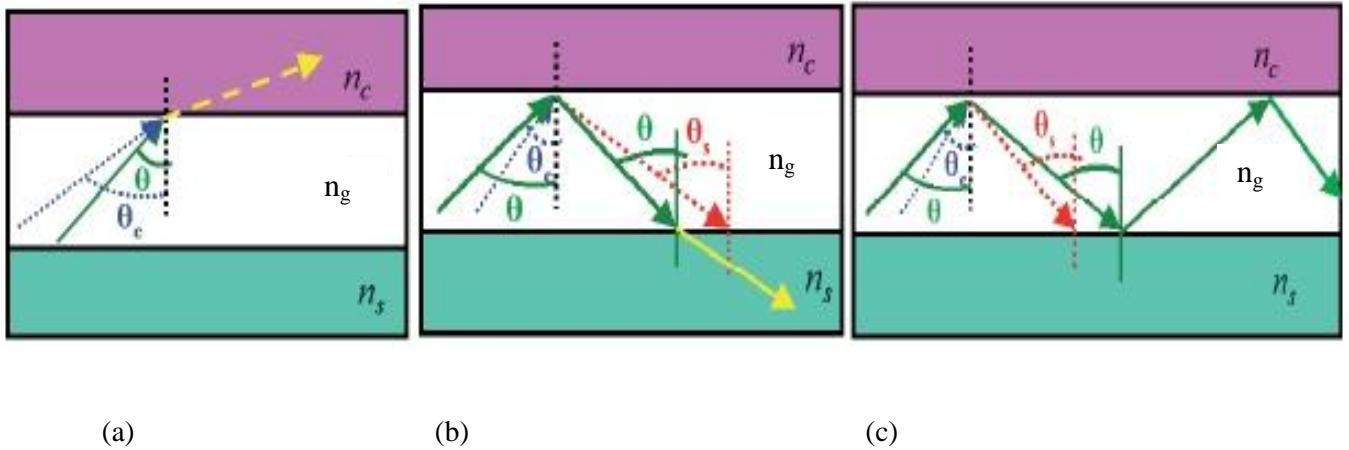
Le rayon lumineux incident est réfracté et s'échappe de la couche guidante vers la couche de confinement supérieur (Figure I.5(a)). Dans ce cas, la lumière n'est pas confinée. De tels modes sont appelés des modes de rayonnement.

**b- Deuxième configuration :  $\theta_c < \theta < \theta_s$**

Le rayon lumineux incident est entièrement réfléchi à l'interface couche guidante et couche de confinement supérieur. En suite, il est réfracté et s'échappe de la couche guidante vers la couche de confinement inférieure (Figure I.5(b)). Ce type de mode est appelé mode de substrat.

**c- Troisième configuration :  $\theta_s$  et  $\theta_c < \theta$**

La lumière est confinée dans la couche guidante suite à des réflexions totales aux deux interfaces et se propage en forme de zigzag (Figure I.5(c)). De tels modes sont appelés modes guidés et correspondent aux modes que nous aurons dans le cas de notre modèle.



**Figure I.5 :** propagation de la lumière dans un guide en fonction de l'angle d'indice  $\theta$  : (a) :  $\theta < \theta_c$  ; (b) :  $\theta_c < \theta < \theta_s$  ; (c) :  $\theta_c$  et  $\theta_s < \theta$  .



## I.7 Indice effectif

La notion d'indice effectif peut être expliquée en considérant les données suivantes :

Soit un guide d'onde plan dans lequel une onde optique de vecteur d'onde  $\vec{K}$ , de longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le vide, se propage dans la direction Oz et est confinée dans la direction Ox (Figure I.6).

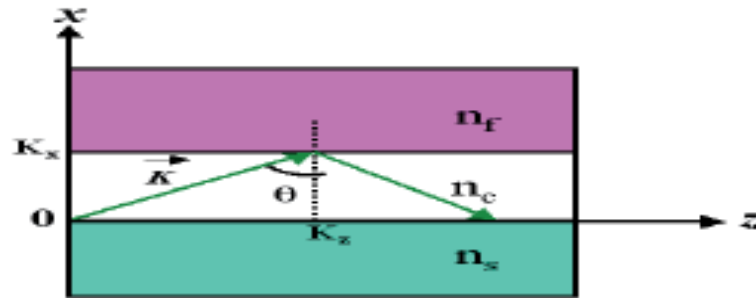


Figure I.6 : Principe de guidage de la lumière dans un guide plan

Les composantes  $K_x$  et  $K_z$  du vecteur d'onde  $\vec{K}$  et son module sont exprimés par les équations :

$$K_x = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_f \sin(\theta) \quad \text{Eq I-10}$$

$$K_z = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_f \cos(\theta) \quad \text{Eq I-10}$$

$$|\vec{K}| = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_f \quad \text{Eq I-12}$$

La constante de propagation étant défini comme étant le module du vecteur d'onde selon la direction de propagation alors  $\beta = K_z$

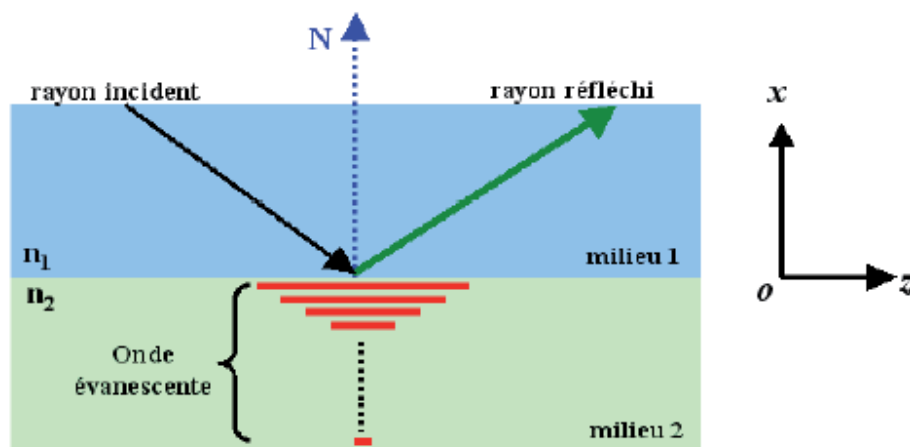
L'indice effectif correspond au rapport entre la constante de propagation de ce mode et la constante de propagation dans le vide ( $k=2\pi/\lambda_0$ ), d'où :

$$n_{eff} = \frac{\lambda_0}{2\pi} \beta = n_f \sin(\theta) \quad \text{Eq I-13}$$

## I.8 Notion d'onde évanescente

Lorsqu'un faisceau de lumière se propage par réflexion totale aux interfaces formées par deux milieux 1 et 2, toute l'intensité de l'onde incidente se retrouve dans l'onde réfléchi dans le milieu 1. En revanche dans le milieu 2, l'énergie de l'onde électromagnétique ne se propage pas dans la direction normale de la surface mais « s'évanouit » sous la couche de confinement qui forme ce milieu, c'est ce qu'on nomme : une onde évanescente (Figure I.7).

Cette onde de surface a caractère exponentiel décroissant est généralement produite suite a des réflexions totales de la lumière.



*Figure I.7* : Principe de guidage par réflexion totale : mise en évidence de l'onde évanescente

## I.9 Conclusion

Dans ce chapitre les notions de base de l'optique guidée, nécessaires a la compréhension de la suite du travail exposé dans ce mémoire, ont été introduites. Les notions d'indice effectif et d'onde évanescente se retrouvent effectivement comme composantes des équations définissant l'intensité de l'onde lors de sa propagation dans la structure proposée, dans notre étude.

# Chapitre II

## Microrésonateur en forme d'hippodrome

---

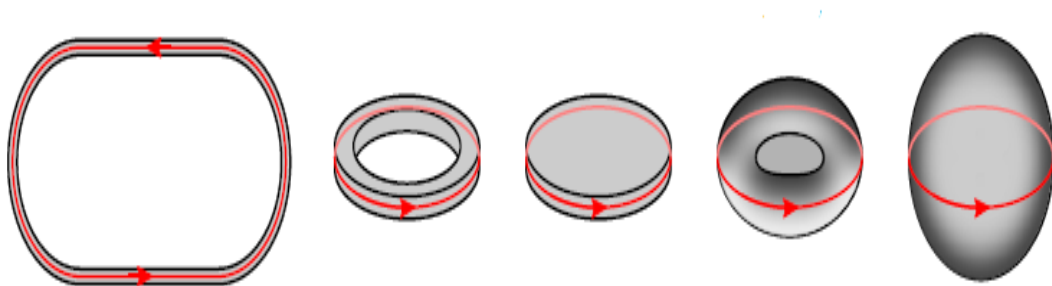
### II.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif l'expose du modèle microrésonateur en forme d'hippodrome. Les caractéristiques principales du microrésonateur telle que la réponse spectrale, les paramètres spécifiques qui sont le coefficient de qualité  $Q$ , l'intervalle spectral libre ISL et la finesse sont établis a partir de la théorie du modèle.

### II.2 Forme géométriques d'un microrésonateur

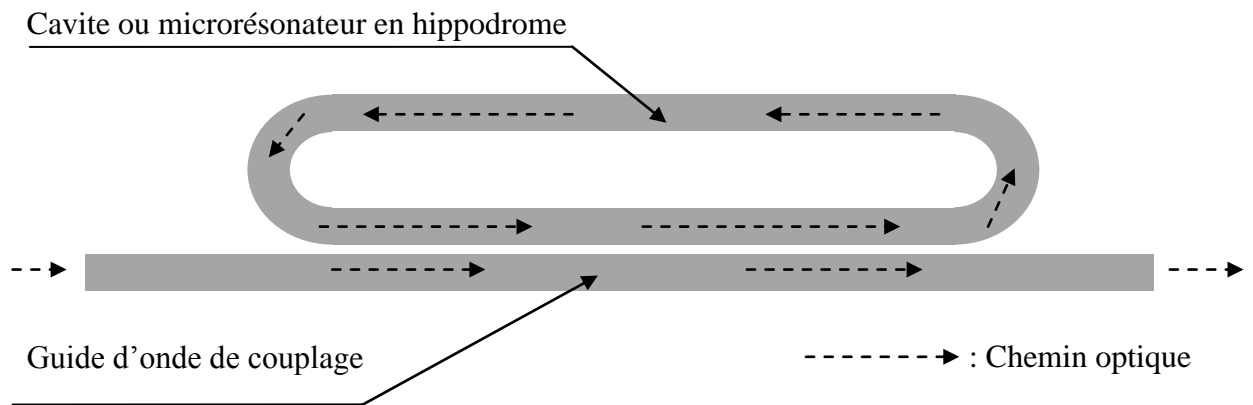
#### II.2.1 Définition

Un microrésonateur est constitue de deux guides, l'un dit guide rectiligne ou port l'autre nomme microrésonateur ou cavité résonante de formes multiples. Par abus de langage on parle de microrésonateur tout court en ajoutant avec ce terme la forme de la cavité. On peut distinguer plusieurs cas de formes géométriques pour la cavité parmi elles, la forme en anneau, la forme sphérique, la forme hippodrome pour n'en citer que celles ci (Figure II.1) [4]



*Figure II.1* : Formes géométriques de la cavité résonante

La structure à laquelle on s'intéresse dans ce mémoire se présente sous la forme d'un microrésonateur en forme d'hippodrome comme défini sur la ( Figure II.2).

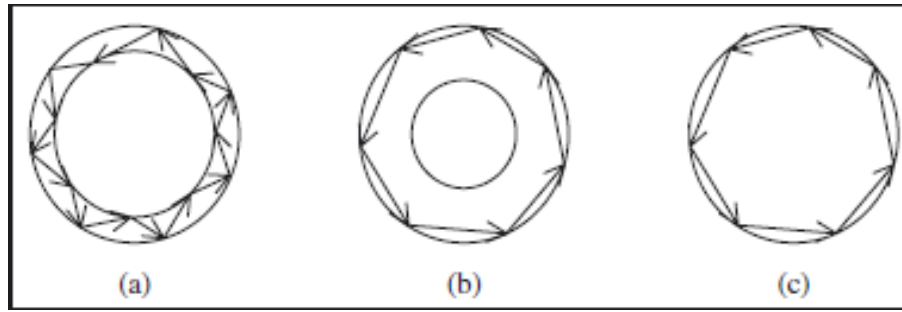


**Figure II.2** : Microrésonateur en forme d'hippodrome.

La définition de base d'un microrésonateur [5] peut être énoncée comme suit :

Un microrésonateur est une cavité dans laquelle la lumière injectée est confinée, ce qui permet de stocker son énergie et ainsi d'accumuler suffisamment de signal pour la détecter.

Il existe deux familles de microrésonateurs. La première famille correspond aux cavités de type Fabry-Pérot, c'est-à-dire constituées de deux surfaces réfléchissantes parallèles. Les ondes contra-propagatives génèrent une onde stationnaire permettant le stockage de l'énergie. La Deuxième famille, quant à elle, correspond aux cavités dites cycliques (bague, hippodrome», sphère...) à l'intérieur desquelles une seule onde progressive ,rebouclant sur elle-même, permet le stockage de l'énergie. Dans ces microrésonateurs cycliques, la lumière est confinée par réflexion interne totale et deux types de modes sont susceptibles de se propager: les modes guidés (figure II.3(a)) et les modes de galerie (figure II.3(b) et (c)) (en anglais Whispering Gallery Modes (WGM)).



**Figure II.3 :** Schématisation du confinement de la lumière par réflexion interne totale dans trois type de microrésonateurs circulaires (a) micro-anneau en régime de modes guidés,(b) micro-anneau en régime de modes de galerie,(c)micro-disque en régime de mode de galerie.

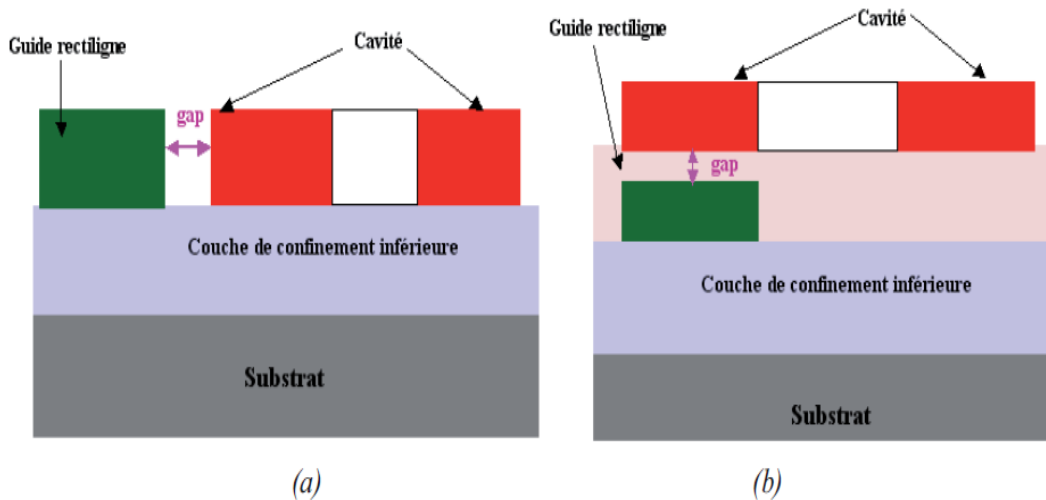
## II.3 Technologie de fabrication

Les microrésonateurs peuvent être fabriqués à partir de matériaux organiques et inorganiques. Une étude comparative des performances, en terme de facteur de qualité des micro résonateurs, proposée par Chao [6], a montré que les matériaux inorganiques présentent les facteurs de qualité les plus élevés (allant jusqu'à quelques  $10^9$ ). Cette étude a également montré que les matériaux polymères, appartenant à la famille des organiques, bien qu'ayant les facteurs de qualité plus faibles offrent des avantages de faible coût de fabrication liés à différentes technologies faciles à mettre en œuvre.

### II.3.1 Différents types de couplage :

Les performances spectrales d'un micro résonateur sont déterminées à partir de sa réponse spectrale (rapport entre l'intensité de l'onde en entrée du guide par rapport à l'intensité de l'onde en sortie du guide). L'obtention de cette réponse spectrale nécessite le couplage de la cavité avec un dispositif optique, comme un guide d'onde rectiligne, pour la lumière sonde. L'ensemble est séparé par un espace nommé gap.

Il existe deux types de couplage du micro résonateur optique avec le guide rectiligne d'injection : le couplage latéral (figure II.4(a)) et le couplage vertical (figure II.4(b)).



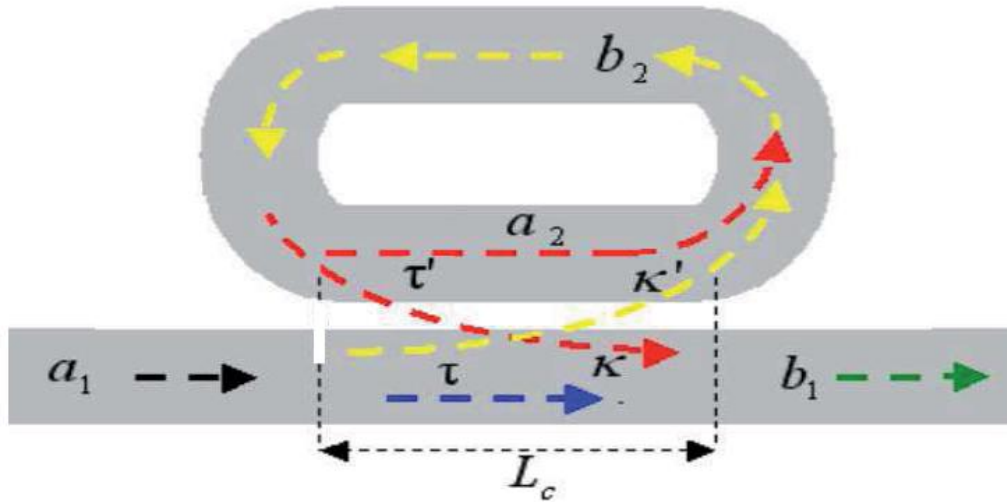
**Figure II.4:** Structure d'un microresonateur : (a) couplage latéral, (b) couplage vertical

## II.4 Théorie du micro résonateur en forme d'hippodrome a couplage latéral.

### II.4.1 Grandeurs de couplage

Comme décrit précédemment, un micro résonateur est constitué d'une cavité résonante couplée à un guide rectiligne servant d'entrée, de sortie pour la lumière d'excitation et d'extraction des modes guidés. A l'intérieur de la cavité, la lumière est confinée par réflexion totale interne. L'interrogation de l'onde optique guidée permet d'accéder à la réponse (intensité transmise) du microrésonateur. La (Figure II.5), illustre la propagation des champs guidés dans le micro résonateur.

Si un champ optique incident  $a_1$  est injecté dans le guide rectiligne, une partie  $b_1$  est directement transmise dans le guide rectiligne. L'autre partie  $b_2$  est couplée dans la cavité. Après chaque tour de cavité une partie du champ  $b_2$  est couplée vers la sortie du guide rectiligne et l'autre partie  $a_2$  transmise dans la cavité et continue de circuler. Théoriquement, dans un système sans perte, toute la puissance injectée en entrée peut être complètement extraite en sortie du guide rectiligne. En pratique, les différentes pertes (radiation, diffusion, absorption, insertion, etc.) ne permettent jamais une extraction totale.



*Figure II.5:* Propagation des champs dans le microrésonateur.

Sur la (Figure II.5),  $L_c$  représente la longueur de couplage,  $k$  et  $k'$  les coefficients de couplage guide rectiligne-cavité et cavité-guide rectiligne, respectivement,  $\tau$  la transmission guide rectiligne-guide rectiligne et  $\tau'$  la transmission cavité-cavité.

La forme hippodrome ayant un rayon de courbure généralement noté  $R$ .

## II.4.2 Réponse spectrale du microrésonateur en forme d'hippodrome [1]

La méthode des matrices de diffusion utilisée par A.Yariv pour développer le coefficient de transmission d'un micro résonateur sans pertes et par couplage peut être adaptée pour généraliser le modèle en tenant compte de ces pertes. L'idée de cette approche est d'établir l'expression du champ total transmis  $b_1$  en sortie du guide rectiligne en fonction du champ incident  $a_1$ , des coefficients de couplage (guide rectiligne-cavité  $k$  et cavité-guide rectiligne  $k'$ ), des transmissions (guide rectiligne-guide rectiligne  $\tau$  et cavité-cavité  $\tau'$ ), des pertes par tour de cavité  $\alpha$  et des pertes totales par couplage  $\alpha_i$ . la matrice de transfert définie au point de couplage cavité guide rectiligne est de la forme

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \alpha_i \begin{pmatrix} \tau & jk' \\ jk & \tau' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad \text{Eq II-1}$$

Où  $j$  représente le nombre complexe tel que  $\sqrt{j} = -1$

Le développement de cette équation conduit à :

$$b_1 = \alpha_i(\tau a_1 + j a_2 k') \quad \text{Eq II-2}$$

$$b_2 = \alpha_i(j k a_1 + \tau' a_2) \quad \text{Eq II-3}$$

Le champ  $a_2$  correspondant à la partie de  $b_2$  ayant parcourue un tour de cavité, son expression tenant compte du retard accumulé pendant ce tour est :

$$a_2 = a b_2 \exp\left(j \frac{2 \pi n_{eff}}{\lambda} L\right) \quad \text{Eq II-4}$$

Où  $n_{eff}$  représente l'indice effectif du mode de la cavité guidé et  $L$  le périmètre de la cavité.

Le coefficient de transmission complexe  $H(\lambda)$  du micro résonateur, correspondant au rapport entre le champ incident  $a_1$  et le champ transmis  $b_1$  obtenu à partir de (Eq I-2) est de la forme :

$$H(\lambda) = \frac{b_1}{a_1} = \alpha_i \left( \frac{j k' a_2}{a_1} + \tau \right) \quad \text{Eq II-5}$$

Le rapport  $\frac{a_2}{a_1}$  est obtenu à partir de (Eq I-4) et celui de  $\frac{b_1}{a_1}$  est obtenu à partir de (Eq I-5)

$$H(\lambda) = \frac{b_1}{a_1} = \alpha_i \left( \frac{j k' a_2}{a_1} + \tau \right) \quad \text{Eq II-6}$$

$$\frac{b_2}{a_1} = \alpha_i \left( \frac{\tau' a_2}{a_1} + j k \right) \quad \text{Eq II-7}$$

En substituant le rapport  $\frac{b_2}{a_1}$  de (Eq I-6) par l'expression de (Eq I-7) on obtient :



$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{j \alpha_i a k \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)}{1 - \alpha_i a \tau' \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)} \quad \text{Eq II-8}$$

En substituant également le rapport  $\frac{a_2}{a_1}$  dans (Eq II-6) on aboutit à l'expression des coefficients de transmission complexe d'un micro résonateur

$$H(\lambda) = \frac{\alpha_i \tau - (\kappa \kappa' + \tau \tau') \alpha_i^2 a \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)}{1 - \alpha_i a \tau' \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)} \quad \text{Eq II-9}$$

Dans le cas d'un modèle symétrique, c'est-à-dire  $\kappa = \kappa'$  et  $\tau = \tau'$ ,  $H(\lambda)$  devient :

$$H(\lambda) = \frac{\alpha_i \tau - (\kappa^2 + \tau^2) \alpha_i^2 a \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)}{1 - \alpha_i a \tau' \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)} \quad \text{Eq II-10}$$

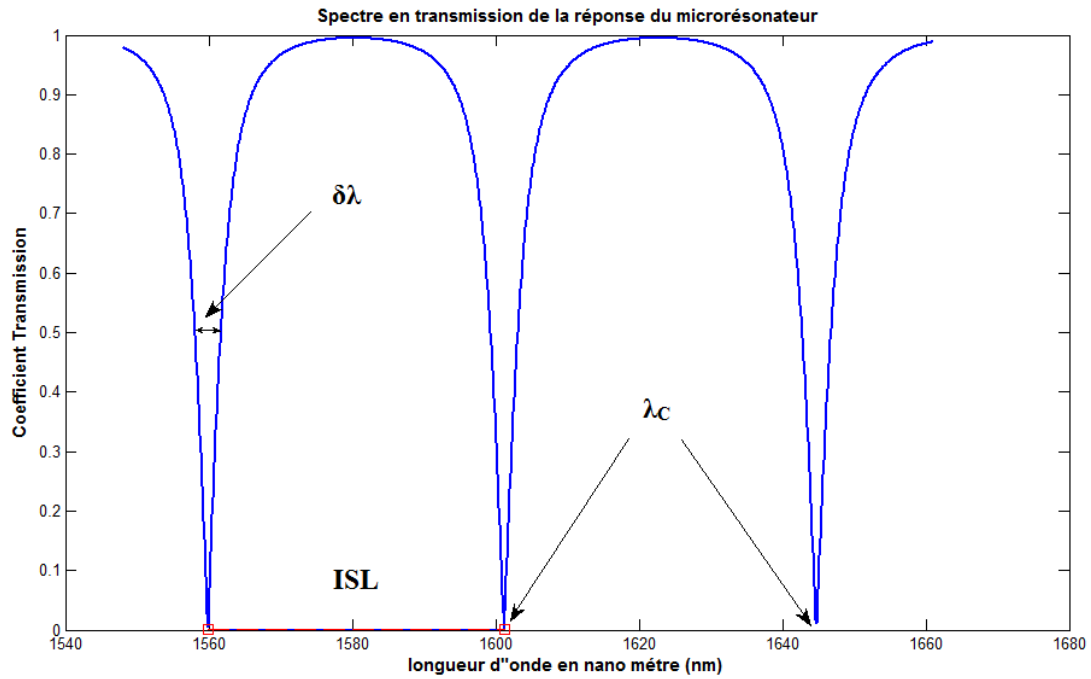
En utilisant la loi conservation de l'énergie définie par :

$$(\kappa^2 + \tau^2) = 1 \quad \text{Eq II-11}$$

L'expression de  $H(\lambda)$  devient :

$$H(\lambda) = \frac{\alpha_i \tau - \alpha_i^2 a \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)}{1 - \alpha_i a \tau' \exp\left(j \frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda}\right)} \quad \text{Eq II-12}$$

Cette expression peut prendre l'allure représentée en (Figure II.6), ou apparaissent également les paramètres caractéristiques du microrésonateur.



**Figure II.6** : Réponse spectrale du microrésonateur

Le Tableau II.1 représente une synthèse du modèle théorique d'un micro résonateur proposé par différents auteurs. Ce tableau montre bien que moyennant certaines hypothèses, les modèles théoriques obtenus sont en bon accord. Dans la suite de ce paragraphe, nous allons utiliser le modèle dans lequel le couplage et la transmission du guide rectiligne vers la cavité identiques à ceux de la cavité vers le guide rectiligne :  $\kappa = \kappa'$  et  $\tau = \tau'$ .

Auteurs	Suppositions	Coefficient de transmission	Références
Chao	$\kappa'=\kappa^*, \tau'=\tau^*$	$H(\lambda)=\frac{\alpha i \tau - \alpha i 2 a \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}{1 - \alpha i a \tau \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}$	[ 7]
Yariv et Gottesman	$\kappa'=\kappa^*, \tau'=\tau^*$ et $\alpha_i=1$	$H(\lambda)=\frac{\tau - a \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}{1 - a \tau \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}$	[8]
Nagteale Heebner, Darmawan, Vahala	$\kappa'=\kappa^*, \tau'=\tau^*$ et $\alpha_i=1$ , et $a = \exp\left(\frac{-\alpha L}{2}\right)$ ; $\alpha$ :facteur des pertes	$H(\lambda)=\frac{\tau - \exp\left(\frac{-\alpha L}{2}\right) \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-\alpha L}{2}\right) \tau \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}$	[9]
Rabus	$\kappa'=\kappa^*, \tau'=\tau^*$ et $\alpha_i=1$ ,  $\eta = \exp\left(\frac{-\alpha L}{2}\right)$ , et $\alpha_i = \sqrt{1 - \gamma}$ ; $\gamma$ :pertes d'insertion en intensité	$H(\lambda)=\frac{\tau \sqrt{1 - \gamma} - (1 - \gamma) \exp\left(\frac{-\alpha L}{2}\right) \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}{1 - \sqrt{1 - \gamma} \exp\left(\frac{-\alpha L}{2}\right) \tau \exp\left(\frac{j 2 \pi L n e f f}{\lambda}\right)}$	[10]

**Tableau II.1** : Coefficient de transmission d'un micro résonateur suivant différents auteurs.

Les coefficients utilisé lors de la simulation sont :  $a = 0.8$ ,  $\alpha_i = 0.95$ ,  $\tau = 0.80$ ,

### II.4.3 Paramètres caractéristiques d'un micro résonateur

Les paramètres caractéristiques du micro résonateur peuvent être déterminés à partir de son spectre de transmission de la réponse du micro résonateur.

### a-L'intervalle spectral libre (ISL)

L'intervalle spectral libre (ISL) correspond à la différence entre deux longueurs d'onde de résonance consécutives. Il peut être estimé par [11] :

$$\text{ISL} = \lambda_{c_1} - \lambda_{c_0} = \frac{(\lambda_{c_0})^2}{L \left( n_{\text{eff}}(\lambda) + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} \lambda_{c_0} \right)} = \frac{(\lambda_{c_0})^2}{L n_g(\lambda)} \quad \text{Eq II-13}$$

Ou  $n_g = n_{\text{eff}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda} \lambda_{c_0}$  représente l'indice effectif de groupe.

### b- La largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ )

Elle définit les expressions de la largeur à mi-hauteur exprimée en fonction des paramètres de pertes, de l'indice effectif et de la circonférence de la cavité [1]. Elle peut être estimée par :

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_{c_0}^2}{2\pi n_{\text{eff}} L} \cos^{-1} \left( \frac{Z(1 + \alpha_i^2 \tau^2 a^2) - (\alpha_i^2 \tau^2 + \alpha_i^4 a^2)}{2\alpha_i \tau a(Z - \alpha_i^2)} \right) \quad \text{Eq II-14}$$

$$Z = \frac{1}{2} \left( \left| \frac{\alpha_i \tau - a\alpha_i^2}{(1 - \alpha_i \tau a)} \right|^2 + \left| \frac{\alpha_i \tau - a\alpha_i^2}{(1 + \alpha_i \tau a)} \right|^2 \right) \quad \text{Eq II-15}$$

### c- Le facteur de qualité $Q$

Le facteur de qualité  $Q$  est défini comme étant le rapport entre la longueur d'onde de résonance  $\lambda_{c_0}$  et la largeur de raie de résonance  $\delta\lambda$ . Ce paramètre, principalement lié à la sensibilité du capteur, est inversement proportionnel aux pertes [11].

$$Q = \frac{\lambda_{c_0}}{\delta\lambda} \quad \text{Eq II-16}$$

### d- La finesse

La finesse est définie par le rapport entre l'intervalle spectral libre et la largeur de raie de résonance. Nous avons vu que pour obtenir un grand facteur de qualité, il était

important d'avoir respectivement un ISL élevé et une faible largeur à mi-hauteur. L'obtention simultanée de ces deux paramètres conduit à une finesse  $F$  élevée [11]. Elle est définie par :

$$F = \frac{ISL}{\delta\lambda} \quad \text{Eq II-17}$$

### e-Influence du couplage

L'équation (Eq.II-17) représente la loi de dispersion de l'indice effectif en polarisation TE du mode fondamental guidé dans un microrésonateur à guide rectangulaire de largeur  $4 \mu\text{m}$ , de hauteur  $2 \mu\text{m}$ , dont le cœur est en SU-8 (type de résine), le substrat en CYTOP et le superstrat de l'eau, et avec  $\lambda_{nm}$  la longueur d'onde en nm.

$$n_{eff\_TE} = 1,5909 - 4,62 \times 10^{-5} \lambda_{nm} \quad \text{Eq II-17}$$

Ce paramètre est introduit dans l'équation définissant la réponse spectrale du microrésonateur, simulée sous matlab, dans le chapitre suivant.

## II.5 Utilité pratique de la réponse spectrale

Dans ce sous chapitre on va exposer une utilité pratique de la réponse spectrale. Cette utilité est configurée sur la (figure II.7) [4]. L'application exposée est relative au domaine biodétection.

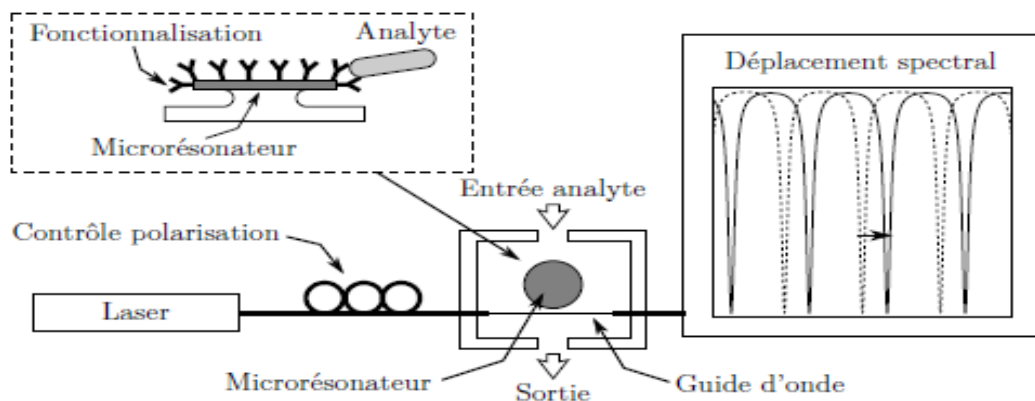


Figure II.7: Biodétection à l'aide de microrésonateur à mode galerie

Un résonateur est couplé à un guide d'onde qui injecte et récupère la lumière du résonateur. On observe à la sortie un certain ensemble de pics de résonance. Lorsque des analytes s'attachent au résonateur, ils modifient l'indice de réfraction local et augmentent le parcours optique. Cela a pour effet de causer un déplacement du spectre de résonance, que l'on peut mesurer.

## **II.6 Conclusion**

Ce chapitre bien que théorique nous a permis de comprendre l'importance du couplage dans la réponse spectrale du microrésonateur. Les coefficients de couplage ne sont pas uniques et plusieurs auteurs ont, dans leur travaux de recherche, établis ces coefficients pour avoir une meilleur réponse spectrale selon l'application pour laquelle le microrésonateur est destiné.

# Chapitre III Simulation et Analyses

---

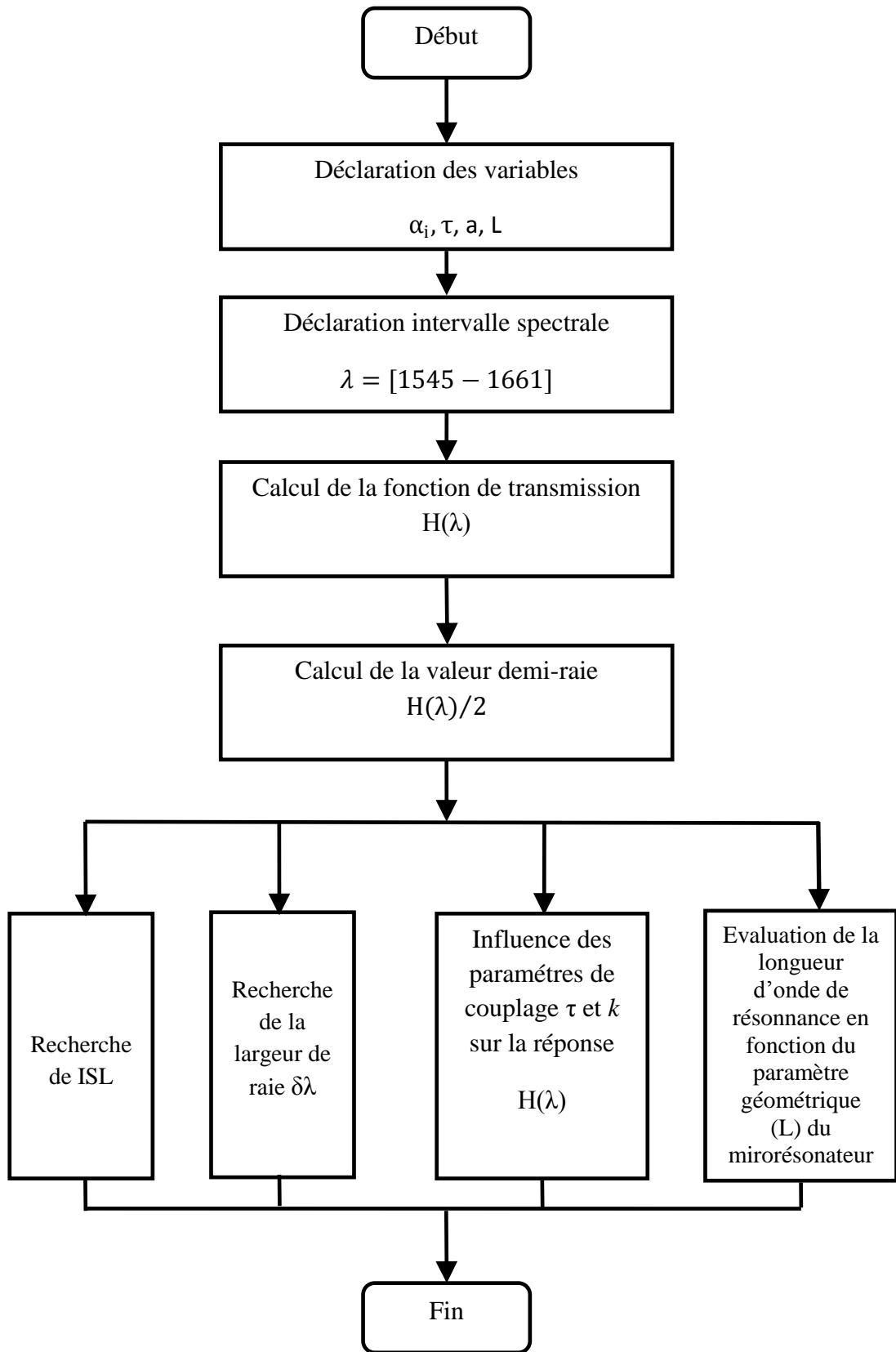
## III.1 Introduction

Ce chapitre représente la simulation sous matlab, des paramètres du micro résonateur optique on forme d'hippodrome couplé verticalement à un guide d'onde rectiligne. Nous calculerons les paramètres caractéristique : la fonction de transmission du micro résonateur, l'intervalle spectral libre (ISL), la largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ ), facteur de qualité (Q),et enfin la finesse ( $F$ ).la simulation utilise les deux modèles décrits par Chao et Yariv-Goltesman.

## III.2 Simulation et résultat du modèle de chao

### III.2.1 Organigramme générale définissant la fonction de transmission

Les étapes de calculs permettant le trace de la fonction de transmission et les paramètres caractéristiques sont établis selon l'organigramme (figure III.1), suivant :

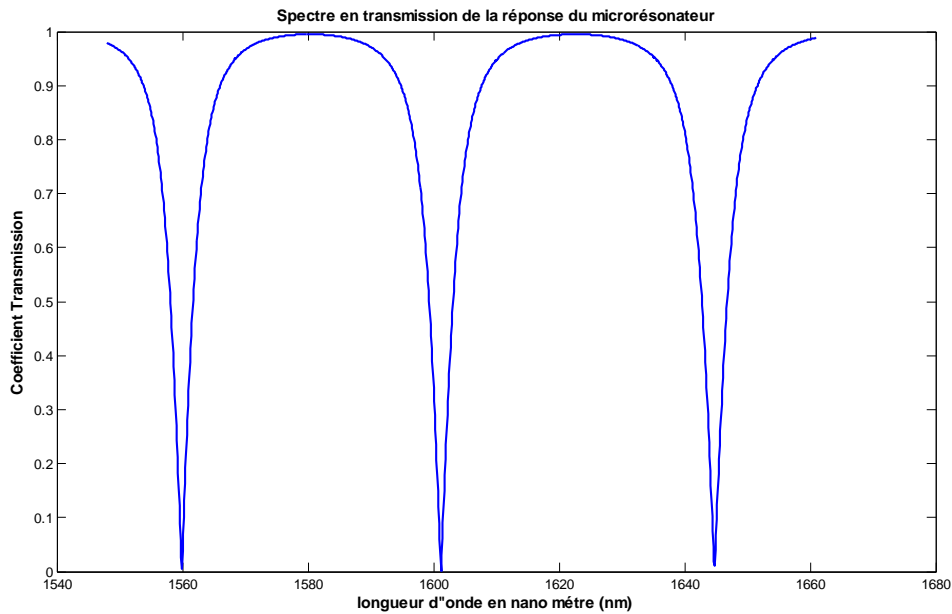


**Figure III.1:** Organigramme du programme transmission spectrale de micro résonateur optique.



### a- Fonction de transmission du micro résonateur

Le spectre de la fonction de transmission (réponse du microrésonateur) est établi en (figure III.2). Cette courbe est tracé dans le domaine spectral déclaré au préalable. Ce trace nécessite un pas de variation pour les valeurs de la longueur d'ondes dans le domaine. Il est important, comme on le verra lors de l'évaluation de la raie de résonance, les paramètres caractéristiques.

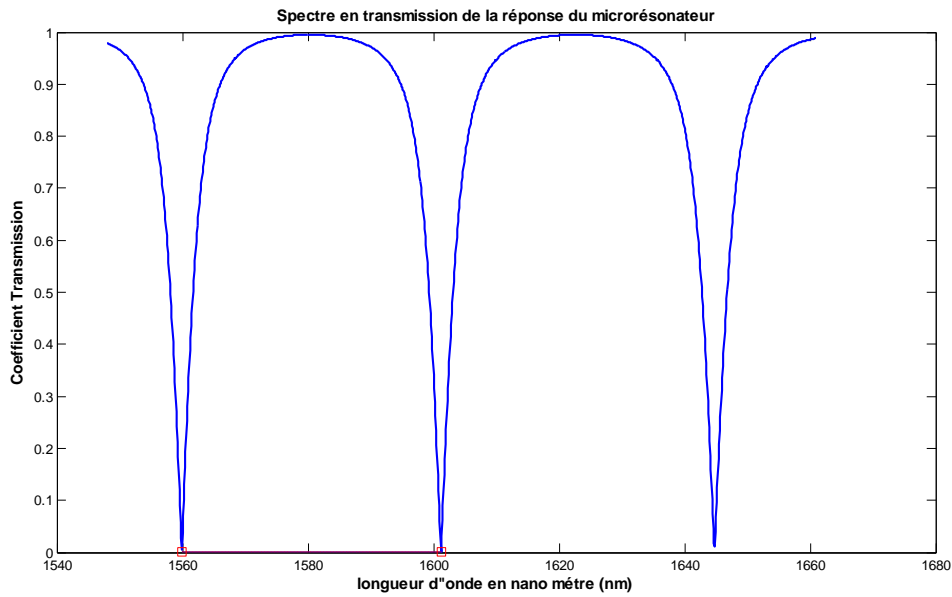


*Figure III.2:* Spectre en transmission de la réponse du micro résonateur

On remarque bien l'atténuation (énergétique) du signal jusque la fréquence de résonance, caractérisé ici par la longueur d'onde critique (1559,9nm), puis une progression en énergie du coefficient de transmission. Cette forme de la fonction est périodique et ce répète le long du spectre des longueurs d'ondes.

### b-L'intervalle spectral libre (ISL)

L'intervalle spectral libre entre deux premiers minimums  $\lambda_0$  et  $\lambda_{01}$ , ( $ISL = \lambda_0 - \lambda_{01}$ ) est représenté en (figure III.3), la fonction FINDPEAKS ( $H(\lambda)$ ) a été utilisée dans le programme pour évaluer les pics de la courbe. Les résultats de cet intervalle sont rappelés sur le (tableau III.1).



**Figure III.3 :** L'intervalle spectral libre(ISL)

Paramètre	$\lambda_0$	$\lambda_{01}$	ISL
Valeurs (nm)	1559,9	1601,2	41,3

**Tableau III.1:** Les résultats de l'intervalle spectral libre (ISL)

### c- La largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ )

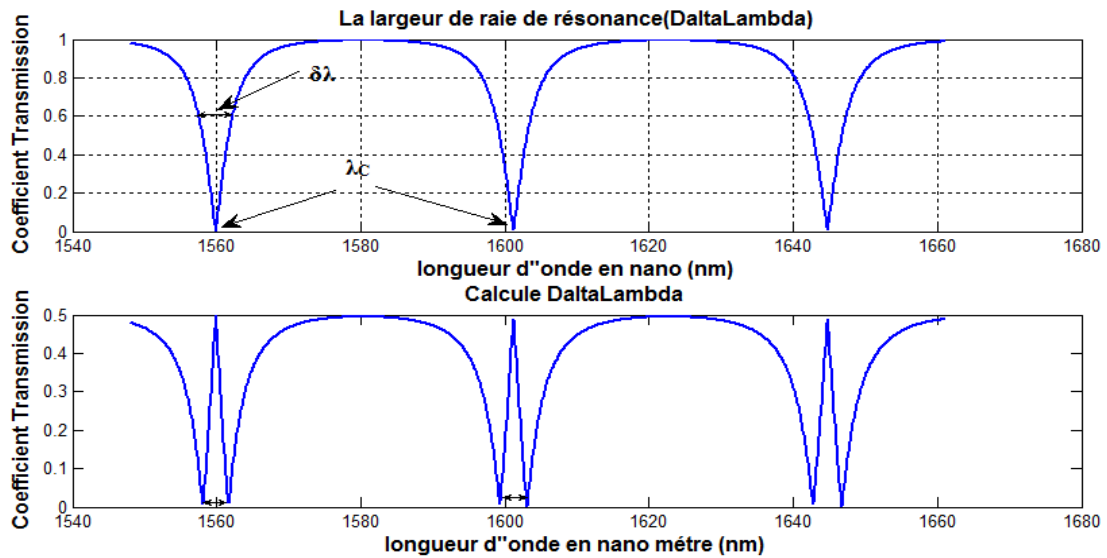
La largeur de raie spectrale est représentée par la différence des longueur d'ondes correspondante à la valeur demi-atténuation du facteur de transmission ou réponse spectrale  $H(\lambda)$ .

Cependant, et puisque les valeurs de  $H(\lambda)$  sont calculés à chaque pas d'itérations (selon le choix de l'utilisateur), il est difficile d'obtenir avec précision les valeurs des longueur d'ondes correspondantes à la valeur demi-atténuations de  $H(\lambda)$ . la valeur exacte de ces longueurs d'ondes ne peut s'obtenir qu'avec un pas d'itérations "très" petit, mais plus le pas d'itération est 'petit' plus le temps de calcul devient élevé.

Ceci représente l'une des raisons par lesquelles les paramètres caractéristiques des microrésonateurs sont évalués par approximation.

Ce problème nous a poussé à introduire lors des programmations (voir annexe.1 pour les programmes), la fonction FINDPEAKS(Ninvbis) pour l'évaluation des longueurs d'ondes, correspondants à la demi-atténuation de  $H(\lambda)$ .

Les (figure III.4) et le (tableau III.2) exposent les résultats de la simulation.



**Figure III.4:** La largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ )

Paramètre	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\delta\lambda_1$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\delta\lambda_2$
Valeurs (nm)	1557,9	1561,9	4	1599,2	1603,2	4

**Tableau III.2 :** Les résultats de la largeur de raie résonance ( $\delta\lambda$ )

#### d- Dédution des paramétra $Q$ et $F$

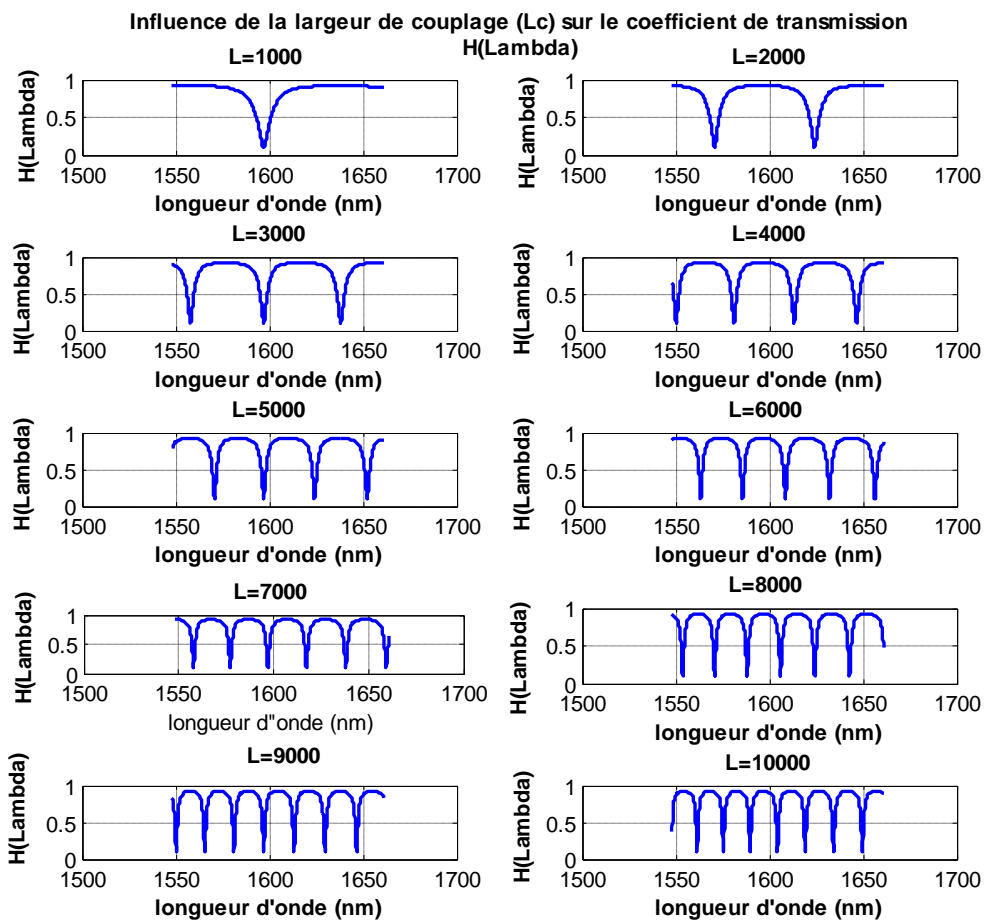
Les paramètres facteur de qualité ( $Q$ ) et la finesse ( $F$ ) données par les équation citées en (Eq.II-16) et ( Eq.II-17) du chapitre II sont déduites et résumés au (tableau III.3)

Paramètre	$\lambda_0$	$\lambda_{01}$	ISL	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\delta\lambda$	$Q$	$F$
Valeurs (nm)	1559,9	1601,2	41,3	1557,9	1561,9	4	389.975	10.3250

**Tableau III.3 :** Les résultats des caractéristiques d'un micro résonateur optique

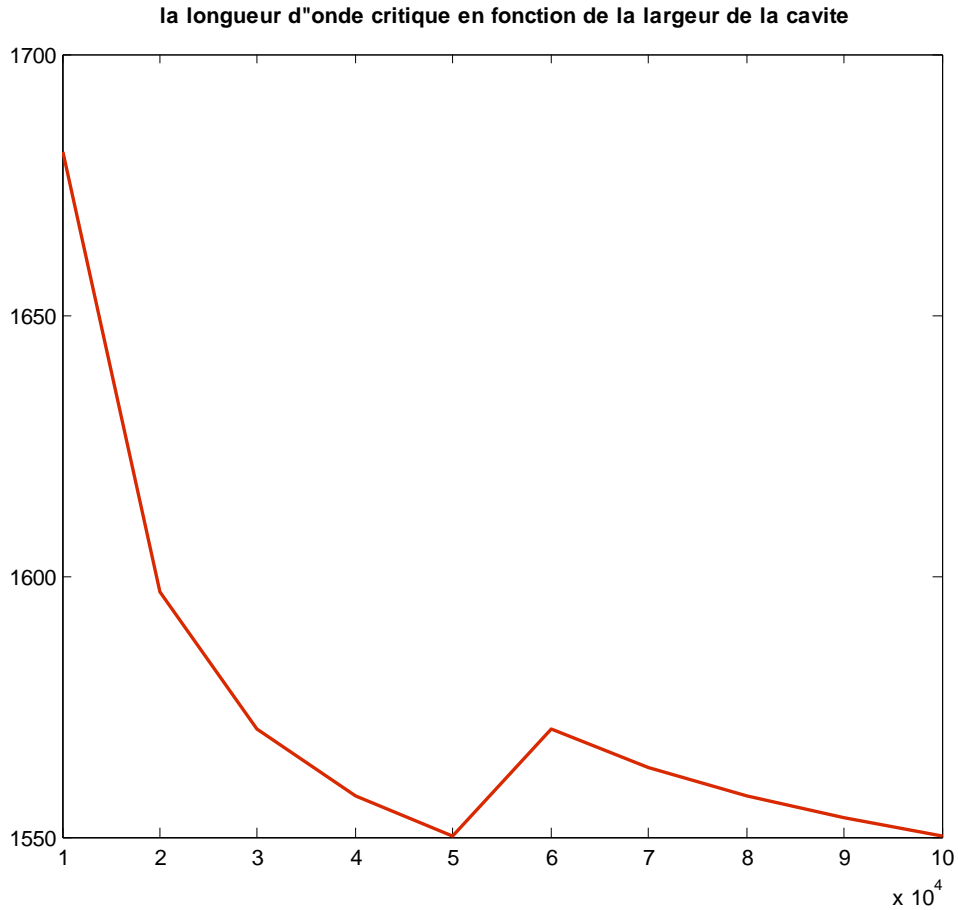
### III.2.2 Influence de la largeur de couplage ( $L_c$ ) sur le coefficient de transmission

La longueur de couplage, entre la cavité résonnante et le guide rectiligne, est un paramètre géométrique important dans le comportement de la réponse spectrale du microrésonateur, comme le montre les résultats de la simulation exposée en (figure III.5). On remarque bien que le nombre de pics, atténuation-progressive, augment.



**Figure III .5:** La variation du coefficient de transmission  $H(\lambda)$  en fonction de la variation de la longueur de couplage  $L_c$

(Figure III-6) résume ainsi donc les variations de la fréquence de coupure en fonction de la longueur de couplage ( $L_c$ ). En augmentant cette dernière on entraîne une baisse de la fréquence de résonance.



**Figure III.6:** La longueur d'onde critique en fonction de la largeur de Cavite

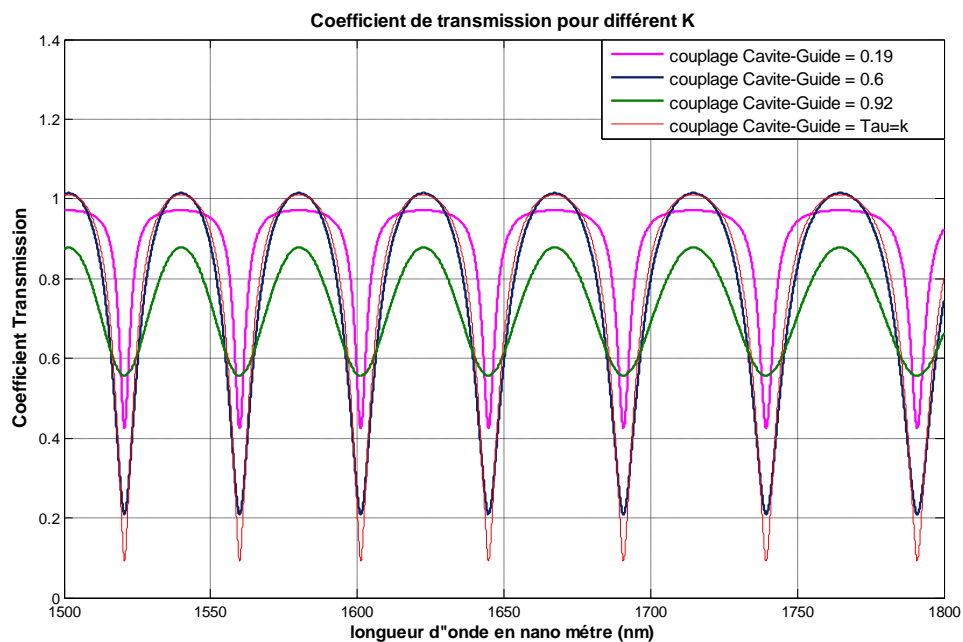
Le (tableau III.4) résume les valeurs des fréquences de coupure pour les différentes valeurs de ( $L_c$ ).

L (nm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda$ (nm)	1681,3	1597,0	1570,7	1557,9	1550,3	1570,7	1563,4	1557,9	1553,7	1550,3

**Tableau III.4 :** Les résultats de La longueur d'onde critique en fonction de la longueur de la Cavite

### III.2.3 Influence des coefficients de couplage sur la réponse spectrale $H(\lambda)$

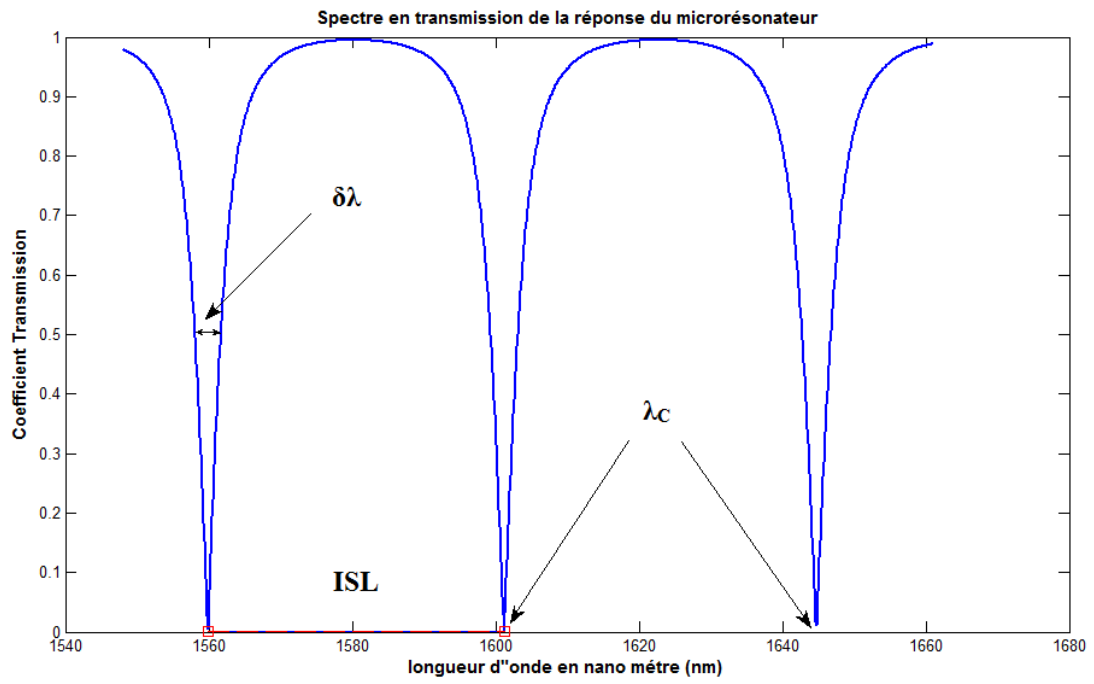
La simulation des effets des coefficients de couplage sur la réponse spectrale, apparaissent en (figure III.7), de montrant que plus le coefficient de couplage cavité-guide  $k$  est faible (donc  $\tau$  élevé), plus la transmission au niveau du guide rectiligne chute.



*Figure III.7:* Différentes valeur des coefficients de couplage  $\tau$  et  $k$ .

### III.3 Simulation et résultats du modèle de Yariv et Gottesman

Le (figure III.8) représente la simulation de la transmission spectrale du micro résonateur, Les résultats sont identique a ceux du modèle de Chao.



*Figure III.8:* Spectre en transmission de la réponse de microrésonateur

Le (tableau III.5) défini tous les résultats finaux pour deux modèles différents la premier Chao et Yariv et Gottesman.

paramètre ( <i>nm</i> )	Equation (1)( <i>nm</i> )	Equation (2)( <i>nm</i> )
$\lambda_{C0}$	1559,9	1559,9
$\lambda_0$	1559,9	1559,9
$\lambda_{01}$	1601,2	1601,2
ISL	41,3	41,3
$\lambda_1$	1558,9	1558,2
$\lambda_2$	1561,9	1561,5
$\lambda_3$	1599,2	1599,5
$\lambda_4$	1603,2	1603,0
$\delta\lambda_1$	4	3,3
$\delta\lambda_2$	4	3,5
$Q$	389,975	472.696
$F$	10. 3250	12.151

**Tableau III.5** : Résumé des résultats des modèles de Chao et Yariv Gottesman

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, à partir du modèle théorique d'un microrésonateur, une étude de l'influence des coefficients de couplage sur la réponse et les performances comme, le facteur de qualité, la finesse ont été établis sur la base des modèles de Chao et Yariv-Gottesman. Ces équations similaires aboutissent à des résultats identiques.



## Conclusion générale

---

Dans ce travail, la théorie de base de l'optique guidée a permis d'établir le modèle du microrésonateur en forme d'hippodrome. Les résultats de la simulation sous logiciel matlab appliquée aux deux modèles (Chao et Yariv-Gottsman), utilisés dans cette étude, ont permis l'établissement des paramètres caractéristiques qui sont la réponse spectrale, le coefficient de qualité, la finesse, l'intervalle spectral libre et la largeur de raie. L'importance de la longueur de couplage a été mise en évidence aussi et ce grâce aux résultats obtenus.

# Annexes

---

## Annexes 1

### Modèle basé sur l'équation de Chao

#### Coefficient de transmission spectrale (figure III.2)

```
close all;
clc;
clear all;
Tau=0.80;
Alphai=0.95;
a=0.80;
L=38*10^3;
r=Alphai*Tau;
b=Alphai^2*a;
d=r*a;
Lambda = [1548 :.11:1661];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5))) *Lambda);
c=((j*2*pi*neff*L)/Lambda);
H=(r-b*exp(c))/(1-d*exp(c));
Hm=abs(H);
figure
plot(Lambda,Hm);
xlabel('Longueur d'onde en nano mètre(nm)');
ylabel(' Coefficient Transmission');
title(' Spectre en transmission de la réponse du microsénateur');
```

#### Intervalle spectral libre (ISL),( figure III.3)

```
close all;
clc;
clear all;
Tau=0.80;
Alphai=0.95;
a=0.80;
L=38*10^3;
r=Alphai*Tau;
b=Alphai^2*a;
d=r*a;
Lambda = [1548 :.11:1661];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5))) *Lambda);
c=((j*2*pi*neff*L)/Lambda);
H=(r-b*exp(c))/(1-d*exp(c));
Hm=abs(H);
figure(1)
```

```

plot(Lambda,Hm);
S=max(Hm);
U=min(Hm);
V=U+(S-U)/2;
hold on
plot(Lambda,V,'k');
grid;
[PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Hm);
Ninv=1.01*max(Hm)-Hm;
[PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Ninv);
%LOCS;
X1=Lambda(LOCS(1,1));
X2=Lambda(LOCS(1,2));
X=[X1 X2]
Y=[U U];
line(X,Y);
ISL=(X2-X1);
plot(X,Y,'-rs');
xlabel('longueur d'onde en nano mètre (nm)');
ylabel(' Coefficient Transmission');
title('Lintervalle spectral libre ISL');

```

### Largeur de raie de résonance ( $\delta\lambda$ ) , (figure III.4)

```

CLOSE ALL;
clc;
clear all;
Tau=0.85;
Alphai=0.95;
a=0.85;
L=30*10^3;
r=Alphai*Tau;
Lambda = [1548 :11:1661];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5))))*Lambda);
c=((j*2*pi*neff*L)/Lambda);
H=(Tau-a*exp(c))/(1-a*Tau*exp(c));
Hm=abs(H);
figure
subplot(2,1,1);
plot(Lambda,Hm);
xlabel('longueur d'onde (nm)')
ylabel(' Coefficient du Transmission');
title('Spectre en transmission de la réponse du Microsérateur');
grid;
S=max(Hm);
U=min(Hm);
V=U+(S-U)/2;
hold on
plot(Lambda,V,'k');
grid
[PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Hm);
Ninv=1.01*max(Hm)-Hm;
[PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Ninv);
X1=Lambda(LOCS(1,1));
X2=Lambda(LOCS(1,2));
X=[X1 X2]
Y=[U U];
ISL=(X2-X1) ;
line(X,Y);
plot(X,Y,'-rs');

```

```

grid;
Nbis=abs(Hm-0.5);
subplot(2,1,2);
plot(Lambda,Nbis);
grid;
xlabel('longueur d"onde (nm)');
ylabel(' Coefficient Transmission');
title('pour calcule DeltaLambda');

Ninvbis=1.01*max(Nbis)-Nbis;
[PKSbis,LOCSbis]= FINDPEAKS(Ninvbis);
Lambda1=Lambda(LOCSbis(1,1));
Lambda2=Lambda(LOCSbis(1,2));
Lambda3=Lambda(LOCSbis(1,3));
Lambda4=Lambda(LOCSbis(1,4));

DeltaLambda1=(Lambda2-Lambda1);
DeltaLambda2=(Lambda4-Lambda3);

F = ISL./ DeltaLambda1 ;
Q= X1./DeltaLambda ;

```

#### Influnance de la largeur de couplage sur $H(\lambda)$ ,(figure III.4)

```

close all ;
clc;
clear all;
Tau=0.8;
Alphai=0.95;
a=0.8;
r=Alphai*Tau;
b=Alphai^2*a;
d=r*a;
Lambda = [1548 :.11:1661];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5))))*Lambda);

i=1;
for
L=20:10:150;
L1=L*10^3;
c=((j*2*pi*neff*L1)/Lambda);
H=(r-b*exp(c))/(1-d*exp(c));
Hm=abs(H);
subplot(5,2,i);
plot(Lambda,Hm);
i=i+1;
xlabel('longueur d"onde (nm)');
ylabel('H(Lambda)');
title('Influnance du la largeur sur H(Lambda) ');
grid;
end

```

#### Longeur d'onde en fonction du la largeur ( $\lambda = (L)$ ),(figure III.5)

```

close all;
clc;
clear all;
kk = (100 - 10)/10;
pas = 10*10^3;

```

```

for
    jj = 1 : kk+1
    L = jj*pas
    VectL(1,jj) = L;
    Tau=0.8;
    Alphai=.95;
    a=0.8;
    r=Alphai*Tau;
    b=Alphai^2*a;
    d=r*a;
    Lambda = [1548 :.05:1800];
    neff =1.5909-((4.62*(10^(-5)))*Lambda);
    c=((j*2*pi*neff*L)/Lambda);
    H=(r-b*exp(c))/(1-d*Tau*exp(c));
    Hm=abs(H);
    S=max(Hm);
    U=min(Hm);
    V=U+(S-U)/2;
    [PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Hm);
    Ninv=1.01*max(Hm)-Hm;
    [PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Ninv);
    X1(1,jj)=Lambda(LOCS(1,1)) ;
end
plot(VectL,X1) ;
title('Valeur de la longueur d"onde critique en fonction de la largeur de la cavite');

```

### Différentes valeur des coefficients de couplage $\tau$ est $\kappa$ , ( figure III.6)

```

close all;
clc;
clear all;
Tau=0.80;
Alphai=0.95;
a=0.80;
L=38*10^3;
r=Alphai*Tau;
b=Alphai^2*a;
d=r*a;
Lambda = [1548 :.11:1661];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5)))*Lambda);
c=((j*2*pi*neff*L)/Lambda);
H=(r-b*exp(c))/(1-d*Tau*exp(c));
Hm=abs(H);
S=max(Hm);
U=min(Hm);
V=U+(S-U)/2;
figure(1)
subplot(2,1,1);
plot(Lambda,Hm);
xlabel('longueur d"onde (nm)')
ylabel(' Coefficient Transmission');
title('Spectre en transmission de la réponse du Microsénateur');
grid
hold on
plot(Lambda,V,'k');
[PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Hm);
Ninv=1.01*max(Hm)-Hm;
[PKS,LOCS]= FINDPEAKS(Ninv);
X1=Lambda(LOCS(1,1));
X2=Lambda(LOCS(1,2));

```

```

X=[X1 X2];
Y=[U U];
line(X,Y);
ISL=(X2-X1);
plot(X,Y,'-rs');
Nbis=abs(Hm-0.5);
subplot(2,1,2);
plot(Lambda,Nbis);
xlabel('longueur d"onde (nm)');
ylabel(' Coefficient Transmission');
title('Calcul de DeltaLambda');
Ninvbis=1.01*max(Nbis)-Nbis;
[PKSbis,LOCSbis]= FINDPEAKS(Ninvbis);
Lambda1=Lambda(LOCSbis(1,1));
Lambda2=Lambda(LOCSbis(1,2));
Lambda3=Lambda(LOCSbis(1,3));
Lambda4=Lambda(LOCSbis(1,4));

DeltaLambda1=(Lambda2-Lambda1);
DeltaLambda2=(Lambda4-Lambda3);

[m n]= size(LOCSbis) ;
for
k = 1 : n
    xbis(1,k) = Lambda(LOCSbis(1,k));
end
    xbis
    ll=0;
for
kk = 1 : (n/2)
DeltaLambda(1,kk) = xbis(1,ll+2) - xbis(1,ll+1)
ll= ll+2
end
DeltaLambda
VecteurTau = [0.92 0.6 0.19];
figure
t=0;
for
i =1 : 3
t=t+.1
Alphai=.95;
a=0.8;
Tau = VecteurTau(1,i);
r=Alphai*Tau;
b=Alphai^2*a;
d=r*a;
Lambda = [1500 :.05 :1800];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5))) *Lambda);
c=((j*2*pi*neff*L)./Lambda);
H=(r-b*exp(c))./(1-d*Tau*exp(c));
Hm=abs(H);
S=max(Hm);
U=min(Hm);
V=U+(S-U)./2;
kk1 = .6 + t;
kk2 = 3*t;
kk3 = t + .5;
p(i) = plot(Lambda,Hm,'LineWidth',2,'Color',[kk1 kk2 kk3]);
hold on
%plot(Lambda,V)

```

```

grid on;
end;

Alphai=.95;
a=0.8;
Tau = 0.7;
r=Alphai*Tau;
b=Alphai^2*a;
d=r*a;
Lambda = [1500 :.05 :1800];
neff =1.5909-((4.62*(10^(-5))) *Lambda);
c=((j*2*pi*neff*L)/Lambda);
H=(r-b*exp(c))/(1-d*Tau*exp(c));
Hm=abs(H);
S=max(Hm);
U=min(Hm);
V=U+(S-U)/2;
pp = plot(Lambda,Hm,'r');
xlabel('longueur d'onde en micron (nm)');
ylabel(' Coefficient Transmission');
title('Coefficient de transmission pour différent K');
hold on
%plot(Lambda,V)
grid on;
legend([p(1) p(2) p(3) pp], 'couplage Cavite-Guide = 0.19', 'couplage Cavite-Guide = 0.6', 'couplage Cavite-Guide = 0.92', 'couplage Cavite-Guide = Tau=k' );

```

# Bibliographie

---

[1] : Y.SANOGO

Conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans le domaine de la sante et de l'environnement.

Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan Décembre 2012.

[2] : [http://images.slideplayer.fr/12/3953331/slides/slide\\_11.jpg](http://images.slideplayer.fr/12/3953331/slides/slide_11.jpg)

[3] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7a/Wellenlaenge.png/220px-Wellenlaenge.png>

[4] : A.RAMIER

Intégration de guides d'onde et microrésonateurs a modes de galeries par assemblage a puce retournée.

Maitrise Es-Sciences appliquées (Genie Physique) – Université de Montréal – Aout 2014.

[5] : A-F.OBATON, Y.SANOGO, J.DUBARD

Développement d'un moyen d'interrogation de biocapteurs photoniques sur la base d'un interféromètre en lumière incohérente.

Revue Française de Métrologie no 26, Volume 2011-2

[6] : C-Y.CHAO

Polymer microring resonators for biochemical sensors applications.

PhD thesis – University Of Michigan – 2005

[7] :Y.Gottesman

New Methodology to evaluate the performance of ring resonator

Revue Française de Métrologie no26,volume 2004-6

[8] :P.Nagtegale, Microrésonateur circulaire a base polymère pour fonctions d'insetion-extraction en telecomenication optique

PhDthèse- ENS Cachan-2005

[9] :C-Y.Chao

Polymer microring resonators for biochemical sensors applications.

PhD thesis – University Of Michigan-2006



[10]: D.G.Rabus

Realisation of optical filters using ring resonator with integrated semi conductor optical-  
Berline 2006.

[11]: S.Arnorld, M Khoshima, I.Teraoka et F.Vollmer

Shift of whispering –gallery modes in microspheresby protein adsorption.  
Optics Letters, 28, 272-274 - thèse 2003.