

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE  
N° : .....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
FILIERE : ELECTRONIQUE  
OPTION : SYSTEME DE  
TELECOMMUNICATION

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par:

*Mayouf Mostafa Elhadi*

*Benyounes Azouz*

Intitulé

**Etude des structures métalliques MIM aux spectres  
infrarouges**

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Tarek ZOUACHE	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
Prof. Abdesselam HOCINI	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
Dr. Ahlam HARHOUZ	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022 / 2023

# *Remerciements*

*Avant tout, nous remercions le **MON DIEU** pour nous avoir aidés à accomplir ce présent travail.*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier sincèrement le professeur **ABDESSELAM HOCINI**, qui nous a donné le privilège de travailler, cet acte humble n'aurait pas été possible. Nous le remercions de son aide et de la qualité de sa formation.*

*nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à **Mrs Imane Zegaar** pour toute l'aide et la patience. Ses conseils, ses remarques, ses encouragements et sa soutien qui nous ont été très utiles pour l'accomplissement de ce travail*

*Nous remercions sincèrement les membres du jury qui nous ont honorés d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Enfin, nos chers parents et familles peuvent trouver ici surtout nos sincères remerciements pour leur sacrifice, leur aide, leur soutien et leurs encouragements pour assurer cette composition dans les meilleures conditions.*

# *Dédicace*

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir  
donné la santé, la patience, la volonté et de m'avoir fourni sa  
bénédiction.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes chers parents, symbole de sacrifice, de tendresse, qui ont  
éclairé mon chemin et qui m'ont encouragé et soutenue toute au long  
de mes études.*

*À mes deux chères sœurs : IBTISSAM, et MAYSSOUN*

*,À mes deux chers frères : AMIR et DJEWAD,*

*À mon ancienne collègue universitaire AMIRA*

*À mon binôme AZOUZ*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers mes chères amies :*

*SEIF , AYMEN ,REDOUAN ,ISLAM ,THAMER ,HOUSSAM  
,ABDALHAY , IMAD ,ABDOU ,ALI ,FAYSEL ,NASRO ,MILOUD,  
MAHFOUD ,WAIL , MERYAM pour leurs encouragements tout au  
long de ma démarche.*

***Mostafa***

# *Dédicace*

*A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise je ne saurais point te remercier  
comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide  
et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour  
affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher père.*

*Tu laisses un grand vide dans ma vie, mais sache qu'il y aura toujours  
une place pour toi dans mon cœur. Même si tu ne sembles pas être  
avec moi. Que dieu te garde dans ces vastes paradis.*

*Je dédie ce fruit de travail à mes frères MOHAMED et NOUNOU , je  
souhaite exprimer ma gratitude pour votre présence constante  
de la réalisation de ce travail.*

*Pour toutes mes amies FAROUK , AKRAM , OBI qui ont toujours été  
là pour moi.*

**AZOUZ**

# Table des matières

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les plasmoniques</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Historique .....	4
I.3. plasmons.....	4
I.3.1. plasmons de volume .....	4
I.3.2. Plasmons de surface .....	5
I.3.2.1. Les plasmons de surfaces délocalisés .....	6
I.3.2.2. Plasmon de surface localisé .....	6
I.4. Résonance plasmon de surface .....	7
I.4.1. Principe .....	7
I.5. Relation de dispersion des plasmons de surface .....	9
I.6. Couplage optique en mode de réflexion totale atténuée .....	10
I 6.1 Couplage par prisme .....	12
I 6.2 Couplage par réseau de diffraction .....	12
I 6.3. Couplage par ondes optiques guidées .....	13
I.7. Exemples d'application des plasmons de surface.....	14
I. 7.1. Biomédecine.....	14
a- La détection des séquences d'ADN en remplacement des colorants organiques fluorescents.....	14
b- L'étiquetage cellulaire.....	14
c- L'hyperthermie.....	15
d- L'administration des médicaments .....	15
I. 7.2. Énergie solaire.....	15
I.7.3. Technologie de l'information.....	15
I.7.4. La diffusion Raman exaltée de surface (SERS : Surface Enhanced Raman Scattering) .....	16
I.7.5. Exaltation de l'émission des OLED .....	16

I.8. Conclusion.....	17
----------------------	----

## Chapitre II : filtre à base plasmonique

II.1. Introduction.....	18
II.2. Définition et rôle des filtres.....	19
II.2.1.Filtre active.....	19
a. Filtre passe-bas actif .....	20
b. Filtre passe-haut actif.....	20
c. Filtre passe-bande actif.....	20
e. filtre coupe-bande actif .....	20
f. Filtre égaliseur actif.....	20
II.2.2. Filtres passifs volumiques.....	20
II.2.2.1.Filtres à guides d'ondes.....	20
II.2.2.2.Filtres à résonateurs diélectriques.....	21
II.2.2.3.Filtres à résonateurs métalliques.....	21
II.3. Filtre optique.....	22
II.4. Les filtres optiques a base plasmonique .....	22
II.5. résonateurs optiques.....	23
II.5.1. Type des résonateurs optiques .....	24
a. Résonateurs Fabry-Perot.....	24
b.Résonateurs microcavités .....	24
c. Résonateurs à cristaux photoniques .....	24
d. Résonateurs à cavité optique haute-Q .....	24
c. Résonateur en anneau.....	25
II.5.2 Caractéristique d'un résonateur en anneau.....	26
II.6 le guide d'onde MIM .....	28
II.7 Filtre à base d'un résonateur en anneau de type Add/Drop.....	29
II.8. Conclusion.....	30

## Chapitre III : Résultats et interprétation

III .1 Introduction.....	31
III.2 Outil de la simulation.....	32
III.2.1 Logiciel Rsoft CAD.....	32
III.2.2 .Modules de simulation associés.....	32
III.2.2.2 Simulateur FullWAVE.....	32

<b>III.2.3 Méthode des différences finies temporelles (FDTD).....</b>	<b>33</b>
<b>III .2.3.1 Principe de base de la méthode.....</b>	<b>33</b>
<b>III.3 Les étapes de simulation d'un guide d'onde.....</b>	<b>33</b>
<b>III.3.1 Créer un nouveau circuit .....</b>	<b>34</b>
<b>III.3.2Boîte de dialogue“Launch paramètres“.....</b>	<b>35</b>
<b>III.3.3 Les Moniteurs.....</b>	<b>36</b>
<b>III.3.4 Détermination des variables .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3.5Vérification du profil d'index.....</b>	<b>38</b>
<b>III.3.6 Réglage des paramètres de simulation .....</b>	<b>39</b>
<b>III.3.6.1Voire les résultats.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.Présentation de la structure étudiée.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.1 Étude guide onde plasmonique MIM.....</b>	<b>40</b>
<b>III.4.1.1 Etude métal .....</b>	<b>40</b>
<b>III.4.1.2 Épaisseur du matériau diélectrique.....</b>	<b>42</b>
<b>III.4.2 Structure GUIDE/CAVITE (couplage).....</b>	<b>43</b>
<b>III.4.2.1 Couplage GUIDE-CAVITE (FORME T ).....</b>	<b>43</b>
<b>III.4.2.1.1 L'effet de L1 .....</b>	<b>44</b>
<b>III.4.2.1.2 L'effet de L2 .....</b>	<b>45</b>
<b>III.4.3 Distribution de champ magnétique.....</b>	<b>45</b>
<b>III.4.4 Amélioration de la Structure .....</b>	<b>46</b>
<b>III.4.4.1 couplage guide- deux cavité forme T .....</b>	<b>46</b>
<b>III.4.4.2 couplage guide trois cavités forme T .....</b>	<b>47</b>
<b>III.4.4.3 couplage guide quatre cavités forme T.....</b>	<b>48</b>
<b>III.5 Conclusion.....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>51</b>
<b>Bibliographie</b>	

# Liste des figures

## *Chapitre I : Généralité sur les plasmoniques*

Figure I.1. Représentation schématique d'une onde de densité électronique se propageant le long d'une interface métal-diélectrique .....	5
Figure I.2: Schéma du phénomène de résonance des plasmons d surface localisés.....	6
Figure I.3: Résonance plasmonique de surface (SPR).....	7
Figure I.4 : La formation de l'onde évanescente.....	8
Figure I.5 : Relation entre angle de résonance et mesure du signal en SPR et SPRi ...	9
Figure I.6 : Relation de dispersion des plasmons de surface.....	9
Figure I.7: Couplage optique par un prisme. ....	11
Figure I.8 : Structure du multicouche plasmonique : A- dans la configuration de Kretschmann-Raether ; B- dans la configuration d'Otto.....	11
Figure I.9 : Couplage par prisme (méthode ATR).....	12
Figure I.10 : Couplage par réseau de diffraction.....	13
Figure I.11 : Couplage par un guide d'onde optique.....	13
Figure I.12 : Principe de couplage optique. ....	13

## **Chapitre II : les filtres à base de plasmonique**

Figure II.1 : Gabarit des filtres idéaux .....	19
Figure II.2: Filtre à résonateurs diélectriques.....	21
Figure II.3: Filtre à cavités métalliques cylindriques avec vis de réglage.....	22
Figure II.4 : Configuration du résonateur en anneau (a) All-passe, (b) Add-drop.....	25
Figure II.5 :Exemple de spectre de transmission d'un résonateur en anneau (a) All-passe, (b) Add-drop.....	26
Figure II.6 : Principe de transmission dans résonateur en anneau. ....	27

Figure II.7 : (a) Schéma d'un filtre add-drop à micro résonateur. (b) Réponse spectrale d'un seul résonateur à microring. La distance spectrale entre les résonances est appelée plage spectrale libre (FSR)..... 29

### **Chapitre III : Résultat et interprétation**

Figure III .1 : Écran principal de RSOF CAD .....	34
Figure III.2: La fenêtre de démarrage où les informations de base de la structure sont définies. ....	35
Figure III.3 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.....	36
Figure III.4 : Boîte de dialogue “Launch Paramètres”.....	36
Figure III.5 : La boîte de dialogue des propriétés du moniteur.....	37
Figure III.6 : l’éditeur du Tableau de symboles .....	37
Figure III.7: (a) fenêtre de comput matériel Profil .....	38
Figure III.8 : (b)distribution d'indice de réfraction. ....	38
Figure III.9 : La fenêtre de paramètres de simulation Full WAVE.....	39
Figure III.10 :Guide d’onde plasmonique MIM.....	40
Figure III.11: Spectre de transmission d'un guide d'onde pour les différents métaux .	41
Figure III.12: Spectre de transmission pour de différent largeur de guide d'onde. ...	42
Figure III.13: variation de $\Delta T$ (Transmission) en fonction de l’épaisseur (largeur) du guide d’onde w .....	43
Figure III.14 : Structure plasmonique 2D forme T .....	44
Figure III.15: spectre de transmission pour différent valeur de L1.....	44
Figure III.16 :spectre de transmission pour différent valeur de L2.....	45
Figure III.17: la distribution de champ magnétique $\lambda = 2.05 \mu\text{m}$ .....	46
Figure III.18: Structure plasmonique à deux cavité forme T .....	46
Figure III. 19 :Transmission spectrale du coupe-bande filtre à différentes valeurs de d .....	47
Figure III.20: Structure plasmonique à trois cavité.....	48
Figure III.21: Structure plasmonique à quatre cavité.....	48
Figure III.23: Comparaison entre les spectres de transmission avec deux et trois et quatre cavités . ....	49

# Liste des tableaux

<b>Tableau III. 1:</b> La valeur de transmission pour différents métaux. ....	41
<b>Tableau III. 2:</b> La valeur de transmission pour différent largeur de guide d'onde.....	42
<b>Tableau III .3 :</b> La largeur de la bande interdite à plusieurs cavité.....	49

# Liste des acronymes

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé quelques abréviations dont nous rappelons la signification ci-dessous :

$\omega_p$  : La fréquence plasma.

$m_e$  : La masse effective des électrons.

$n_e$  : La densité de charge.

$e$  : La charge élémentaire d'un électron.

$\mathbf{K}$  : Vecteur d'onde.

$L_{sp}$  : La longueur de propagation.

$L_{PI}$  : La longueur de pénétration du plasmon.

$\epsilon_p$  : Constante relative positive.

$\epsilon_m$  : Constante diélectrique complexe.

$K_{JX}$  : La constante de propagation de l'onde plasma.

$\mathbf{E}$  : Le vecteur champ électrique.

$\mathbf{D}$  : Le vecteur déplacement électrique.

$Q_0$  : La norme du vecteur d'onde dans le vide.

$\omega_{sp}$  : La pulsation du plasmon de surface.

$n_{eff}$  : l'indice effectif du guide d'ondes de flexion

$\Phi_0$  : Flux lumineux incident.

$\Phi$  : Le flux transmis par le filtre.

$T$  : Facteur de transmission.

$\lambda$  : La longueur d'onde.

$\lambda_i$  : satisfait la condition de résonance

$F$  : La finesse.

$Q$  : Le facteur de qualité.

**ATR** : Attenuated Total Reflection.

**CAO** : Conception Assistée Par Ordinateur.

**DBR** : Dual Behavior Resonator.

**DFB** : Digital Filtre Bank.

**DRR** : Résonateurs À Double Anneau.

**FDM** : Finite-Difference Method.

**FDTD** : Finite Difference Time Domain.

**FFT** : Fast Fourier Transform.

**FSR** : Free Spectral Range.

**FWHM** : Full Width At Half Maximum.

**IMI** : Isolant – Métal – Isolant.

**LSP** : Localise Surface Plasmon.

**LSPR** : Localized Surface Plasmon Resonance.

**MIM** : Métal – Isolant – Métal.

**OLED** : Diode Electroluminescente Organique.

**OTDM** : Optical Time Division Multiplexing

**PPS** : Plasmon Polariton De Surface.

**PS** : Plasmon De Surface.

**RI** : Refractive Index).

**RS** : Ring Resonator.

**SERS** : Surface Enhanced Raman Scattering.

**SP** : Surface Plasmons.

**SPP** : Plasmons-Polaritons De Surface.

**SPR** : Résonance Par Plasmon De Surface.

**SRR** : Résonateur À Anneau Unique.

# Introduction Générale

## **Introduction générale**

Au cours des deux dernières décennies, un intérêt considérable s'est porté sur les structures plasmoniques capables de guider la lumière à une échelle inférieure à la longueur d'onde . Ces structures présentent des caractéristiques uniques et ont un large éventail d'applications potentielles dans des domaines tels que l'optique intégrée, la détection biologique et l'occultation. De nombreuses recherches ont été menées sur différents aspects de ce domaine. Plus récemment, les travaux de recherche se sont concentrés sur les plasmoniques, qui permettent de contrôler la propagation de la lumière à une échelle de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. Un domaine émergent qui exploite les propriétés des plasmons de surface est celui des filtres optiques. Ce domaine de recherche est très prometteur en raison de la possibilité d'atteindre une extrême miniaturisation et une sélectivité élevée. Les filtres optiques basés sur les plasmoniques permettent de séparer un canal optique du signal combiné sans utiliser d'électronique. La plasmonique est une branche dérivée de la nano-photonique qui exploite les propriétés physiques remarquables d'un mode électromagnétique de surface appelé plasmon-polariton de surface (SPP). Les surfaces métalliques peuvent soutenir des excitations appelées polaritons de surface plasmon (SPPs), résultant de l'interaction entre les photons et les électrons de conduction à la surface du métal, ce qui permet de confiner et de guider la lumière à des échelles nanométriques. Les guides d'ondes plasmoniques, qui sont des structures MIM (Métal-Isolant-Métal), exploitent les propriétés des SPPs pour acheminer efficacement la lumière à l'échelle nanométrique. Une fine couche isolante est placée entre deux couches métalliques, créant ainsi une structure sandwich. Cette conception permet de confiner les SPPs dans la couche isolante, où ils peuvent se propager sur de longues distances avec des pertes minimales. Pour étudier et concevoir des dispositifs plasmoniques tels que les guides d'ondes plasmoniques, on utilise souvent des méthodes de simulation numérique telles que la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

Le but de ce mémoire est de concevoir un filtre coupe-bande utilisant des structures plasmoniques MIM, en utilisant le logiciel de simulation FULLWAVE développé par Rsoft, basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Ce manuscrit est divisé en trois chapitres organisés comme suit.

Dans le premier chapitre, nous commencerons par un historique de la plasmonique, en mettant en évidence les avancées clés qui ont conduit à son émergence en tant que domaine de recherche distinct. Nous explorerons la définition de la plasmonique et discuterons des

différents types de plasmons, notamment les plasmons de volume et les plasmons de surface. Nous aborderons ensuite la relation de dispersion des plasmons de surface, qui décrit le comportement de la propagation des plasmons le long d'une interface métal-diélectrique. Nous examinerons également quelques exemples d'applications des plasmons de surface dans différents domaines, mettant en évidence leur potentiel en termes de contrôle de la lumière à des échelles nanométriques. Enfin, nous discuterons du couplage entre les plasmons de surface et d'autres modes de propagation de la lumière, mettant en évidence l'importance de ce phénomène dans la conception de dispositifs plasmoniques.

Le deuxième chapitre est consacré à la définition et au rôle des filtres optiques dans les systèmes optiques. Nous présenterons une classification des filtres en fonction de leurs caractéristiques et de leurs applications spécifiques. Nous mettrons également en évidence l'utilisation des résonateurs en anneau dans les filtres optiques et discuterons de leurs applications courantes. Nous décrirons les caractéristiques d'un résonateur en anneau et présenterons différents types de résonateurs optiques qui sont utilisés dans la conception de filtres plasmoniques. En particulier, nous nous concentrerons sur le guide d'onde MIM (Métal-Isolant-Métal), qui exploite les propriétés des plasmons de surface pour acheminer efficacement la lumière à l'échelle nanométrique.

Le troisième chapitre, nous présenterons les méthodes de simulation utilisées dans notre étude, notamment la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). Nous discuterons également du logiciel de simulation FULLWAVE développé par Rsoft, qui nous permettra de modéliser et de caractériser notre filtre plasmonique de structure MIM. Nous aborderons les aspects pratiques de la simulation, en mettant en évidence les avantages et les limitations de ces méthodes. Enfin, nous présenterons les résultats de nos simulations et discuterons de leur pertinence pour la conception et l'optimisation de dispositifs plasmoniques

Chapitre

I

# **Généralités sur les Plasmoniques**

## **I.1. Introduction**

Depuis dernières années, l'intérêt de la communauté scientifique envers les matériaux plasmoniques n'a cessé de croître. En effet, cette popularité des structures plasmoniques est dû à leurs nombreuses applications dans divers domaines de nanotechnologies et de nanosciences. Les matériaux plasmoniques sont notamment utilisés pour des études théoriques de l'interaction lumière-métal, en tant que biocapteur pour des diagnostics médicaux ou thérapeutiques dans les circuits photoniques et dans les cellules solaires. Les plasmons de surface sont des ondes électromagnétiques associées à une oscillation collective des électrons du plasma d'électrons libres à la surface d'un métal.

Le phénomène de la résonance des plasmons a joué un rôle primordial dans le développement de la technologie émergente plasmonique. Ceci est dû à la propriété singulière des plasmons de surface de confiner la lumière à l'interface entre un métal et un diélectrique.

L'objectif de ce chapitre est de fournir les connaissances de base sur le domaine plasmonique. Nous étudierons l'histoire de plasmon, les différents types des plasmons, sont propriétés, résonance plasmon de surface. Nous dériverons ensuite la relation de dispersion des plasmons de surface ainsi que la relation de couplage plasmon-lumière

## **I.2. Historique**

Tout d'abord, le phénomène des plasmons de surface fut observé pour la première fois en 1902 par Wood [1], ce dernier constata que l'excitation d'un réseau de diffraction métallique avec de la lumière polarisée génère par réflexion un patron ayant des bandes sombres et lumineuses. Cependant, Wood n'a pu trouver d'explications à ce phénomène et décida de le qualifier d'anomalie.

Quelques années plus tard, en 1907, Lord Rayleigh tenta d'élucider ce phénomène optique avec sa théorie dynamique des réseaux de diffractions [2], Rayleigh détermina que les longueurs d'onde émises par le réseau de diffraction concordaient avec les anomalies de Wood.

Dans les années 1950, Pines décrit théoriquement la perte d'énergie des électrons traversant un film métallique [3], Pines et Böhm attribuent cette perte d'énergie à l'excitation des électrons de la bande de conduction du métal générant un plasma d'oscillation qu'ils qualifient de plasmons [3 ,4]. Par la suite, des études ont démontré que les modes plasmoniques existaient à proximité de la surface du métal et que la présence de contaminants affectait l'oscillation du plasma d'électrons [5 ,6], c'est en 1968 qu'une interprétation complète du phénomène de résonance des plasmons de surface fut établie par Otto [7]. Au même moment, Kretschmann et Raether décrivent l'excitation de SP par réflectance totale atténuée à l'aide d'instrumentation optique. D'ailleurs, que ce soit en recherche ou en industrie [8], la majorité des instruments SPR sont basés sur la configuration de type Kretschmann. Ainsi, le premier exemple de bioanalyse basé sur le concept de la SPR fut réalisé en 1983 par Nylander et Liedberg [9].

## **I.3. plasmons**

Plasmonique est l'interaction résonante obtenue dans certaines conditions entre le rayonnement électromagnétique (la lumière) et les électrons libres à l'interface entre un métal et un matériau diélectrique. Cette interaction génère des ondes de densité électronique appelées plasmons ou plasmons de surface [19]. Dans la littérature, on distingue différents types de plasmons, à savoir les plasmons de volume, de surface (localisés et délocalisés).

### **I.3.1. plasmons de volume**

Les plasmons de volume sont des oscillations de plasma quantifiées dans le volume d'un métal. Ces oscillations sont dues à l'existence de fluctuations spatiales et temporelles de

la densité moyenne des charges dans le métal. Le quantum d'énergie associé à une oscillation élémentaire et qui constitue le plasmon de volume est défini par l'équation :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

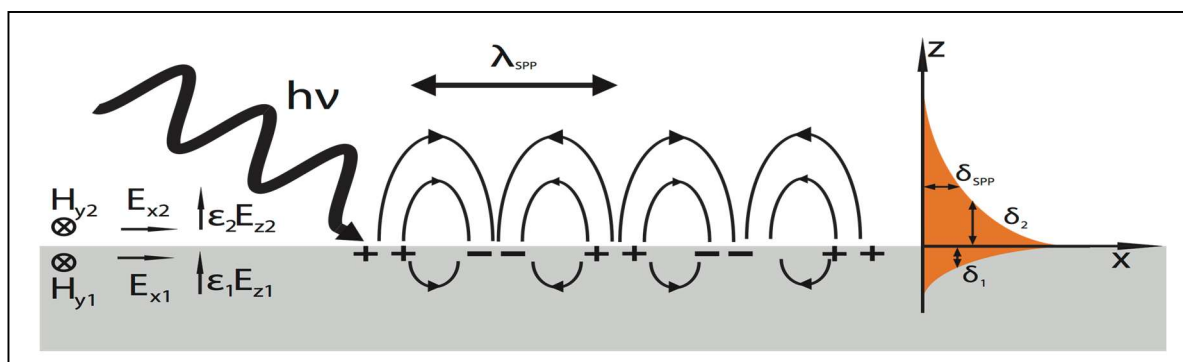
Où  $n_e$  est la densité de charge,  $e$  la charge élémentaire d'un électron,  $m_e$  est la masse effective des électrons, et  $\epsilon_0$  la permittivité diélectrique du vide .

Les plasmons de volume peuvent être exécutés lorsqu'un électron traverse un film mince métallique ou se réfléchit sur ce film, mais ne peuvent se coupler avec la lumière

### I.3.2. Plasmons de surface

Le plasmon de surface est une onde électromagnétique guidée à la surface d'un métal. Elle se propage partiellement dans le métal (l'onde y pénètre à une profondeur de 25 nm typiquement pour les métaux nobles). Le plasmon de surface étant un mode guidé, se propageant le long d'une interface plane, il ne peut pas être excité simplement par un faisceau de lumière incident. Il faut utiliser un coupleur (à prisme ou à réseau).

Le plasmon de surface doit son nom au fait que le gaz d'électrons libres contenu dans le métal fait qu'on peut décrire la réponse du métal comme celle d'un plasma, un gaz d'électrons et de noyaux atomiques. Il faut cependant noter que le plasmon de surface est une onde électromagnétique transverse (comme la lumière) et que ce n'est donc pas à proprement parler un plasmon de volume (l'onde longitudinale capable de se propager dans les plasmas).



**Figure I.1.** Représentation schématique d'une onde de densité électronique se propageant le long d'une interface métal-diélectrique

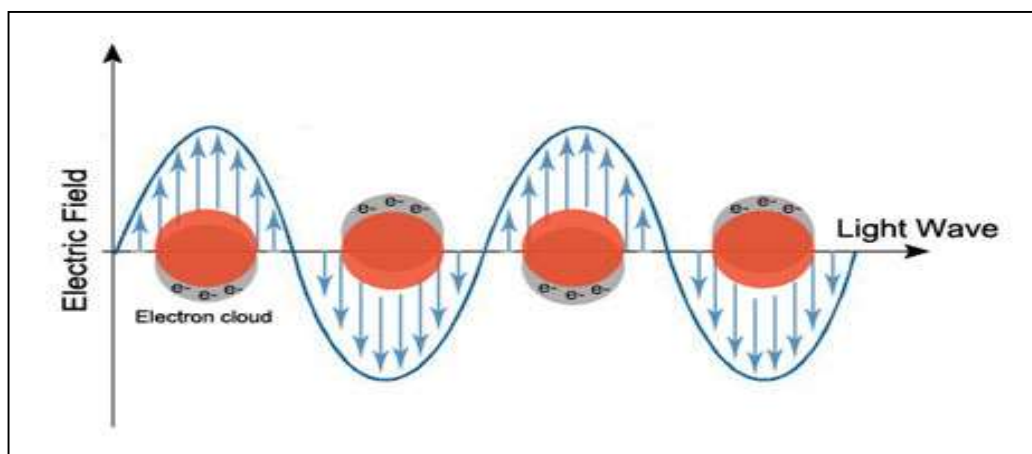
a il existe deux types de plasmon de surfaces :

### I.3.2.1. Les plasmons de surfaces délocalisés

PS délocalisés sont générés à l'interface des films métalliques lisses. ils sont dits « non radiatifs » car ils ne peuvent se coupler spontanément avec une onde électromagnétique. Il sera alors nécessaire d'utiliser un « coupleur »

### I.3.2.2. Plasmon de surface localisé

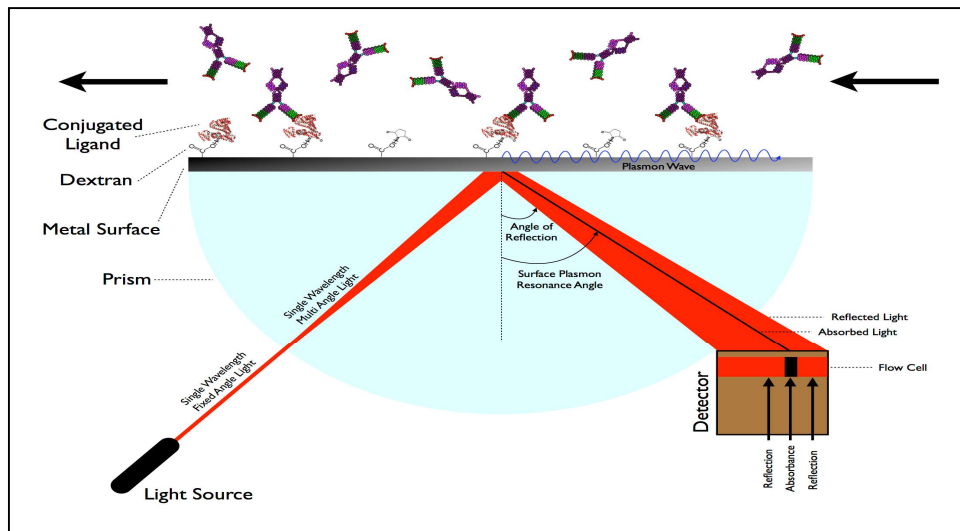
Plasmon de surface localisé est le résultat du confinement d'un plasmon de surface dans une nanoparticule de taille comparable ou inférieure à la longueur d'onde de la lumière utilisée pour exciter le plasmon. Lorsqu'une petite nanoparticule métallique sphérique est irradiée par la lumière, le champ électrique oscillant fait osciller de manière cohérente les électrons de conduction. Lorsque le nuage d'électrons est déplacé par rapport à sa position d'origine, une force de restauration résulte de l'attraction coulombienne entre les électrons et les noyaux. Cette force fait osciller le nuage d'électrons. La fréquence d'oscillation est déterminée par la densité d'électrons, la masse effective d'électrons, ainsi que la taille et la forme de la distribution de charge<sup>1</sup>. Le LSP a deux effets importants : les champs électriques près de la surface de la particule sont considérablement améliorés et l'absorption optique de la particule est maximale à la fréquence de résonance du plasmon. La résonance plasmon de surface peut également être réglée en fonction de la forme de la nanoparticule<sup>1</sup>. La fréquence du plasmon peut être liée à la constante diélectrique du métal<sup>1</sup>. L'amélioration diminue rapidement avec la distance de la surface et, pour les nanoparticules de métaux nobles, la résonance se produit aux longueurs d'onde visibles.



**Figure I.2:** Schéma du phénomène de résonance des plasmons de surface localisés

## I.4. Résonance plasmon de surface

La résonance des plasmons de surface (SPR) est un phénomène physique d'interaction lumière-matière principalement connu pour son utilisation comme méthode de mesure de la liaison d'un « ligand » sur un « récepteur » adsorbé à la surface d'une couche métallique.



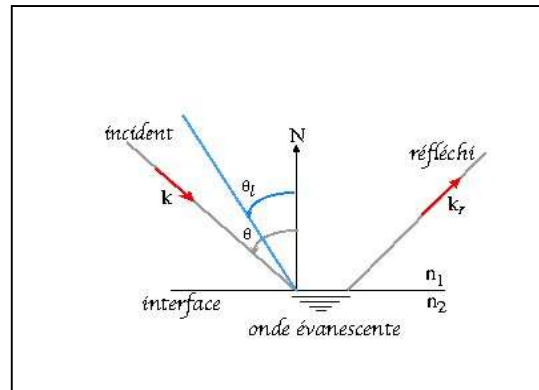
**Figure I.3:** Résonance plasmonique de surface (SPR)

La résonance de plasmons de surface est une oscillation de densité de charges pouvant exister à l'interface entre deux milieux ou matériaux ayant des constantes diélectriques de signes opposés comme un conducteur immergé dans un liquide diélectrique<sup>1</sup>. Dans le cas d'un conducteur, les électrons libres (couche de valence) constituent un gaz (plasma) à sa surface. Son oscillation peut être décrite par une onde ayant un maximum au niveau de l'interface avec le diélectrique et décroissante de façon exponentielle (évanescence) dans les deux milieux. Ces plasmons de surface peuvent être mis en résonance à l'aide d'une onde électromagnétique remplissant certains critères comme la longueur d'onde<sup>2</sup> par rapport à la taille de la structure métallique

### I.4.1. Principe

La résonance de plasmons de surface est un phénomène quantique opto électrique résultant de l'interaction de la lumière avec une surface métallique. Dans certaines conditions, l'énergie apportée par des photons est transférée aux plasmons. Le transfert d'énergie se produit seulement à une longueur d'onde spécifique de résonance, c'est à dire la longueur

d'onde où la composante tangentielle du vecteur d'onde des photons est exactement égale au vecteur d'onde des plasmons de surface ( $k_x = k_{sp}$ ). Une conséquence énergétique de cette résonance est visible dans le faisceau réfléchi qui présente une chute d'intensité à l'angle de résonance si la détection se fait par interrogation angulaire, ou bien à la longueur d'onde de résonance si elle se fait par modulation de la longueur d'onde de la lumière incidente [11].



**Figure I.4 :** La formation de l'onde évanescente

Quand un rayon de lumière incident traverse un milieu d'indice  $n_1$  avec un angle  $\theta_1$  supérieur à l'angle critique  $\theta_c$ , le rayon lumineux ne pénètre pas dans le milieu d'indice optique  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ) pour être totalement réfléchi dans le milieu d'indice  $n_1$ , c'est la réflexion totale interne (TIR). De manière concomitante, une onde évanescente est créée et se propage à l'interface des deux milieux.

Pour un angle d'incidence  $\theta_1$  de TIR, et une longueur d'onde définie, le rayon incident apporte l'énergie qui va créer par la suite une onde évanescente capable de résonner avec l'onde électromagnétique du plasmon de surface. Par conséquent, l'absorption de cette énergie photonique engendrera une atténuation de l'intensité du rayon lumineux réfléchi. Cet angle est communément appelé « l'angle de résonance plasmonique ».

L'onde évanescente est le point central des mesures d'interactions. En effet, une perturbation de l'onde évanescente, consécutive à l'interaction de biomolécules sur la surface va induire une diminution de l'angle de résonance directement mesurable [12,13]. Deux stratégies sont alors envisageables (figure I .5). La première est de suivre les variations d'angle de résonance au cours du temps, il s'agit des systèmes basés sur la Résonance Plasmonique de Surface (SPR) dite «classique». La seconde approche est de travailler à angle fixe et de mesurer les variations de réflectivité induites par la variation d'angle au cours du temps, on parle alors de Résonance Plasmonique de Surface par imagerie (SPRi) [14].

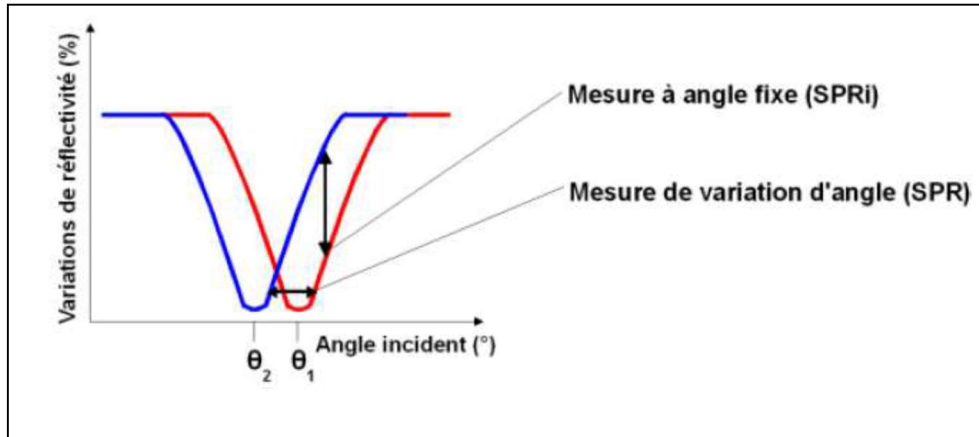


Figure I.5 : Relation entre angle de résonance et mesure du signal en SPR et SPRi

### I.5. Relation de dispersion des plasmons de surface

Les plasmons de surface délocalisés (PS) sont donc des ondes de surface se propageant à l'interface d'un milieu diélectrique, de constante relative positive  $\epsilon_s > 0$ , et d'un film métallique (non-magnétique) de constante diélectrique complexe  $\epsilon_m$  dont la partie réelle est négative dans le domaine visible [15].

Pour étudier les plasmons de surface, il est intéressant de tracer sur un graphe la fonction liant la pulsation du PS en fonction de son vecteur d'onde. En particulier, il est alors possible de prévoir les conditions de couplage avec la lumière par exemple, et d'en déduire les caractéristiques importantes de propagation de l'onde [16]. Nous pourrions montrer que le champ électromagnétique résultant d'une telle fluctuation, présente une décroissance exponentielle de part et d'autre de l'interface (Figure I.6).

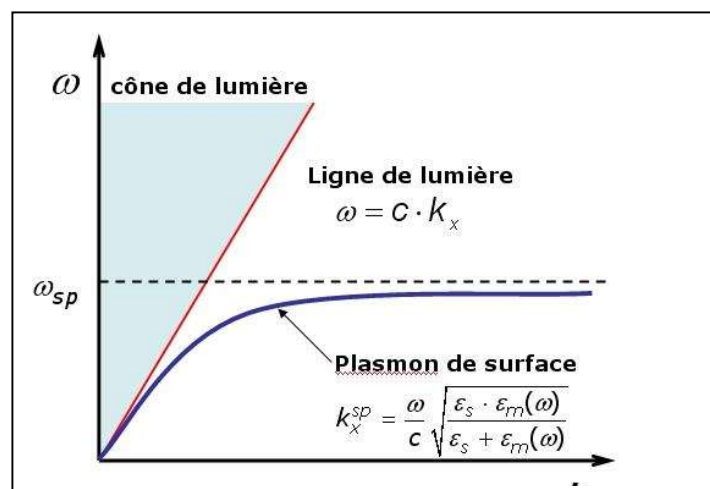


Figure I.6 : Relation de dispersion des plasmons de surface.

La **Figure I.6** montre que la courbe de dispersion des plasmons de surface se situe toujours « à droite » de la courbe dite ligne de lumière à laquelle correspond la relation de propagation de la lumière dans le vide  $k = \frac{\omega}{c}$ .

Nous remarquons que la relation de dispersion des plasmons de surface reste toujours strictement en dessous de la ligne de lumière (**Figure I.6**). Cette absence d'intersection entre la ligne de lumière et la courbe de dispersion des PS interdit tout couplage ou résonance entre une onde électromagnétique du domaine visible en particulier, et un mode de propagation des plasmons de surface.

### **I.6. Couplage optique en mode de réflexion totale atténuée**

Dans le couplage en mode de réflexion totale atténuée, on excite les SPS à une interface métal/diélectrique par un champ électromagnétique évanescent créé lorsqu'une réflexion interne totale d'une onde lumineuse progressive se produit. Deux types de configurations du multicouche sont possibles pour observer la résonance de plasmons de surface : la configuration proposée par Kretschmann-Raether et celle proposée par Otto, **Figure I.8**.

Dans la première configuration, une couche métallique est mise en contact avec un coupleur optique au choix (un prisme, un demi-cylindre, une fibre...) et dans la deuxième, cette couche et le coupleur sont séparés par un gap d'une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde. Le schéma du couplage optique et la structure de multicouches dans ces deux configurations sont donnés sur les **Figure I.7** et **Figure I.8**

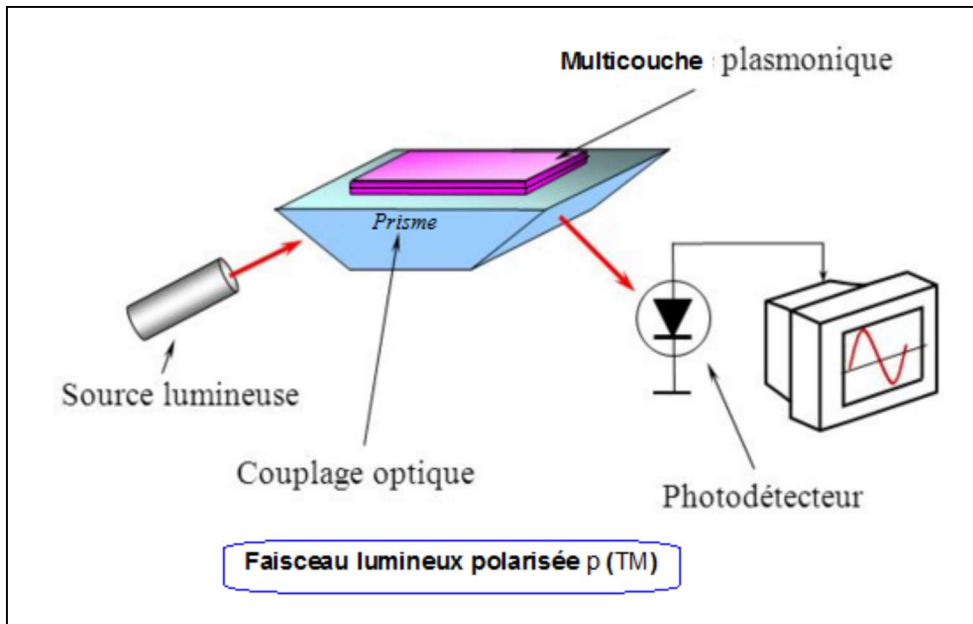


Figure I.7: Couplage optique par un prisme.

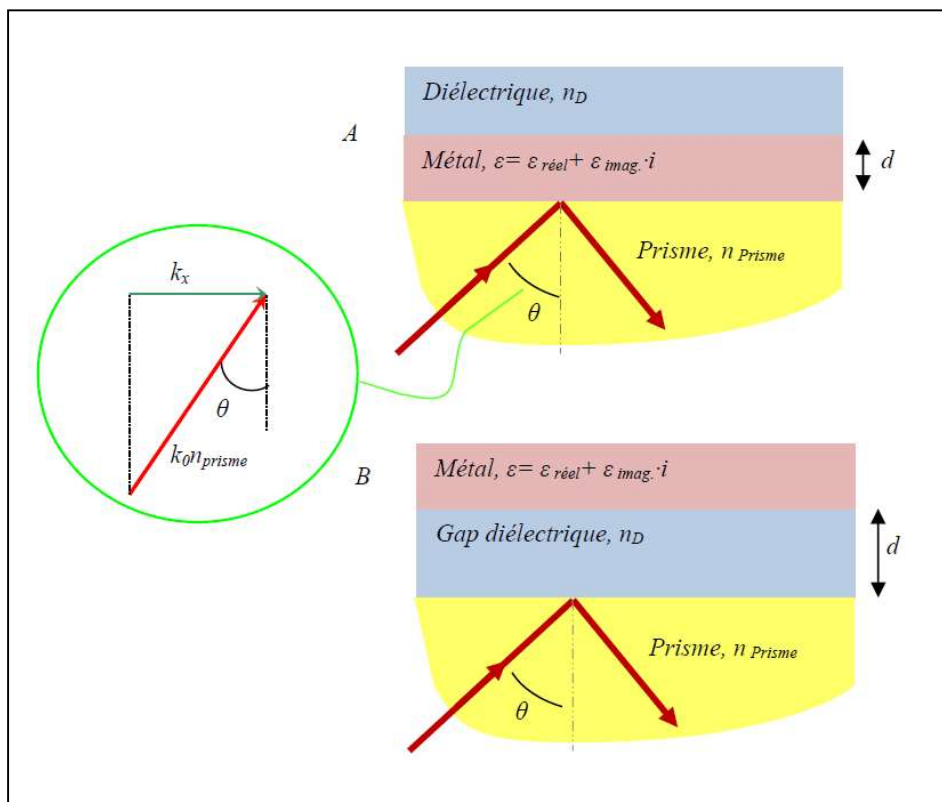
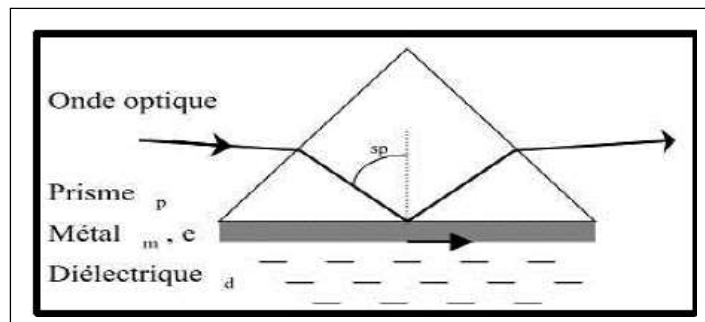


Figure I.8 : Structure du multicouche plasmonique : A- dans la configuration de Kretschmann-Raether ; B- dans la configuration d'Otto

### I 6.1 Couplage par prisme

La configuration de Kretschmann, utilisant un prisme pour réaliser le couplage est la géométrie la plus utilisée comme capteur à plasmon de surface **Figure I.9** et ce dispositif sera principalement détaillé. Dans cette configuration, la lumière incidente subit une réflexion totale à la base du prisme (méthode ATR - Attenuated Total Reflection) recouverte de la couche métallique. L'onde évanescente pénétrant la couche métallique permet d'exciter un plasmon de surface à l'interface métal/diélectrique extérieur. Sous certaines conditions d'accord de phase, cette onde génère des oscillations de plasma de surface qui créent le mode plasmon [17].



**Figure I.9** : Couplage par prisme (méthode ATR).

### I 6.2 Couplage par réseau de diffraction

Si l'interface métal/diélectrique est périodiquement déformée, l'onde optique incidente est diffractée sous différents angles suivant les caractéristiques du réseau de diffraction (indice, période, géométrie). Si l'indice effectif (ou constante de propagation) d'un des faisceaux diffractés est égal à celui d'un plasmon de surface, le couplage peut avoir lieu.

L'étude théorique de ce phénomène est plus complexe que celui décrit dans le cas d'un couplage par prisme. La géométrie donnant les meilleures performances est le réseau sinusoïdal. La période et l'amplitude du réseau déterminent la longueur d'onde de résonance. Le principal défaut d'une telle structure est que l'échantillon à analyser doit obligatoirement être optiquement transparent puisque l'onde lumineuse incidente passe à travers la cellule [18].

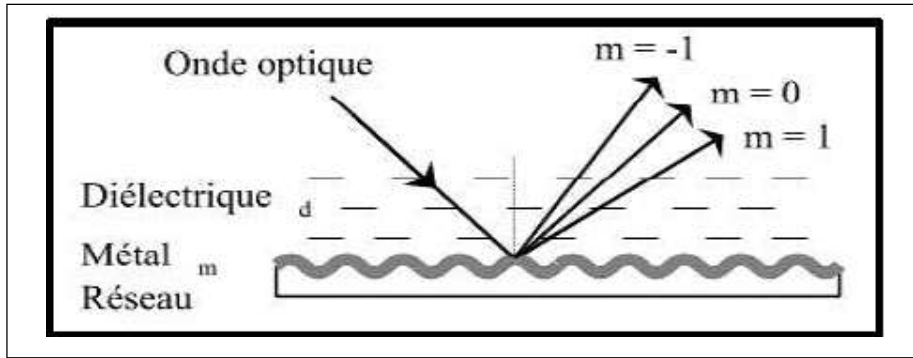


Figure I.10 : Couplage par réseau de diffraction.

### I 6.3. Couplage par ondes optiques guidées

Le processus d'excitation de l'onde plasmon est identique à celui se produisant dans le cas du couplage par prisme. L'onde optique guidée par réflexion totale peut générer une onde plasmon lorsque celle-ci est en contact avec l'interface métallique par pénétration de l'onde évanescente à travers le métal. Le guide d'onde joue le rôle du prisme.

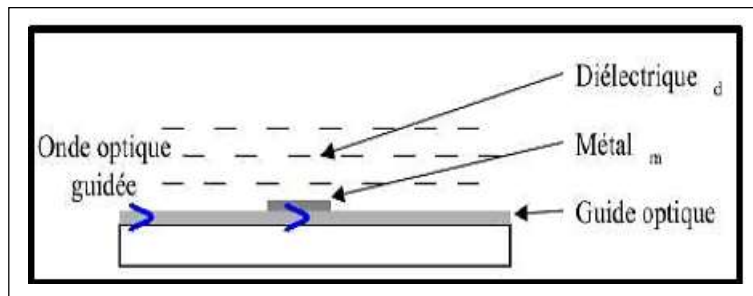


Figure I.11 : Couplage par un guide d'onde optique.

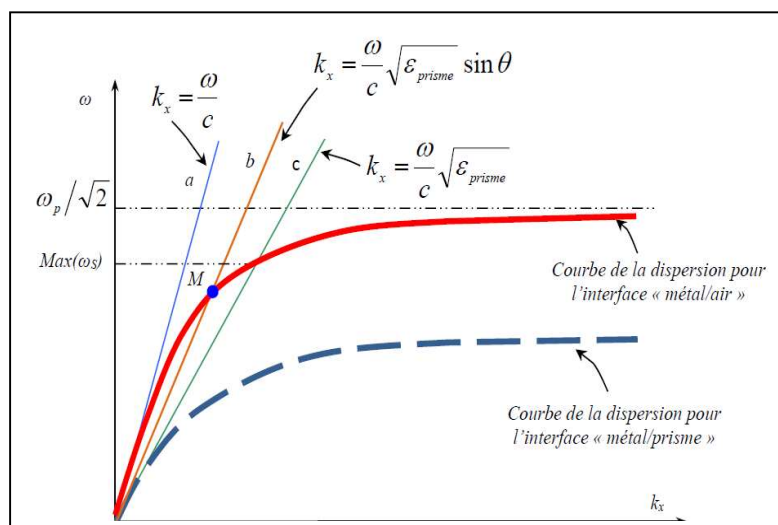


Figure I.12 : Principe de couplage optique.

Dans ces dispositifs, une onde lumineuse progressive polarisée  $\mathbf{p}$ , en passant à travers un prisme sous un angle d'incidence  $\theta$  supérieur à l'angle critique  $\theta_c$  du régime de réflexion intérieure totale, se transforme en une onde évanescente à l'interface métal/diélectrique. Si dans un multicouche plasmonique **FigureI.11** l'épaisseur de la couche adhérent au prisme est faible devant la profondeur de pénétration du champ, une excitation résonnante par cette onde évanescente devient possible. Ce phénomène a lieu pour un angle d'incidence, tel que deux courbes de dispersion se croisent (le point **M** sur la **FigureI.12**. Le SPR se traduit par un accroissement de l'efficacité du transfert d'énergie de l'onde lumineuse à SPs. Ce qui explique l'apparition d'un pic d'absorption sur le spectre angulaire de la réflectivité du multicouche. Notons qu'un bon choix de paramètres optiques du système permet même d'annuler sa réflectivité à un certain angle d'incidence.

## **I.7. Exemples d'application des plasmons de surface**

Les possibilités de concentrer, d'amplifier et de manipuler la lumière à l'échelle nanométrique à travers les plasmons de surface en font un sujet captivant dont les applications touchant divers domaines.

### **I.7.1. Biomédecine**

Les nanoparticules métalliques sont utilisées, par exemple, pour :

#### **a- La détection des séquences d'ADN en remplacement des colorants organiques fluorescents**

Contrairement à ces derniers, les nanoparticules métalliques présentent l'avantage de leur grande stabilité quel que soit l'environnement, mais aussi une détection plus aisée des organismes biologiques grâce à la grande section efficace d'extinction associée à leurs résonance plasmon de surface [19][20].

#### **b- L'étiquetage cellulaire**

Des nanoparticules sont fonctionnalisées avec des bio-molécules présentant une affinité pour certaines espèces cellulaires et sont ensuite introduites dans des cultures cellulaires. Cette technologie est particulièrement utile à l'identification des cellules cancéreuses. Non fonctionnalisées, les nanoparticules ont tendance à s'accumuler dans le

cytoplasme des cellules fournissant ainsi l'information d'étiquetage anatomique de cette dernière [19].

### **c- L'hyperthermie**

Des nanobâtonnets sont fonctionnalisés pour se lier avec des cellules malignes spécifiques, lorsque les tissus sont illuminés avec un laser à la fréquence de résonance plasmon de surface, l'énergie absorbée par les nanobâtonnets est partiellement convertie en chaleur ce qui anéantit la cellule visée [19].

### **d- L'administration des médicaments**

Le médicament est revêtu d'une enveloppe constituée d'un polymère sur lequel des nanoparticules d'or, fonctionnalisées du coté extérieur avec des anticorps pour les cellules spécifiques, reposent. Une fois que l'ensemble a atteint les cellules cibles, la région est irradiée avec une lumière à la fréquence de résonance plasmonique libérant ainsi le médicament à la région et à l'heure souhaitée [19].

## **I.7.2. Énergie solaire**

Des augmentations de 10 à 15% de l'efficacité des cellules photovoltaïques ont pu être obtenues en incorporant des nanoparticules d'or et d'argent dans les cellules solaires.

SP peuvent améliorer l'efficacité des cellules solaires en concentrant la lumière dans des couches minces de matériau photovoltaïque. Cela permet d'absorber plus efficacement la lumière et de générer plus de courant électrique

## **I.7.3. Technologie de l'information**

La taille nanométrique des plasmons de surface pose de nouvelles méthodes de manipulation de la lumière, de la lecture et de l'écriture d'informations dans des tailles significativement plus petites que la longueur d'onde.

Tandis que l'énorme section efficace d'absorption et de diffusion permet la détection de très petits signaux. Ainsi, les plasmons de surfaces peuvent être utilisés pour concevoir des antennes, des lentilles etc.

De plus, l'incorporation de nanoparticules métalliques dans les photo-détecteurs augmente leur efficacité et permet de réduire leur taille, donnant des appareils plus rapides avec une consommation d'énergie réduite [19].

#### **I.7.4. La diffusion Raman exaltée de surface (SERS : Surface Enhanced Raman Scattering)**

La spectroscopie Raman fournit une analyse détaillée de la structure chimique d'un objet. La section efficace de diffusion Raman d'un petit objet est souvent faible et son signal ne pourra être détecté sans utiliser un processus d'exaltation efficace de la diffusion.

L'amplification du champ électrique local suivant la résonance des plasmons de surface localisés est mise à profit pour mener des expériences en diffusion Raman exaltée de surface (SERS).

Cet effet se produit en présence de particules métalliques de rugosité particulière ou pour des petits agrégats métalliques, ce qui permet de détecter spécifiquement des espèces avec des concentrations extrêmement faibles [20].

#### **I.7.5. Exaltation de l'émission des OLED**

Il a été démontré que l'utilisation de nanoparticules métalliques présentant des résonances de plasmons de surface permet l'exaltation de l'émission spontanée du composé organique de la couche émettrice d'une OLED (Diode électroluminescente organique).

Certains travaux rapportent une augmentation de la luminescence des OLED par effet plasmonique d'un facteur 20 par rapport à une structure similaire sans nanoparticules NPs et une amélioration importante des caractéristiques optiques de l'OLED [21-22].

## I.8. Conclusion

À l'issue de ce premier chapitre nous avons présenté les notions de bases associées aux plasmoniques. Nous avons vu l'historique du plasmon et ses deux classes : la première classe est le plasmon de surface avec deux types : plasmon de surface localisé et délocalisé, et la deuxième classe est le plasmon de volume. Nous avons notamment introduit les propriétés de plasmons de surface comme étant des ondes de surface se propageant à l'interface entre un métal et un diélectrique. Ainsi que la résonance plasmon de surface. À la fin de ce chapitre, nous avons présenté les relations : de dispersion des plasmons de surface et de couplage plasmon-lumière.

Chapitre

# II



Filtre à base de plasmoniques

## II.1. Introduction

Ces dernières années, la plasmonique a été présentée comme une technologie d'avenir dans les circuits intégrés intégrant la compacité de l'électronique et la large bande passante créée par les réseaux optiques actuels [39]. Dans la région de l'optique intégrée, les guides d'ondes plasmoniques servent de composants pour guider les signaux optiques vers différentes parties des circuits. La capacité de confiner la lumière au-delà de la limite de diffraction et la capacité de fabriquer des appareils de dimensions inférieures à 100 nm ont promis une évolution dans les circuits optoélectroniques [40]. Afin de guider les ondes plasmoniques pour diverses applications, différentes géométries ont été proposées, telles que des guides d'ondes de polariton de plasmons de surface diélectriques[41], des substrats plasmoniques nanostructures pour une biosension optique améliorée[42], des diodes laser à réflecteur à anneau couplé accordable, grilles diélectriques sur surfaces métalliques plates [45], nano fils Metal-Insulator-Metal[46,47] , chaînes de nanoparticules[48,49] , rainures et cales [50,51], etc. Bien que certains de ces nano-guides ne soient pas pratiques à mettre en œuvre dans les circuits optiques[53,54], Les guides d'ondes MIM ont attiré une attention considérable en raison de la simplicité de fabrication et du confinement sur le terrain[55,56]. Au cours des dernières années, certaines structures simples ont été proposées pour les filtres plasmoniques[57], y compris les filtres de chute de canal avec résonateurs à disque[58], résonateurs à géométrie rectangulaire et résonateurs circulaires. En comparaison avec les structures complexes des réflecteurs Bragg[59,62], les structures susmentionnées peuvent être fabriquées beaucoup plus facilement. Deux types typiques de filtres plasmoniques dans les guides d'ondes MIM sont les filtres passe-bande et arrête-bande. Dans les filtres bande-arrêt, la majorité du spectre lumineux d'entrée est autorisée à passer à travers le filtre et seules plusieurs longueurs d'onde sont interdites de propagation dans la structure. Mais les filtres passe-bande ne laissent passer que des longueurs d'onde spécifiques et rejettent la majorité du spectre lumineux d'entrée[63]. L'une des caractéristiques les plus intéressantes des filtres est d'avoir des longueurs d'onde de résonance accordables. Dans les travaux précédents, en faisant varier les dimensions extérieures de la structure, c.-à-d. la longueur ou le rayon de la cavité, des filtres accordables ont été obtenus [64].

Le présent chapitre a pour objectif d'introduire les bases théoriques nécessaires à la compréhension dans un contexte général les notions générales des filtres optiques et ses différents types, puis nous présenterons les principes des filtres optiques a base plasmonique et les structure MIM, IMI, Enfin nous présenterons les résonateurs d'anneau et les cavités .

## II.2. Définition et rôle des filtres

Les filtres sont des dispositifs importants pour la sélection du canal et la séparation de signal dans les systèmes de communication moderne à large bande. Le rôle du filtre dans les systèmes est fondamental puisqu'il s'agit de débarrasser un signal utile de toutes les composantes parasites, qui peuvent être assimilées à du bruit. Ce bruit, très important dans les systèmes de télécommunications, peut provenir de sources diverses. Il peut être externe, c'est-à-dire, apporté par le canal, ou interne, apporté par les éléments passifs et actifs constitutifs du système lui-même. Le rapport signal à bruit, qui définit le rapport de la puissance du signal utile sur celle du bruit, est donc un paramètre essentiel dans les systèmes. D'un autre point de vue, les signaux émis et reçus sont parasites les uns par rapport aux autres, et de ce fait, une bonne séparation de ces signaux est nécessaire.

### II.2.1. Filtre active

Les dispositifs de filtrage ont la propriété de transmettre des fréquences sélectives. Ils transmettent l'énergie sur une ou plusieurs bandes passantes et atténuent l'énergie dans une ou plusieurs bandes. Les filtres peuvent être classés, selon les positions de leurs bandes passantes et leurs bandes atténuées, en quatre catégories : les filtres passe-bas, passe-haut, passe-bande et coupe bande [21]

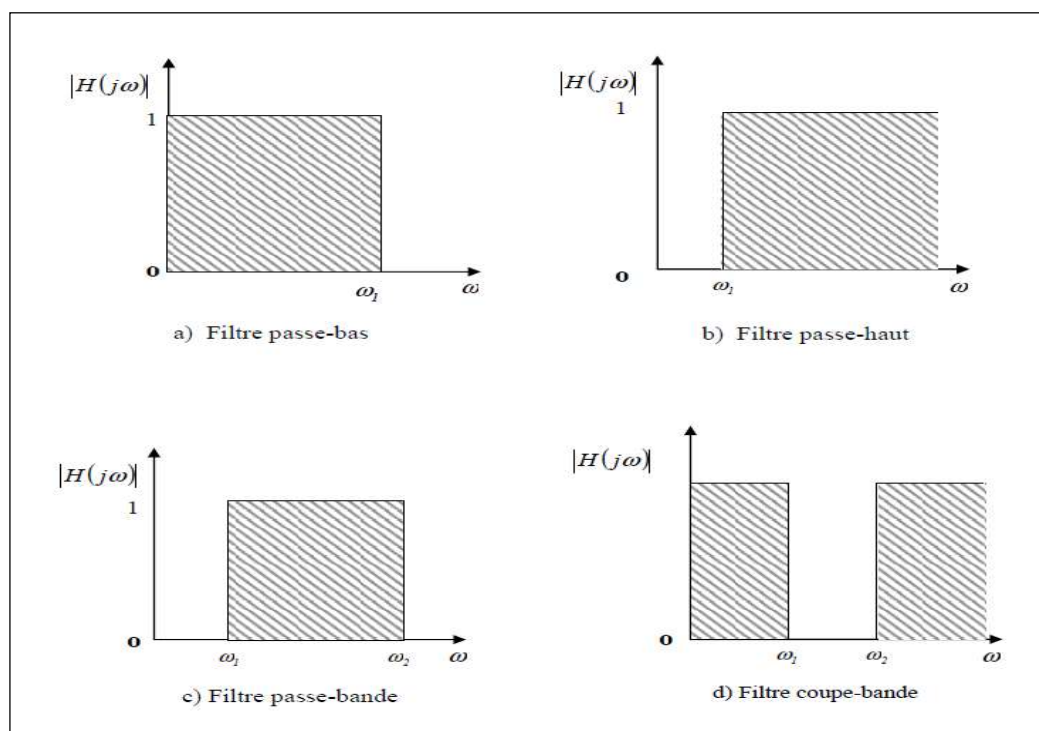


Figure II.1 : Gabarit des filtres idéaux

**a. Filtre passe-bas actif :** ce type de filtre laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes fréquences. Il est souvent utilisé pour filtrer le bruit et les interférences hautes fréquences dans les signaux audio.

**b. Filtre passe-haut actif :** ce type de filtre laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences. Il est souvent utilisé pour éliminer les bruits de fond basse fréquence dans les signaux audio.

**c. Filtre passe-bande actif :** ce type de filtre laisse passer une plage de fréquences spécifique et atténue les autres. Il est souvent utilisé pour isoler une fréquence particulière dans un signal.

**e. filtre coupe-bande actif :** ce type de filtre atténue une plage de fréquences spécifique et laisse passer les autres. Il est souvent utilisé pour éliminer des fréquences spécifiques indésirables dans un signal.

**f. Filtre égaliseur actif :** ce type de filtre permet de modifier le spectre de fréquences d'un signal de manière sélective pour améliorer sa qualité sonore. Il est souvent utilisé pour ajuster les caractéristiques tonales des signaux audio

### II.2.2. Filtres passifs volumiques

L'utilisation principale des filtres volumiques concerne le filtrage à bande étroite. Ils sont principalement utilisés pour leurs performances électriques remarquables. Grâce à un fort coefficient de qualité à vide, leur réponse, en plus d'être très sélective dans la bande et avec de fortes réjections en dehors, présente très peu de pertes d'insertion. Les filtres volumiques sont classés en trois catégories : les filtres à guide d'ondes, à résonateurs diélectriques et à cavités métalliques[21].

#### II.2.2.1. Filtres à guides d'ondes

Les résonateurs en guides d'ondes sont des éléments utiles pour la conception des filtres puisqu'ils fournissent des facteurs de qualité à vide très élevés permettant à ces filtres d'obtenir des réponses très sélectives et présentant de faibles pertes. Ils possèdent une très grande réjection hors bande. Ils utilisent comme diélectrique l'air, dont les propriétés isolantes sont remarquables[21].

### II.2.2.2. Filtres à résonateurs diélectriques

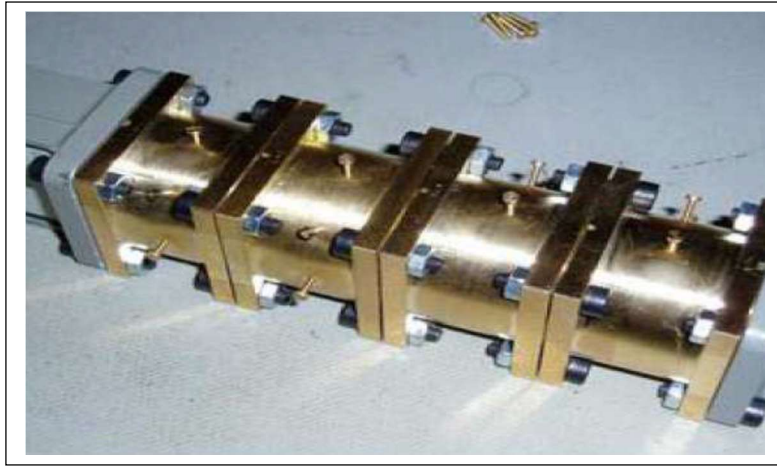
Les filtres à résonateurs diélectriques sont généralement réalisés grâce à des cavités chargées par des résonateurs diélectriques. Les résonateurs à forte constante diélectrique permettent de générer des filtres compacts en guides d'ondes à faibles pertes. Ils sont basés sur l'utilisation de résonateurs diélectriques de formes cylindriques et parallélépipédiques. Les cavités utilisées sont souvent réalisées en aluminium dont les parois internes sont argentées afin de réduire les pertes éventuelle [21].



Figure II.2: Filtre à résonateurs diélectriques

### II.2.2.3. Filtres à résonateurs métalliques

Ces filtres sont apparus au début des années 1940 . Afin de réduire leur poids, leur encombrement et améliorer leurs performances électriques, ils sont généralement utilisés suivant des modes duaux, grâce à la mise en oeuvre de cavités hyperfréquences cylindriques ou parallélépipédiques bi-modes. Ces modes duaux ont la particularité de présenter deux polarisations orthogonales à la même fréquence. On peut alors créer des filtres à  $2N$  pôles avec  $N$  résonateurs. Pour des besoins de réglages, il est nécessaire d'ajouter des vis afin de jouer mécaniquement sur les coefficients de couplage et d'accorder le filtre en fréquence[21] .



**Figure II.3:** Filtre à cavités métalliques cylindriques avec vis de réglage

### II.3. Filtre optique

Un filtre optique est un composant optique qui, une fois disposé sur le chemin optique d'un faisceau lumineux, sert à mettre en forme les caractéristiques spectrales de ce même faisceau. Le filtre peut avoir diverses fonctions comme être un miroir à haute réflexion jusqu'à 99,9% de réflexion sur une large bande spectrale ou faire office de filtre passe-haut ou passe-bas, ou encore séparer le faisceau en deux parts de même puissance. Pour arriver à ce résultat de mise en forme, on réalise le filtre optique avec des substrats et des empilements de couches minces de matériaux d'indices de réfraction différents. De nos jours, on retrouve les filtres optiques dans un grand nombre d'appareils, d'outils et de systèmes de mesure pour une multitude d'applications [22].

### II.4. Les filtres optiques à base plasmonique

Les guides d'ondes plasmoniques ont attiré beaucoup d'attention ces dernières années en raison de leur capacité à fournir un confinement optique sous-longueur d'onde résultant de la forte localisation des polaritons de plasmons de surface (SPP) aux interfaces métal-diélectriques [23, 24]. Certaines géométries prometteuses de guidage SPP comprennent les nanoparticules [25–26], les nanofils [27–28], les guides d'ondes métalliques diélectriques (MIM) [29–30], les rainures en V [31] et les cales [32]. Dans le cas des guides d'ondes MIM, leur capacité à soutenir les modes SPP avec des zones efficaces à l'échelle nanométrique

ouvre de nombreuses possibilités pour un large éventail d'applications, y compris les répartiteurs de puissance [33], les guides d'ondes en forme de U [34], les combineurs en forme de Y et les coupleurs de guide d'ondes [17, 18]. Pour cette raison, beaucoup d'efforts sont actuellement consacrés au développement de composants optiques basés sur des guides d'ondes MIM, semblables à ceux déjà disponibles aux fréquences micro-ondes et radio. En raison de leur taille compacte, ces composants sont prometteurs pour les futurs dispositifs requis pour l'optique intégrée à l'échelle nanométrique [35].

L'une des applications les plus difficiles des guides d'ondes MIM est le filtre optique à sélection de longueur d'onde (ou réflecteur), qui est mis en œuvre en couplant un ou plusieurs tronçons perpendiculaires à l'axe du guide d'onde. Le spectre de transmission de ces filtres peut être contrôlé en faisant varier le nombre de souches et/ou leurs paramètres tels que la longueur, la largeur et les positions [35].

Les filtres optiques basés sur un guide d'ondes MIM sont généralement modélisés en résolvant les équations de Maxwell avec le schéma de différence de temps finie (FDTD). Une autre façon de modéliser ces filtres est d'utiliser l'analogie entre les hétérostructures MIM et les lignes de transmission hyperfréquences. Cette analogie permet d'utiliser des outils d'analyse de réseau pour calculer la transmittance pour des géométries de filtre simples analytiquement. Étant donné que cette dernière méthode a été développée pour les guides d'ondes sans perte, elle est incapable de produire des résultats précis pour les guides d'ondes avec perte et doit donc être complétée par des paramètres calculés numériquement pour améliorer la précision. Étant donné que le calcul du spectre de transmission du filtre avec les méthodes actuelles prend du temps ou est inexact, il est difficile d'optimiser l'appareil. De toute évidence, une description purement analytique des filtres optiques à base de guide d'ondes MIM qui permet l'amortissement SPP sera d'une importance pratique considérable [35].

## II.5. résonateurs optiques

On définit un résonateur optique ou cavité optique comme un dispositif dans lequel certains rayons lumineux sont susceptibles de rester confinés grâce à des miroirs sur lesquels ils se réfléchissent. Ainsi, les résonateurs optiques comportent trois éléments essentiels, un milieu amplificateur de lumière, une cavité résonnante et un système de pompage.

Théoriquement, de nombreuses formes de filtres souhaitées peuvent être créées en utilisant plusieurs résonateurs en anneau couplés. Les étapes de filtrage décrites sont supposées être identiques dans leur comportement.

### II.5.1. Type des résonateurs optiques

Les résonateurs optiques sont des dispositifs utilisés en optique pour confiner la lumière dans un espace de petite taille et la faire résonner entre deux miroirs ou surfaces réfléchissantes. Les résonateurs optiques sont utilisés dans de nombreuses applications, telles que les lasers, les filtres optiques, les capteurs optiques, etc. Il existe plusieurs types de résonateurs optiques, dont voici les principaux [36] :

**a. Résonateurs Fabry-Perot :** ces résonateurs optiques consistent en deux miroirs parallèles séparés par une cavité, où la lumière peut résonner et former des franges d'interférence. Les résonateurs Fabry-Perot sont utilisés dans les lasers, les filtres optiques, les capteurs de longueur d'onde, etc.

**b. Résonateurs microcavités :** ces résonateurs optiques sont des structures en forme de disque, de sphère ou de cylindre, dans lesquelles la lumière peut résonner. Les résonateurs microcavités ont des propriétés optiques uniques et sont utilisés dans les lasers, les capteurs chimiques et biologiques, etc.

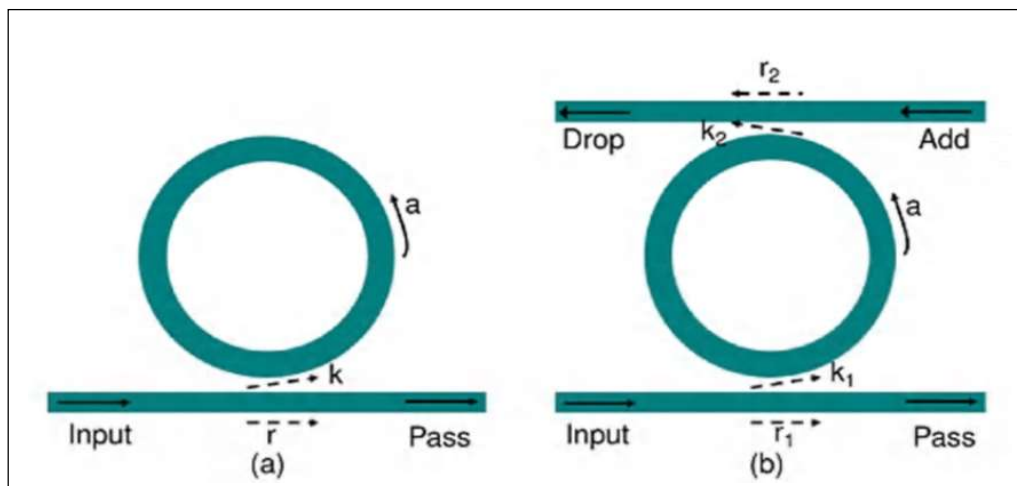
**c. Résonateurs à cristaux photoniques :** ces résonateurs optiques sont constitués de réseaux périodiques de microstructures, qui forment une bande interdite optique qui peut confiner la lumière. Les résonateurs à cristaux photoniques sont utilisés dans les filtres optiques, les capteurs optiques, les amplificateurs optiques, etc.

**d. Résonateurs à cavité optique haute-Q :** ces résonateurs optiques sont des cavités optiques à très haute qualité factorielle ( $Q$ ), ce qui signifie que la lumière peut y résonner pendant longtemps. Les résonateurs à cavité optique haute- $Q$  sont utilisés dans les lasers à faible seuil, les oscillateurs optiques, les horloges atomiques, etc.

Ces différents types de résonateurs optiques ont des propriétés optiques uniques qui peuvent être adaptées à une grande variété d'applications.

### c. Résonateur en anneau

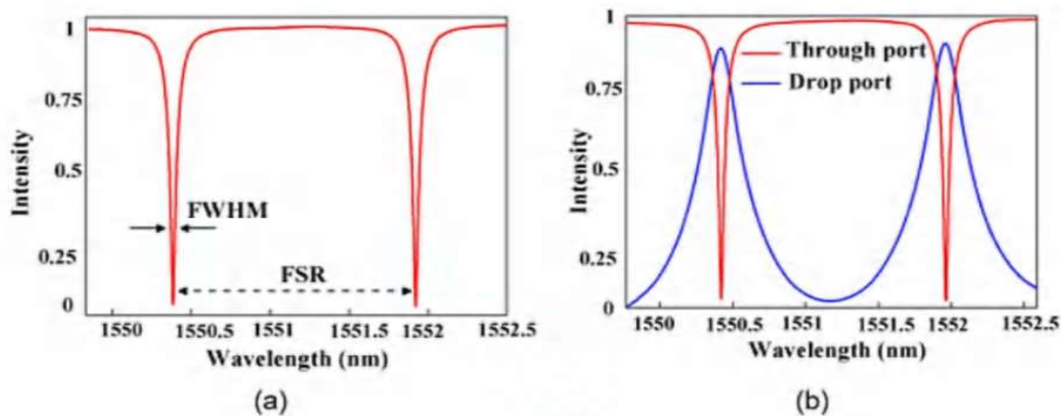
A partir de la littérature un résonateur en anneau est un dispositif constitué d'une cavité optique formée par un guide d'onde circulaire et un ou plusieurs guides d'onde disposés à proximité de celle-ci. Les résonateurs en anneau sont des dispositifs où la lumière pénètre dans ce résonateur avec des interférences constructives équidistantes. La fonction de transfert résultante peut être utilisée pour de nombreuses applications telles que le filtrage, le multiplexage en longueur d'onde WDM [37], et les modulateurs [38]. Les configurations de base, d'un résonateur en anneau peuvent être décrit en deux structures principales qui s'est appelée résonateur en anneau all-pass et add-drop comme illustré dans les **Figure II.4** (a) et (b) respectivement.



**Figure II.4 :** Configuration du résonateur en anneau (a) All-pass, (b) Add-drop

Le résonateur en anneau All-Pass est le résonateur de forme la plus simple qui permet le couplage unidirectionnel entre un résonateur en anneau de rayon  $R$  et un guide d'onde (**Figure II.4** (a)). Le guide d'onde typiquement rectiligne est rapproché de la cavité circulaire de manière à ce que lorsqu'une puissance optique est injectée dans le port d'entrée du dispositif, une partie du flux lumineux passe dans la cavité par couplage évanescent. La zone de proximité entre ce guide d'onde et la cavité est nommée coupleur et le ratio de puissance optique pénétrant dans la cavité est appelé coefficient de couplage noté  $k$ . Le flux lumineux dans la cavité est également couplé à son tour au guide d'onde rectiligne, ce qui crée à la sortie du dispositif un port Pass. Dans la deuxième configuration du résonateur en anneau

add-drop (**Figure II.4 (b)**), un deuxième guide d'onde est ajouté du côté opposé au premier, créant ainsi deux ports supplémentaires, communément appelés port Add et port Drop. A la sortie du port Drop, un phénomène d'interférences constructives se produit à certaines longueurs d'onde. Cette configuration peut donc être utilisée comme un filtre passe bande dans le but de démultiplexer les différentes porteuses optiques d'un système de transmission.



**Figure II.5 :**Exemple de spectre de transmission d'un résonateur en anneau (a) All-pass, (b) Add-drop.

### II.5.2 Caractéristique d'un résonateur en anneau

Les résonateurs en anneau peuvent être décrits par certains caractères important qui sont également généralement utilisés pour décrire les filtres optiques. a. Principe de fonctionnement Comme elle présente la **Figure II.6**, plusieurs longueurs d'onde entrées dans le terminal 1 seront partiellement couplées dans l'anneau via le coupleur 1. L'onde optique dans l'anneau sera partiellement couplée dans le guide d'ondes droit via le coupleur 2 et sortie du terminal 2.

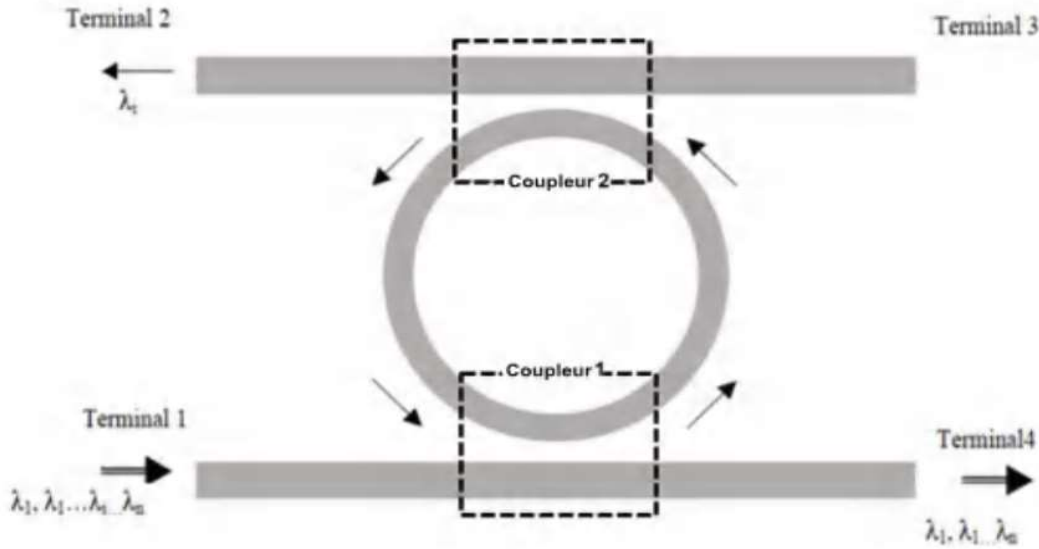


Figure II.6 : Principe de transmission dans résonateur en anneau.

Si la longueur d'onde, par exemple,  $\lambda_i$  satisfait la condition de résonance, les longueurs d'onde du mode de résonance sont donc données par :

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff} \times L}{m}$$

Le couplage de l'onde avec la longueur d'onde,  $\lambda_i$  sera renforcé et tous les autres seront supprimés. En conséquence, seul,  $\lambda_i$  sera supprimé du terminal 2, tandis que le reste des longueurs d'onde traversera et sortira du terminal 4. Ici,  $n_{eff}$  est l'indice effectif du guide d'ondes de flexion, L est la longueur de l'anneau et m est un entier.

Un autre paramètre important est la largeur de résonance, qui est définie comme la largeur totale à mi-hauteur FWHM (the full-width at half-maximum) de bande de la ligne de résonance. La largeur à mi-hauteur peut être déduite à travers le spectre de résonance et qui est inversement proportionnelle à son facteur de qualité noté Q.

$$FWHM = \frac{\lambda_{res}}{Q}$$

Pour un filtre à base d'un résonateur en anneau, le paramètre permettant de quantifier l'acuité de la résonance est le facteur de qualité Q, ce paramètre a une propriété importante pour décrire ses performances, il est défini comme la mesure universelle de la capacité d'un résonateur à conserver l'énergie. La durée de vie  $\tau_{PH}$  des photons à l'intérieur du micro-

résonateur est très élevée, cette durée de vie est liée à la notion de facteur de qualité  $Q$  de la cavité par la relation

$$Q = \omega \cdot \tau_{ph}$$

Avec  $\omega$  la pulsation du champ considéré. Une interprétation énergétique de  $Q$  est également possible : il s'agit du rapport entre l'énergie moyenne  $E$  dans le mode résonant et de l'énergie  $\Delta E$  dissipée dans ce même mode sur une période d'oscillation près à  $2\pi$  :

$$Q = 2\pi \cdot \frac{E}{\Delta E}$$

Cette interprétation énergétique nous permet de définir  $\tau_{ph}$  comme étant la durée caractéristique d'amortissement de l'énergie à l'intérieur de la cavité. Si nous considérons  $\Delta\omega$  la largeur de la résonance à la pulsation  $\omega$ , le facteur de qualité s'écrit également :

Dans le cas idéal d'un résonateur sans perte, la durée de vie et par conséquent  $Q$  seraient quasiment infinis. Ceci correspondrait à une résonance infiniment fine

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

## II.6 le guide d'onde MIM

Un guide d'onde MIM (Métal-Isolant-Métal) est une structure utilisée en photonique pour guider et contrôler la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique. Il est composé de deux couches métalliques séparées par une couche isolante. Le guide d'onde MIM tire parti de l'excitation des plasmons de surface localisés à l'interface entre les couches métalliques et l'isolant[64].

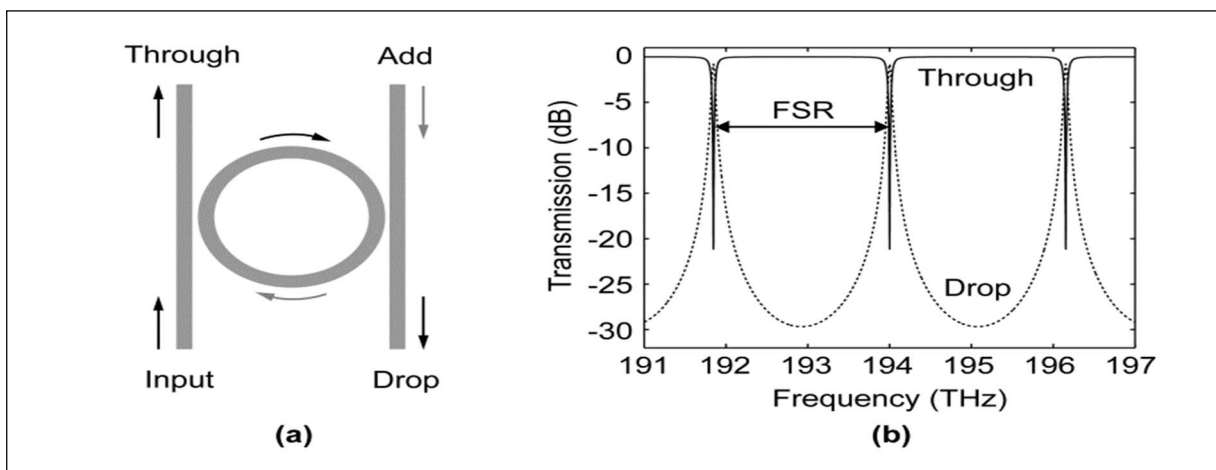
Lorsque la lumière est incidente sur le guide d'onde MIM, elle peut être confinée dans la couche isolante en raison de l'effet tunnel quantique entre les couches métalliques. Ce confinement permet de contrôler les propriétés de transmission, réflexion et réfraction de la lumière à des échelles sub-longueur d'onde.

Les guides d'onde MIM présentent des avantages tels qu'une faible perte d'énergie, une haute résolution spatiale et une large bande passante. Ils sont largement utilisés dans les dispositifs optiques intégrés, tels que les filtres[65], les modulateurs, les détecteurs, et les composants de guidage de lumière à l'échelle nanométrique.

## II.7 Filtre à base d'un résonateur en anneau de type Add/Drop

Le filtre à résonateur en anneau de type Add/Drop (ADF) est l'un des composants requis pour la possibilité d'ajouter ou de supprimer un ou plusieurs canaux d'une longueur d'onde d'un signal multiplexé, ce traitement est une fonction essentielle dans les réseaux optiques[26]. Le principe de fonctionnement est basé sur l'utilisation d'un résonateur optique en anneau, qui est un dispositif optique constitué d'une boucle de fibre optique dans laquelle la lumière circule en boucle fermée. Le résonateur est conçu pour avoir une résonance à une longueur d'onde particulière, appelée longueur d'onde de résonance.

Lorsqu'une source de lumière est couplée au résonateur, la lumière est réfléchi à l'intérieur du résonateur jusqu'à ce qu'elle atteigne la longueur d'onde de résonance. À ce stade, une partie de la lumière est "accrochée" par le résonateur et continue de circuler en boucle fermée **Figure II.7**, tandis que le reste de la lumière continue son chemin à travers la fibre [66].



**Figure II.7 :** (a) Schéma d'un filtre add-drop à micro résonateur. (b) Réponse spectrale d'un seul résonateur à microring. La distance spectrale entre les résonances est appelée plage spectrale libre (FSR).

Le dispositif peut être utilisé pour filtrer une longueur d'onde spécifique de la source lumineuse en la "déviant" du reste de la lumière. Cela se fait en ajoutant un élément de couplage à la boucle, appelé un coupleur en Y, qui permet de coupler une partie de la lumière circulant dans la boucle vers une autre fibre optique. Cette lumière couplée est la "goutte" (drop) et peut être utilisée pour une autre application ou pour la mesure.

Le reste de la lumière qui n'est pas couplée est l'ajout (add) et continue son chemin à travers la fibre. En modifiant les caractéristiques du résonateur, telles que la longueur de la fibre ou la forme de la boucle, il est possible de définir les longueurs d'onde de résonance et donc les longueurs d'onde de déviation et de laisser passer.

Les filtres Add/Drop peuvent être utilisés dans une variété d'applications optiques, notamment en télécommunications pour la multiplexage optique en longueur d'onde, en spectroscopie pour la mesure de la densité optique et en microscopie pour la sélection de longueur d'onde.

## **II.8. Conclusion**

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté les concepts de base liés aux filtres optiques ainsi que ses différents types. Pour ce faire, nous avons présenté les filtres optiques à base plasmonique et nous sommes concentrés sur les structures MIM. Enfin, nous avons parlé des résonateurs en anneau où il est considéré comme des composants optiques essentiels dans plusieurs domaines dans ce chapitre par leurs applications dans le domaine de télécommunication comme le filtrage des signaux optiques.

Chapter

# III

Résultats et interprétations

### **III .1 Introduction**

Le domaine de la photonique et de la plasmonique offre la possibilité de contrôler la propagation de la lumière à des échelles proches de la longueur d'onde dans le matériau. Parmi les domaines de recherche les plus récents qui exploitent les propriétés des plasmons de surface, on trouve celui des filtres optiques. Ce domaine de recherche est extrêmement prometteur en raison de sa capacité à miniaturiser les dispositifs et à offrir une sélectivité élevée. Les filtres optiques permettent de séparer un canal optique du signal combiné sans recourir à l'électronique.

Alors dans le 3ème chapitre nous avons proposé un filtre plasmonique de type coupe bande en utilisant le logiciel de simulation Rsoft , basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel(FDTD).

## III.2 Outil de la simulation

### III.2.1 Logiciel Rsoft CAD

RSoft CAD est le programme de base de RSoft Photonics Suite et sert de programme de contrôle pour les modules de simulation de périphériques passifs BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD de RSoft. Il est utilisé pour définir l'entrée la plus importante requise par ces modules de simulation: les propriétés du matériau et la géométrie de structure d'un dispositif photonique. Un utilisateur doit généralement d'abord concevoir une structure dans l'interface CAO, puis utiliser un ou plusieurs modules de simulation pour modéliser divers aspects de la performance du périphérique [67].

### III.2.2 .Modules de simulation associés

#### III.2.2.2 Simulateur FullWAVE

Il s'agit d'un module intégré dans le logiciel développé par l'entreprise RSoft, basé sur FDTD [42], ce module nous permet d'étudier la propagation de la lumière pour une grande variété de structures photoniques et plasmoniques ainsi que le calcul du facteur de qualité de n'importe quelles cavités aux structures photoniques et plasmoniques. Il est entièrement intégré dans l'environnement Rsoft CAD qui permet à l'utilisateur de définir les propriétés des matériaux et la géométrie de la structure de tout dispositif plasmonique. Le module FullWAVE peut modéliser avec précision des matériaux diélectriques et magnétiques, aussi bien que les matériaux anisotropes, dispersifs, et non linéaires [68], l'utilisation de ce module nécessite de définir les matériaux qui composent la structure à l'aide de la permittivité électrique.

Un élément clé d'une simulation FullWAVE est le champ exciteur (launch field) de la structure. L'excitation doit être bien choisie pour correspondre au type de résultats de simulation requis. Par exemple, une excitation CW (Continuous Wave) doit être utilisée lorsque le fonctionnement en régime permanent d'une structure est souhaité, et un signal pulsé peut être envisagée lorsque les caractéristiques spectrales d'une structure sont nécessaires. Le champ exciteur est défini via une boîte de dialogue des paramètres de lancement auxquels on peut accéder par l'intermédiaire du bouton « Edit Launch Field » dans l'interface CAD [69].

### III.2.3 Méthode des différences finies temporelles (FDTD)

FDTD est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel [70], elle utilise l'outil numérique des différences finies. La méthode FDTD a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966 ; Cette méthode de calcul effectuée dans le domaine temporel permet de visualiser la propagation de l'onde dans des milieux structurés[71] . Cette méthode permet à l'utilisateur de développer une compréhension plus intuitive des processus de propagation. Elle permet aussi d'obtenir de nombreuses informations sur la propagation de l'onde dans la structure[72]. Dans ce travail, nous utilisons la méthode FDTD pour étudier la propagation de la lumière dans le guide plasmonique[73].

#### III .2.3.1 Principe de base de la méthode

Le principe de base de la méthode FDTD consiste à discrétiser l'espace en un maillage régulier et à approximer les dérivées temporelles et spatiales des équations aux dérivées partielles par des différences finies. Ensuite, les valeurs des champs électromagnétiques sont mises à jour itérativement dans le temps, en utilisant les équations de base de l'électromagnétisme, telles que les équations de Maxwell. Pour appliquer la méthode FDTD, on divise l'espace en cellules cubiques ou rectangulaires et on définit les valeurs des champs électromagnétiques (champ électrique et champ magnétique) à l'intérieur de chaque cellule. Les dérivées spatiales sont approximées par des différences finies centrées, ce qui permet de représenter la variation des champs à travers les cellules voisines. Les dérivées temporelles sont approximées par une différence finie avant ou arrière, selon la direction de la propagation des ondes. Une fois que les valeurs des champs électromagnétiques sont définies dans chaque cellule, les équations de Maxwell sont utilisées pour mettre à jour ces valeurs dans le temps. Les composantes des champs électromagnétiques à un certain moment dans le temps dépendent des valeurs des champs à des moments précédents, ce qui permet de représenter la propagation des ondes dans l'espace.

### III.3 Les étapes de simulation d'un guide d'onde

L'écran principale le logiciel Rsoft CAD (Figure II.8) comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, qui permet l'accès aux divers dossiers standards et les opérations d'édition, une barre d'outils qui porte plusieurs différentes commandes comme créé,

sauvegarder et une barre d'état, qui fournit des informations sur le mode courant de disposition, avec l'affichage du même rang pendant le dessin.

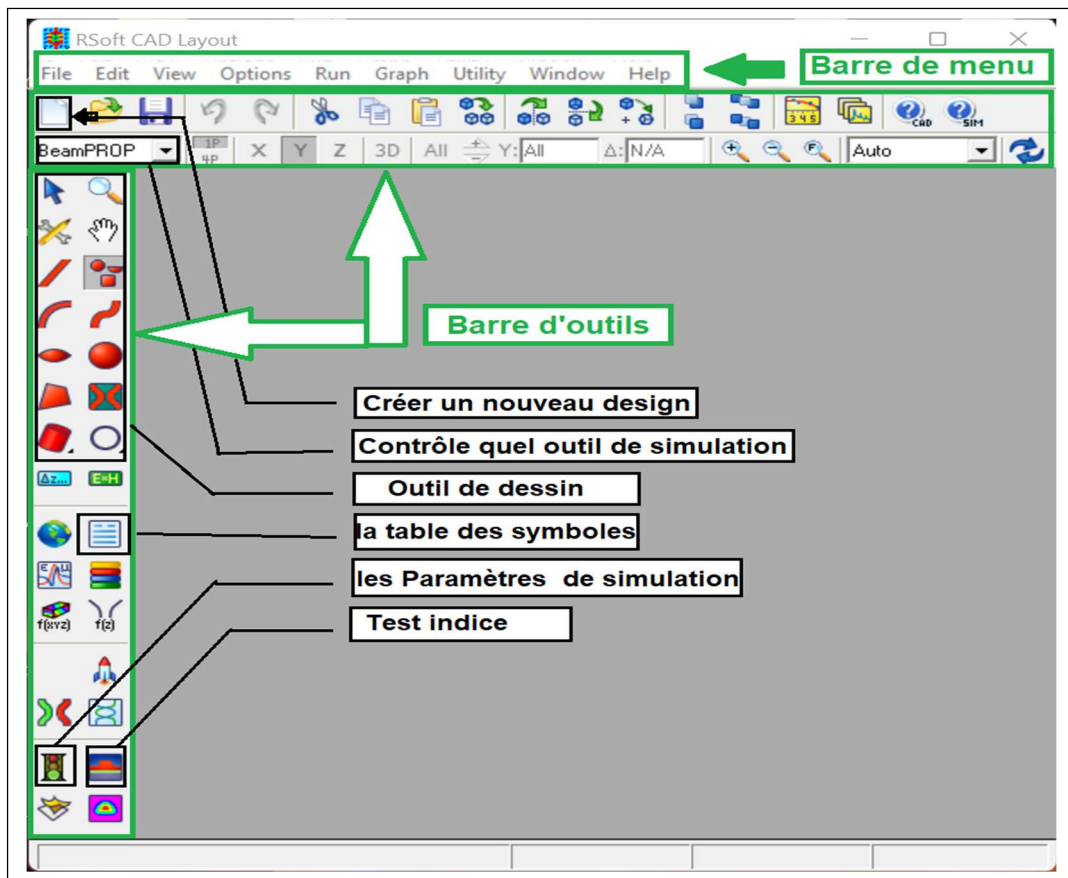
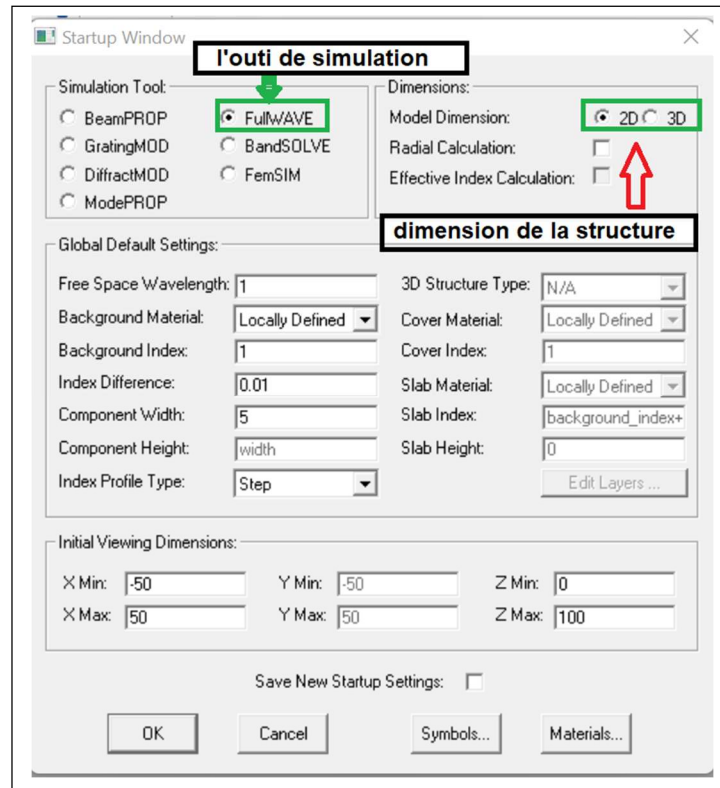


Figure III .1 : Écran principal de RSOFTEAD

### III.3.1 Créer un nouveau circuit

Pour créer un circuit, vous avez deux options. La première consiste à cliquer sur l'icône "Nouveau circuit" située dans la barre d'outils supérieure. Alternativement, vous pouvez sélectionner "Fichier / Nouveau" dans le menu. Une fois que vous avez effectué l'une de ces actions, une boîte de dialogue de démarrage apparaîtra, comme illustré dans la Figure 2. Cette boîte de dialogue vous demande de fournir des informations de base sur le circuit que vous souhaitez modéliser, ainsi que le module de simulation à utiliser.



*Figure III.2: La fenêtre de démarrage où les informations de base de la structure sont définies.*

Veillez saisir les informations affichées dans la Figure III.2, puis cliquez sur OK pour continuer.

À ce stade, une fenêtre de mise en page est créée dans la fenêtre principale du programme de CAD, comme illustré dans la Figure III.3

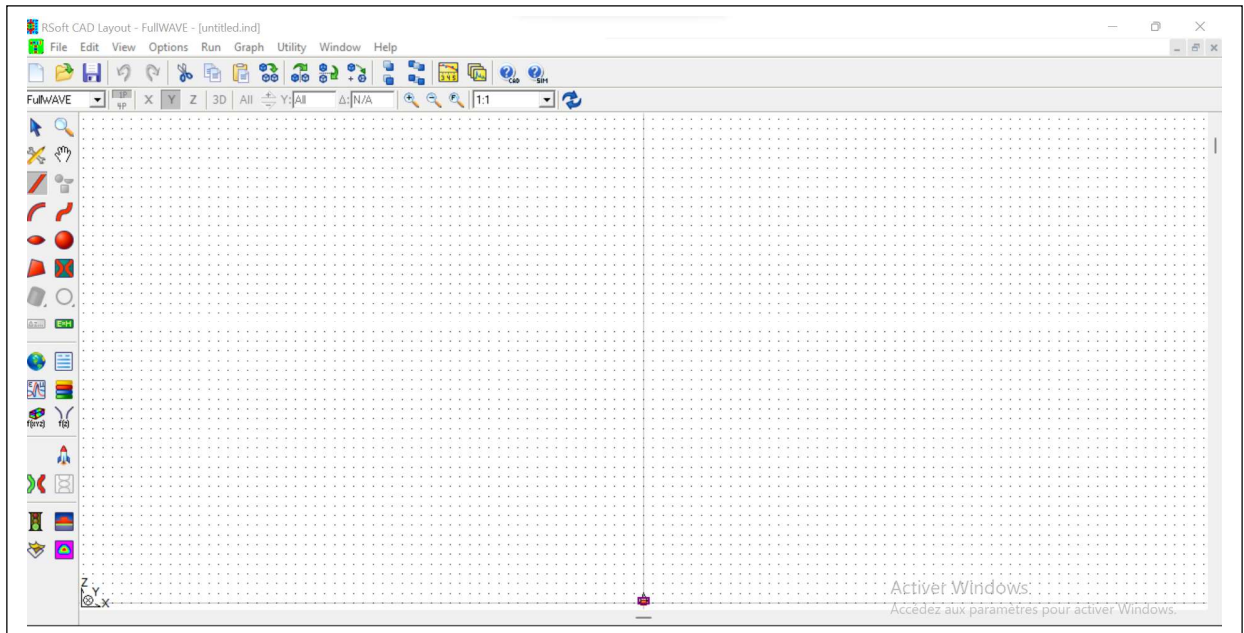


FIGURE III.3 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit.

### III.3.2 Boite de dialogue "Launch paramètres"

La boîte de dialogue illustrée dans la Figure III.4 permet à l'utilisateur de configurer plusieurs excitations qui peuvent être combinées linéairement avec différentes puissances et phases.

Tout d'abord, nous présentons les options pour chaque excitation individuelle

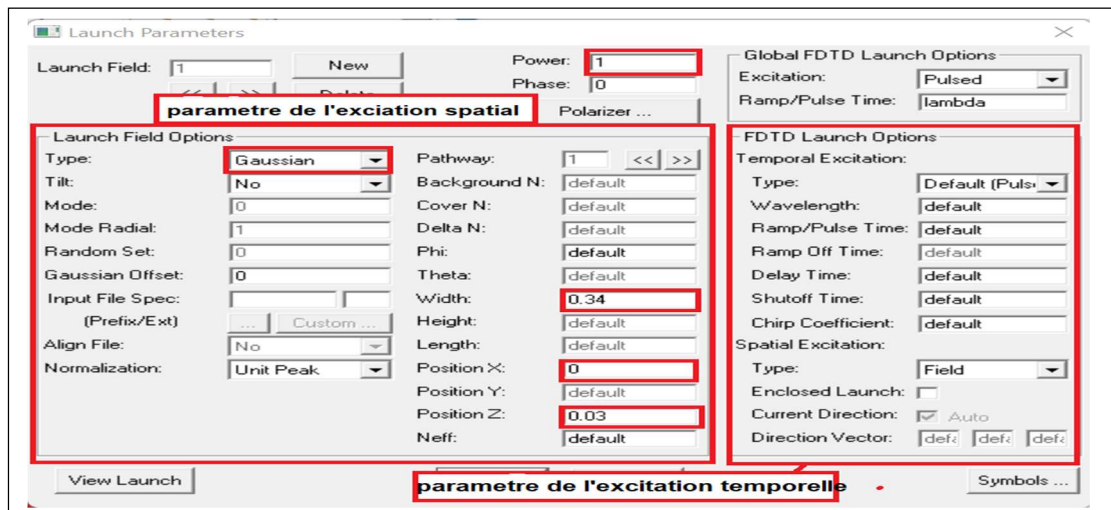


Figure III.4 : Boite de dialogue "Launch Paramètres".

### III.3.3 Les Moniteurs

On a les types de sortie qu'un moniteur FullWAVE peut produire marqué sur la figure (III.5).

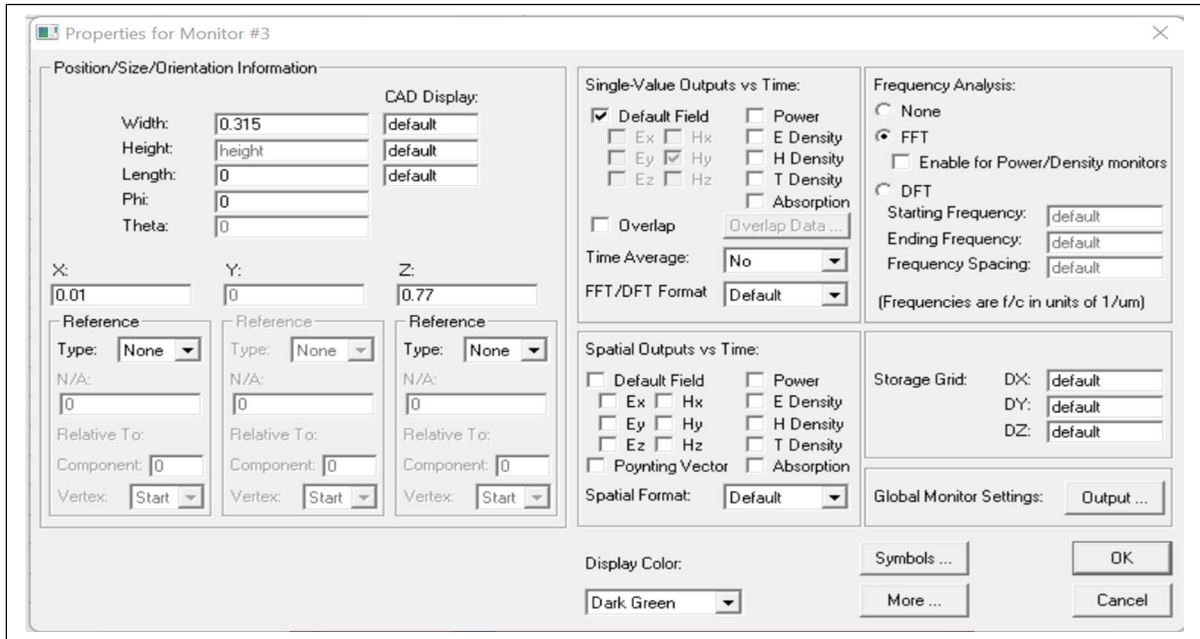


Figure III.5 : La boîte de dialogue des propriétés du moniteur.

### III.3.4 Détermination des variables

En cliquant sur l'icône d'édition des symboles dans la fenêtre de CAD, vous ouvrirez l'éditeur de table (symbole Table Editor) comme illustré dans la Figure III.6. Cela vous permettra de placer les différents paramètres de la structure et de définir plusieurs variables telles que la période, le rayon et l'indice de réfraction.

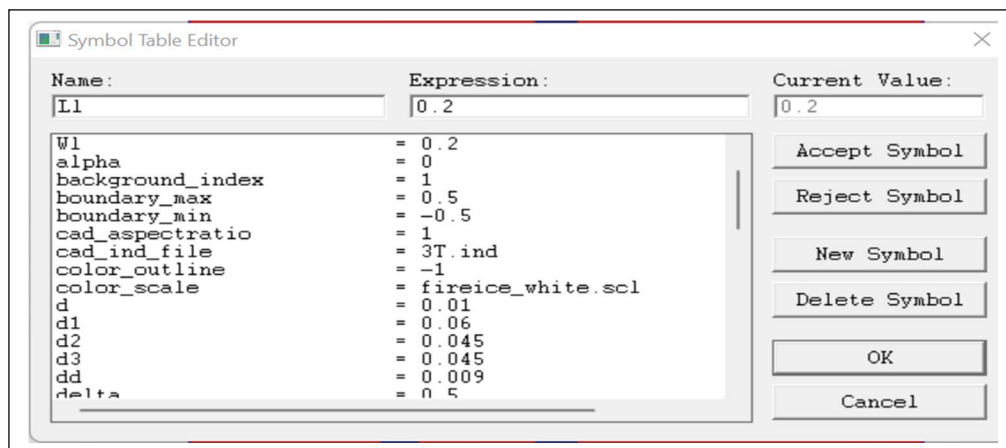


Figure III.6 : l'éditeur du Tableau de symboles

### III.3.5 Vérification du profil d'index

Pour vérifier la distribution d'index de la structure qu'on a créé. On appuie sur le bouton de profil d'index et on change le pas de calcul, on met les valeurs max et min pour X

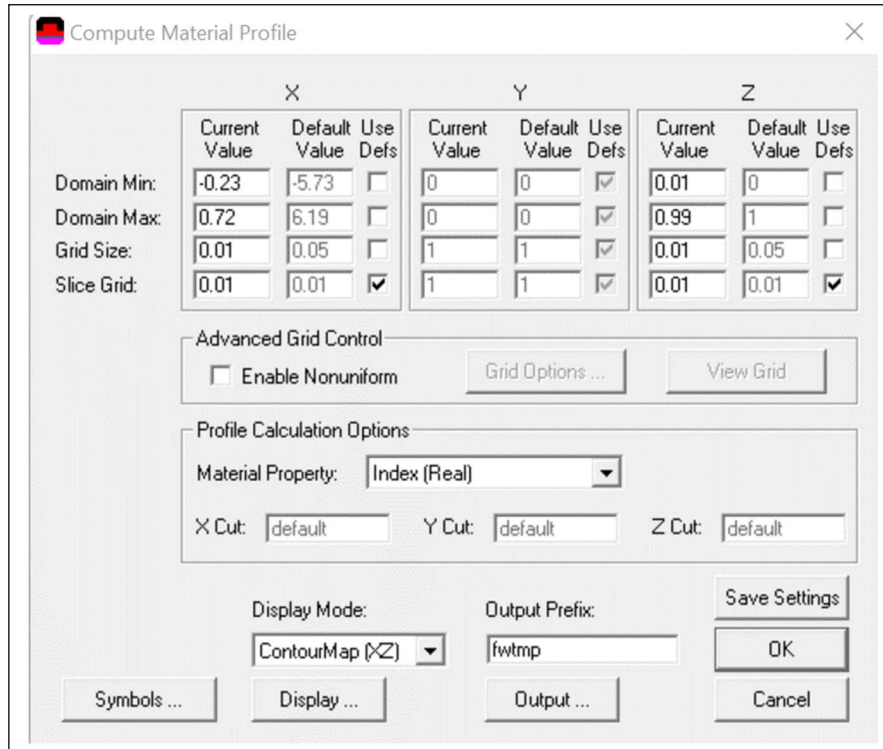


Figure III.7: (a) fenêtre de comput matériel Profil

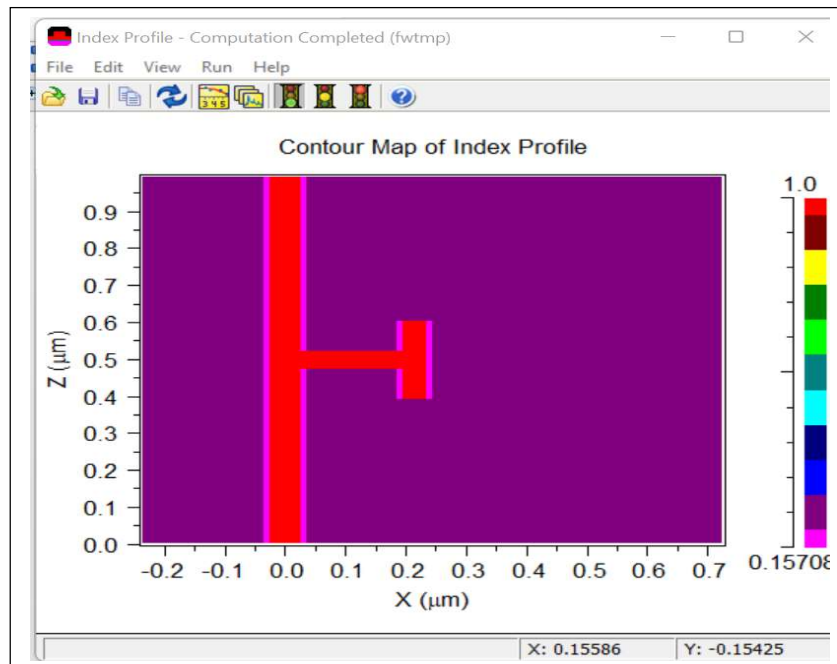


Figure III.8 : (b) distribution d'indice de réfraction.

### III.3.6 Réglage des paramètres de simulation

Une fois que la structure est correctement définie, il est nécessaire d'effectuer la simulation en utilisant l'outil de simulation Full Wave afin de calculer la transmission à la sortie du guide.

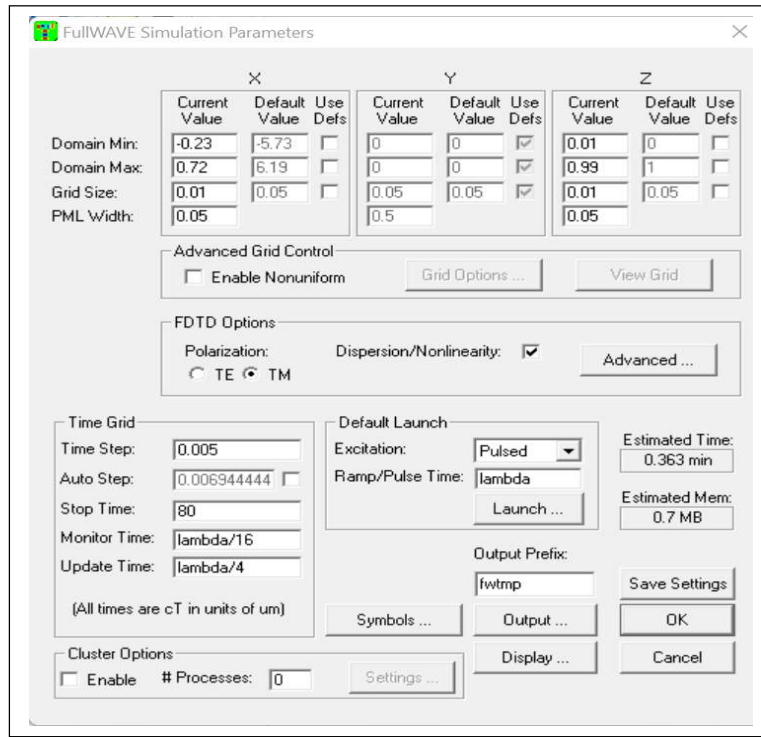


Figure III.9 : La fenêtre de paramètres de simulation Full WAVE.

Lorsque tous les paramètres numériques et autres options sont satisfaisants, il suffit de cliquer sur "OK" pour démarrer la simulation.

#### III.3.6.1 Voir les résultats

Pour visualiser ou imprimer les résultats de la simulation, il suffit de cliquer sur l'icône "Win PLOT" dans la barre d'outils supérieure de la fenêtre de CAD. Ensuite, vous pouvez sélectionner le graphique souhaité à partir du dialogue qui s'affiche, afin de pouvoir examiner ou imprimer les résultats.

### III.4. Présentation de la structure étudiée

Nous avons d'abord réalisé un guide d'ondes MIM (métal isolant) et étudié la propagation dans différents matériaux, puis dans différentes largeurs de guide d'ondes afin avoir une transmission de la lumière d'un endroit à un autre sans pertes. Dans la conception et la simulation, nous avons utilisé full-wave pour la simulation numérique. La lumière se propage

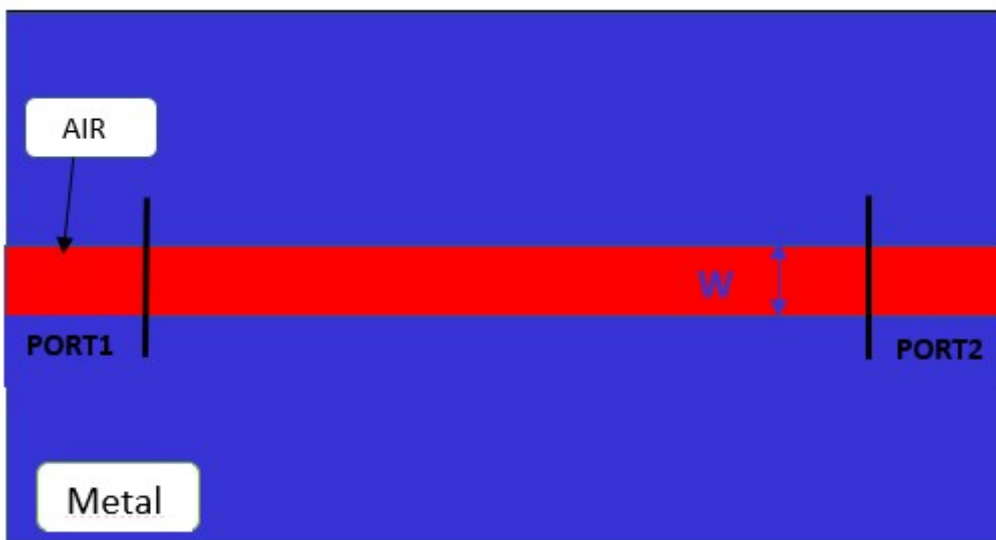
dans la direction  $z$ . La structure est excitée par la polarisation TM. La structure de guide d'ondes MIM est montrée sur la figure III.10

### III.4.1 Étude guide onde plasmonique MIM

#### III.4.1.1 Etude métal

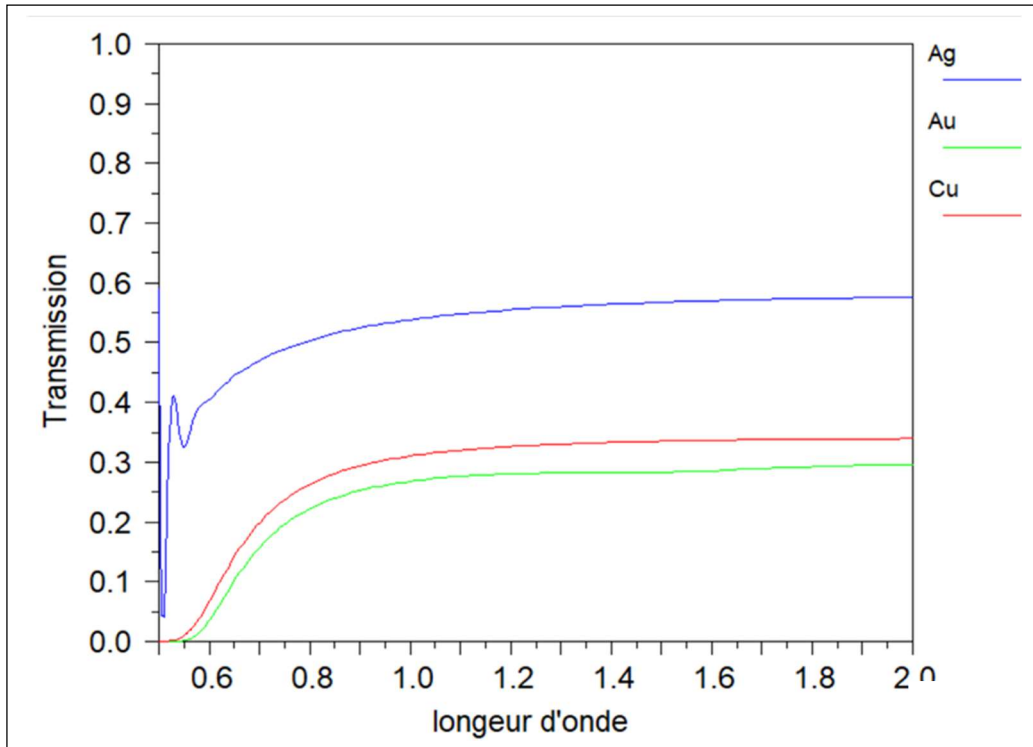
L'utilisation de différents métaux, tels que l'argent, l'or, le cuivre, l'aluminium etc., peut avoir un impact sur les propriétés du guide d'onde plasmonique. Les propriétés optiques des métaux, telles que leur permittivité et leur coefficient d'absorption, peuvent influencer la propagation des modes SPP.

Afin d'étudier la transmission dans un guide d'onde. Nous avons effectué un changement de métaux (Ag, Au, Cu) et comparé la propagation dans chaque métal. MIM Nous considérons dans cette section un guide d'onde plasmonique MIM de largeur  $W$ .



Figure

FIGURE.III.10 :Guide d'onde plasmonique MIM



**Figure III.11:** Spectre de transmission d'un guide d'onde pour les différents métaux

Tupe de métal	Transmission %
Ag	58%
Au	29%
Cu	34%

**Tableau III. 1:** La valeur de transmission pour différents métaux.

Les spectres de transmission dans la figure **III.11** montrent que le meilleur résultat de transmission correspond à l'utilisation du métal argent (Ag). Dans la structure proposée on va utiliser le Ag pour le guide MIM.

### III.4.1.2 Épaisseur du matériau diélectrique

Dans la deuxième étape, nous avons utilisé le métal Ag, puis nous avons étudié l'effet de la variation de l'épaisseur du guide d'onde dans la plage de 40 à 100 nm.

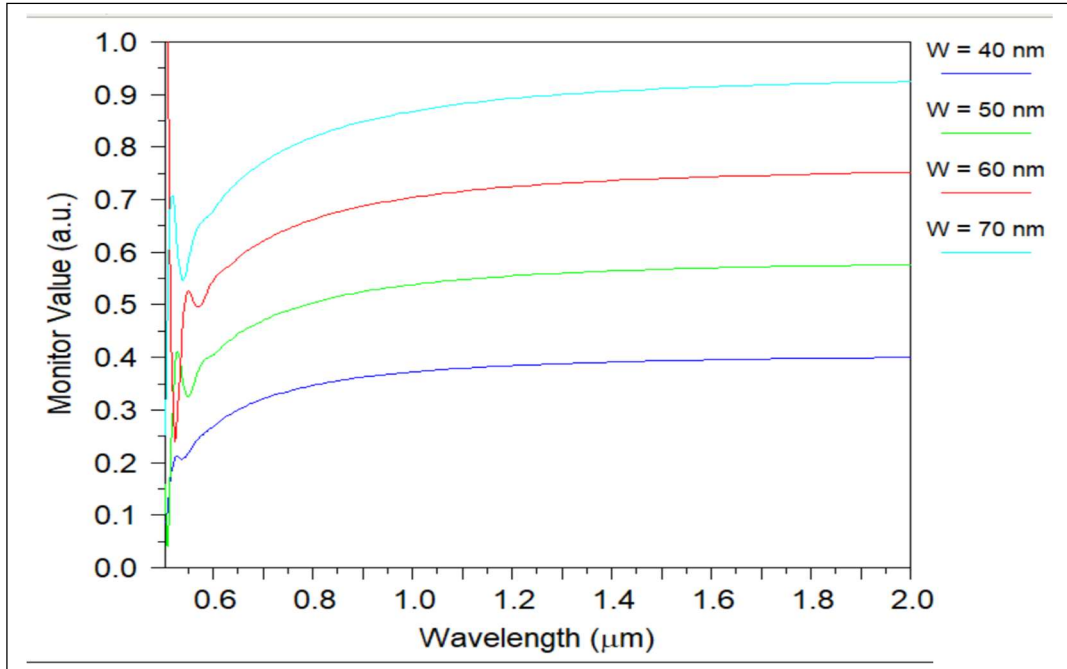
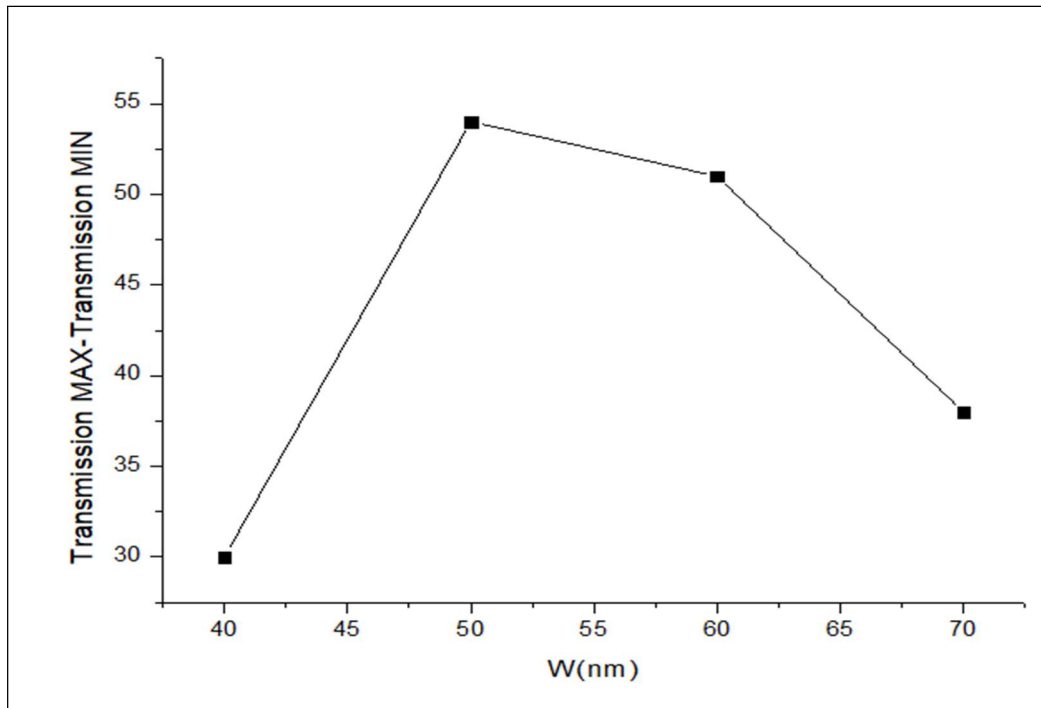


Figure III.12: Spectre de transmission pour de différent largeur de guide d'onde.

Epaisseur de la guide nm	Transmission%
40 nm	40%
50 nm	58%
60 nm	75%
70 nm	92%

Tableau III. 2: La valeur de transmission pour différent largeur de guide d'onde.



**Figure III.13:** variation de  $\Delta T$  (Transmission) en fonction de l'épaisseur (largeur) du guide d'onde  $w$

La Figure (III.13) représente la variation de l'écart de transmission (entre la valeur minimale et maximale) en fonction de l'épaisseur (largeur) du guide d'onde. D'après cette figure, nous pouvons conclure que l'épaisseur idéale pour une transmission optimale du guide d'onde plasmonique est de 50 nm.

### III.4.2 Structure GUIDE/CAVITE (couplage)

#### III.4.2.1 Couplage GUIDE-CAVITE (FORME T )

La structure proposée est un guide d'onde couplé à une cavité de forme **T** , avec les paramètres suivants figure III.14:

- Largeur de la cavité :  $W = 50$  nm
- Longueurs de la cavité :  $L1$  et  $L2$
- Épaisseur du guide d'onde :  $w = 50$  nm

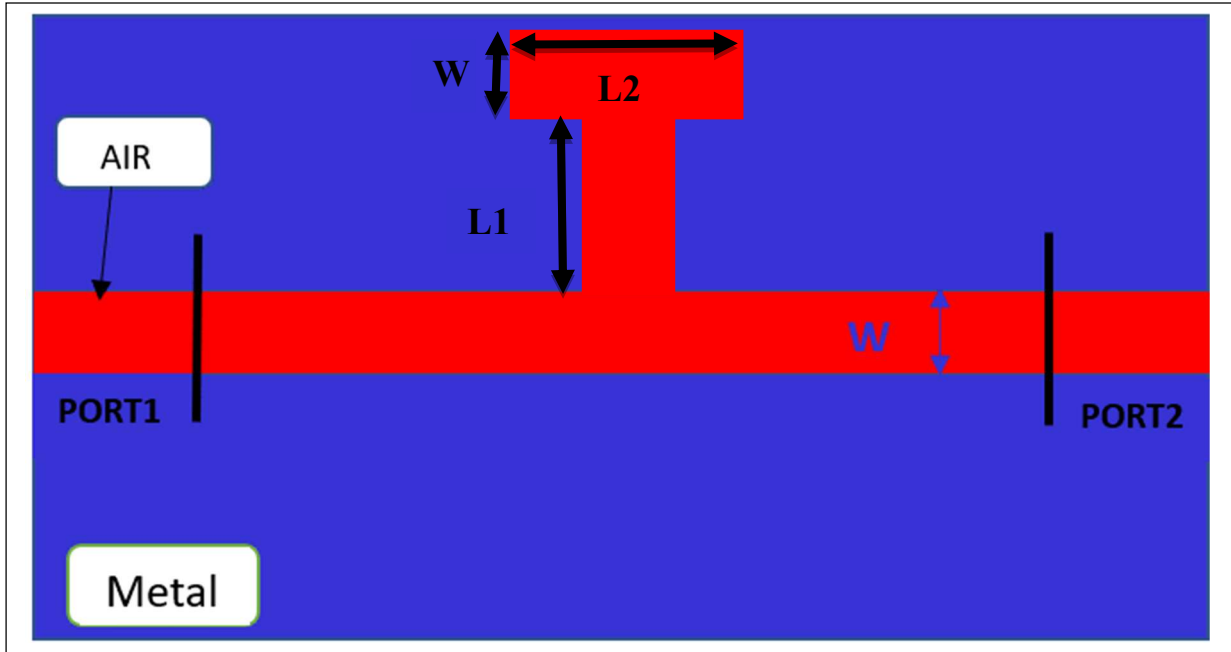


Figure III.14 : Structure plasmonique 2D forme T

#### III.4.2.1.1 L'effet de L1

Pour étudier l'effet de la variation de  $L1$  sur le spectre de transmission de la cavité, nous avons fixé les valeurs de  $W$  et  $L2$  à 50 nm et 300 nm respectivement, et nous avons fait varier la longueur de la cavité  $L1$  dans la plage de [160 nm - 240 nm] avec des incréments de 50 nm. La Figure III.15 représente les spectres de transmission simulés par la méthode FDTD pour différentes valeurs de  $L1$ .

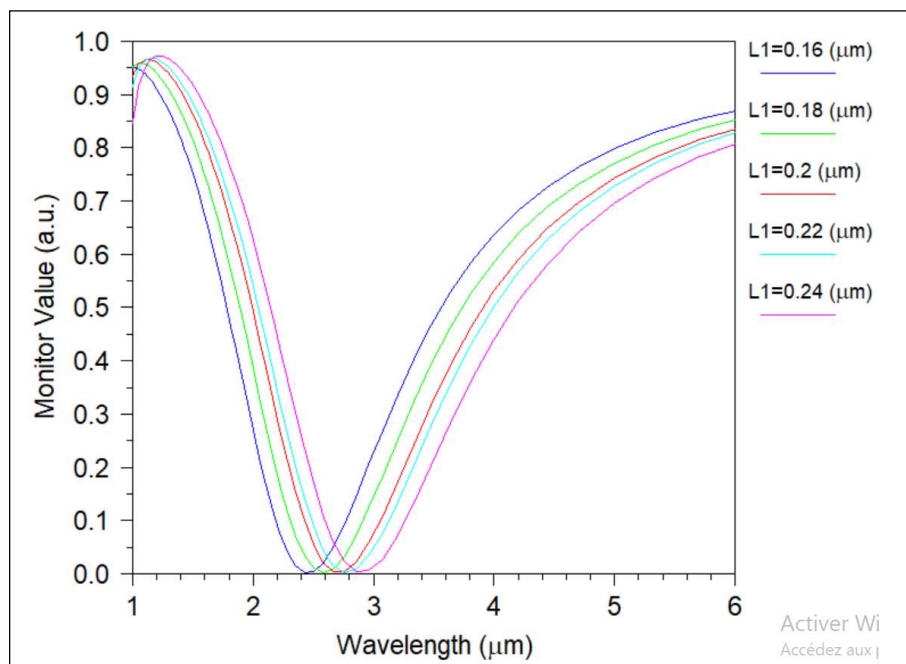
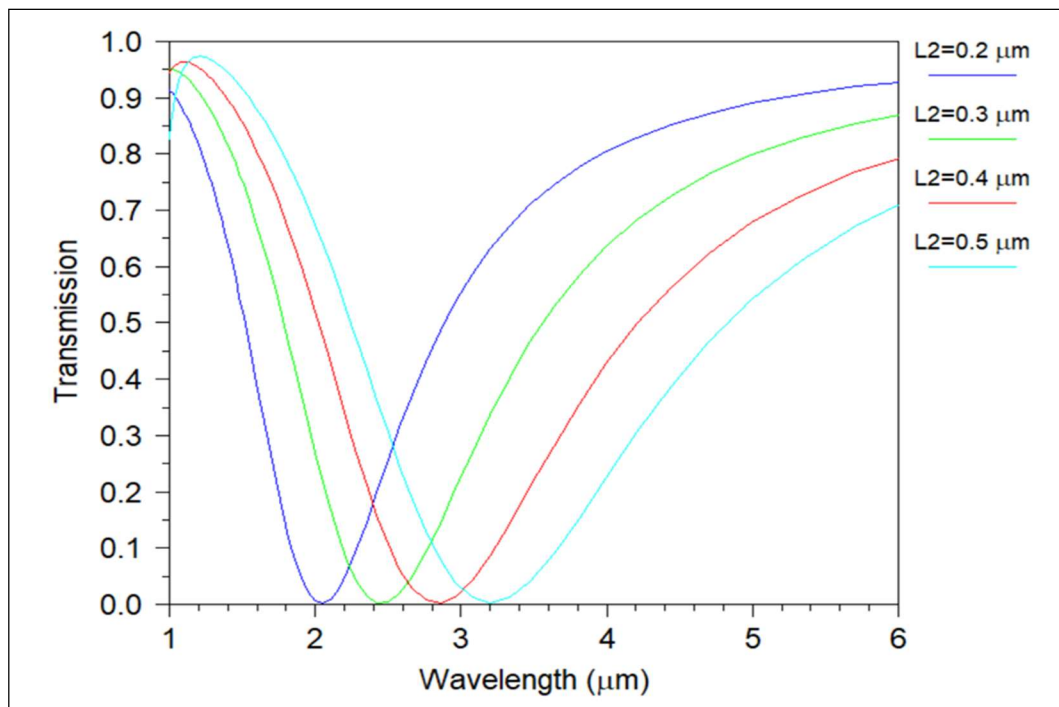


Figure III.15: spectre de transmission pour différent valeur de L1

À travers les résultats obtenus, on remarque que la valeur optimale de L1 est de 160 nm, car elle donne le meilleur spectre de transmission.

#### III.4.2.1.2 L'effet de L2

Pour étudier l'influence du paramètre L2 sur les caractéristiques spectrales de la transmission, nous avons fixé les valeurs de W et L1 à 50 nm et 160 nm respectivement, et nous avons varié la longueur de la cavité L2. Les résultats sur la **Figure III.16** illustrent les spectres de transmission simulés pour différentes valeurs de L2. L'analyse des spectres de transmission montre que la meilleure valeur de L2 est de 200 nm, car elle nous donne le meilleur spectre de transmission avec un taux de 92%.



**Figure III.16** :spectre de transmission pour différent valeur de L2.

#### III.4.3 Distribution de champ magnétique

Après avoir défini tous les paramètres de la cavité, nous avons observé que le guide d'onde plasmonique permet au champ magnétique de traverser n'importe quelle longueur d'onde, à l'exception d'une  $\lambda = 2.05 \mu\text{m}$  qui est filtrée.

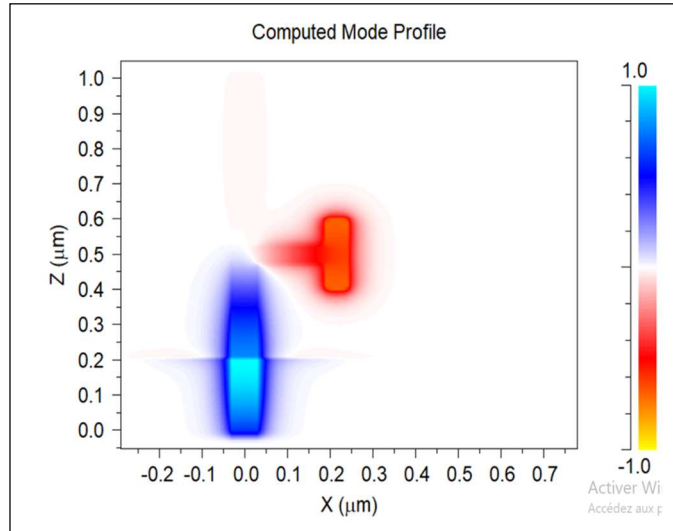


Figure III.17: la distribution de champ magnétique  $\lambda = 2.05 \mu\text{m}$

### III.4.4 Amélioration de la Structure

#### III.4.4.1 couplage guide- deux cavité forme T

Afin d'améliorer les performances de ce filtre, c'est-à-dire obtenir un filtre de type "coupe-bande" avec une large bande interdite, nous avons ajouté une autre cavité de l'autre côté. Ensuite, nous étudierons l'effet de la distance entre elles. Veuillez-vous référer à la figure III.18

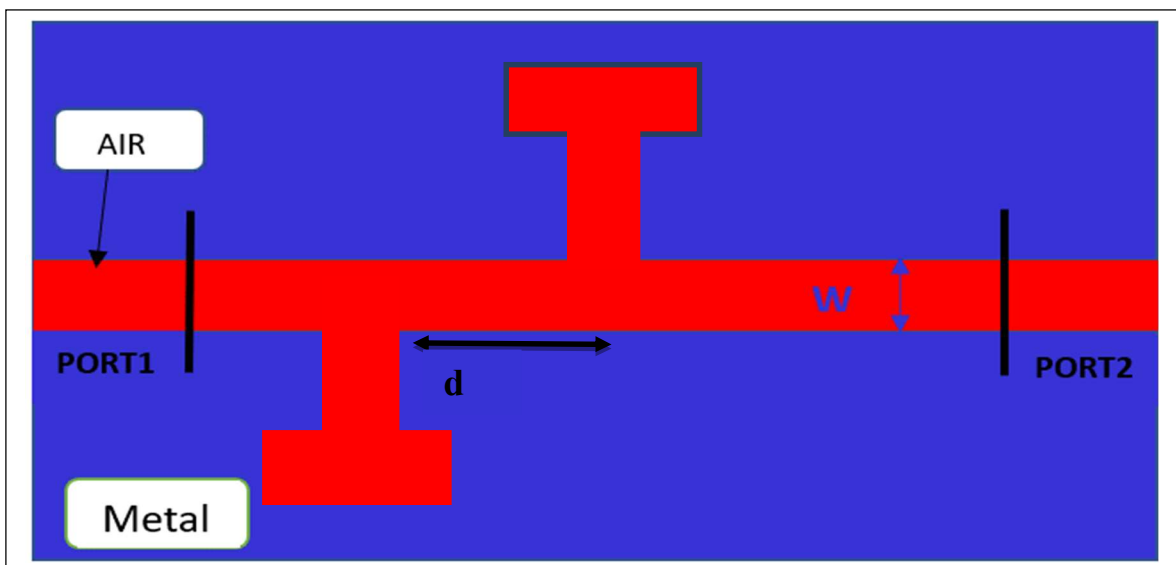
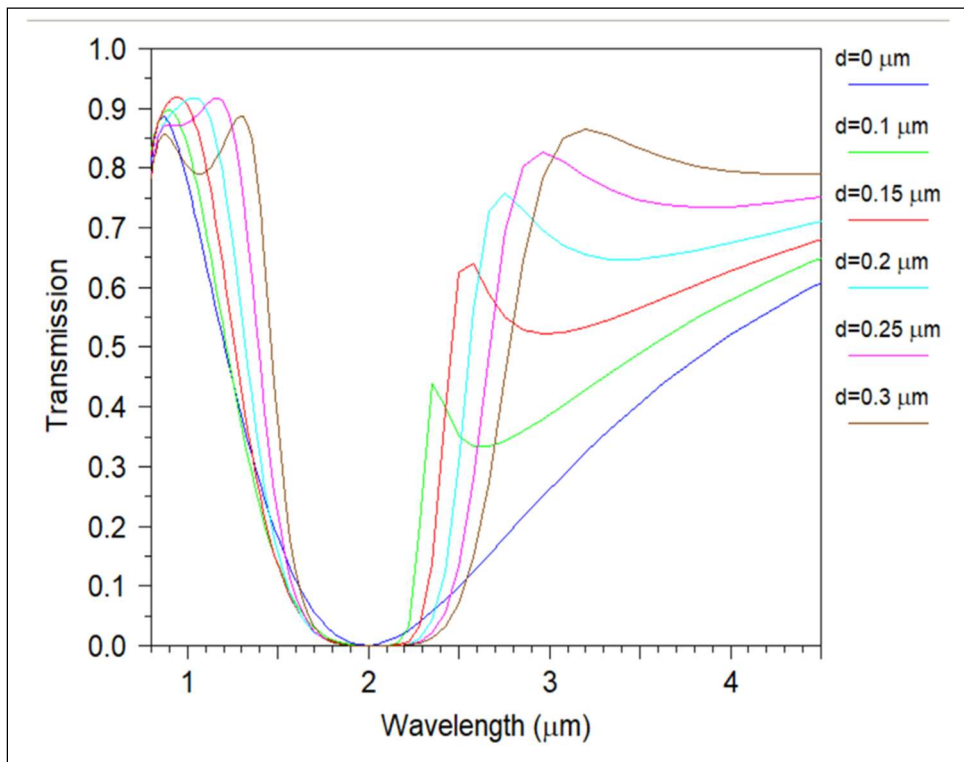


Figure III.18: Structure plasmonique à deux cavité forme T

La figure III.19 présente la transmission spectrale de la structure étudiée pour différentes valeurs de distance  $d$ . On remarque que l'augmentation de la valeur de  $d$  entraîne une augmentation de la bande passante à côté de la bande interdite ainsi que de la bande interdite elle-même. Ainsi, la valeur optimale pour la distance  $d$  est de 300 nm car elle nous donne une meilleure bande passante à gauche et à droite de la bande interdite.



**Figure III. 19 :** Transmission spectrale du coupe-bande filtre à différentes valeurs de  $d$

#### III.4.4.2 couplage guide trois cavités forme T

Dans la dernière étape, nous avons ajouté une troisième cavité à la structure précédente et exécuté des simulations, où la distance entre les cavités est de 300 nm, afin d'augmenter la largeur de bande interdite (voir Figure III.20). Les résultats de la transmission spectrale sont représentés sur la Figure III.22.

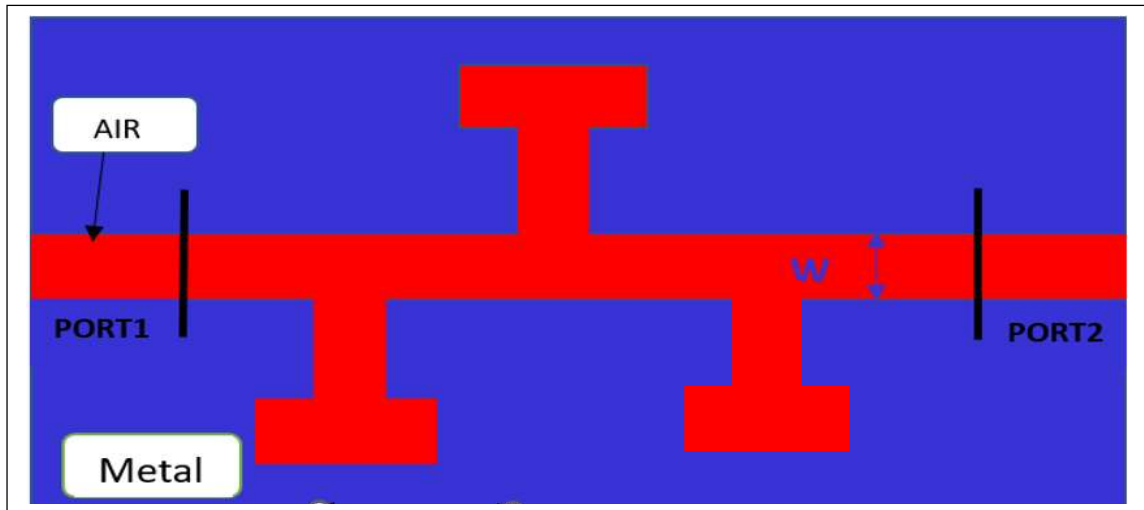


Figure III.20: Structure plasmonique à trois cavité

#### III.4.4.3 couplage guide quatre cavités forme T

Dans la dernière étape, nous avons ajouté une quatrième cavité à la structure précédente et exécuté des simulations, où la distance entre les cavités est de 300 nm, afin d'augmenter la largeur de bande interdite (voir Figure III.21). Les résultats de la transmission spectrale sont représentés sur la Figure III.22. Les valeurs exactes de la largeur de la bande interdite à plusieurs cavités dans le tableau III .3.

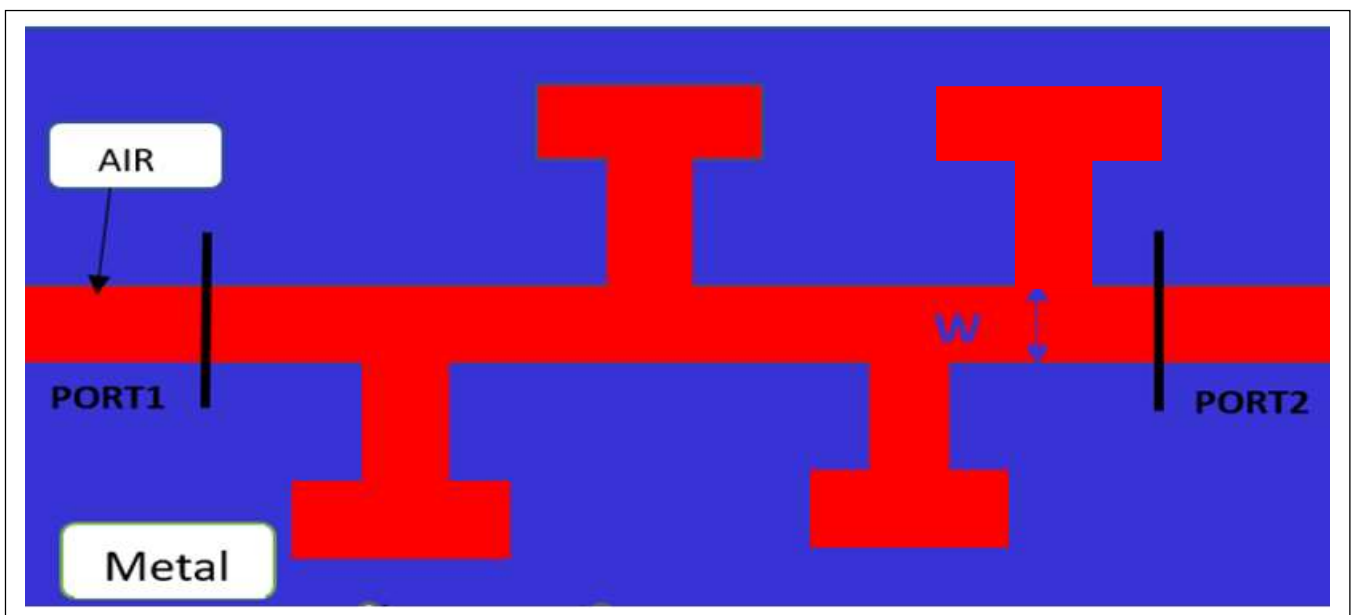
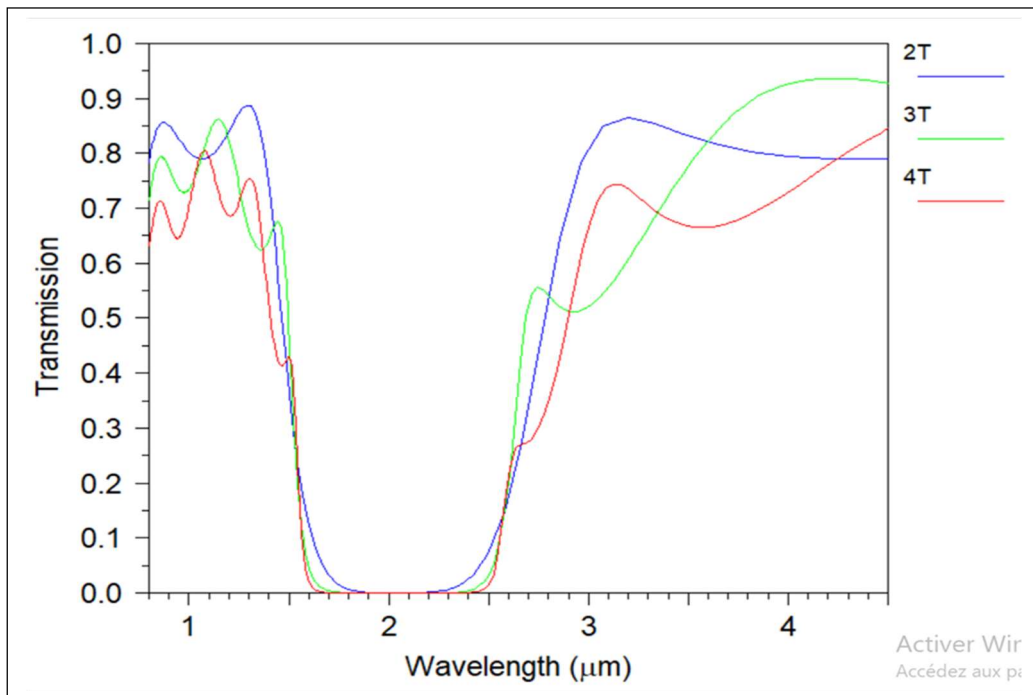


Figure III.21: Structure plasmonique à quatre cavité



**Figure III.22:** Comparaison entre les spectres de transmission avec deux et trois et quatre cavités .

Nombre de cavité	intervalle	La largeur de la bande interdite
T2	(2.26 – 1.82) $\mu\text{m}$	0.44 $\mu\text{m}$
T3	(2.4 – 1.7) $\mu\text{m}$	0.7 $\mu\text{m}$
T4	(2.49 - 1,61) $\mu\text{m}$	0.88 $\mu\text{m}$

**Tableau III .3 :** La largeur de la bande interdite à plusieurs cavité

Les résultats montrent qu'en ajoutant plus de cavités, la bande interdite est augmentée et cela améliore la fonction du filtre.

### III.5 Conclusion

Le troisième chapitre est divisé en deux parties. La première partie, nous avons abordé les principes fondamentaux de la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain). Nous avons également présenté en détail le module de simulation FullWAVE de Rsoft. Cette méthode de simulation est particulièrement adaptée à la modélisation des structures plasmoniques, car elle permet d'accéder aux caractéristiques dynamiques de ces structures telles que la transmission, la réflexion, la localisation des champs et le facteur de qualité des résonateurs.

La deuxième partie de ce chapitre porte sur la présentation des résultats de simulation concernant l'étude des guides d'ondes et des cavités plasmoniques en forme T. Nous avons effectué des variations des paramètres géométriques et physiques afin d'améliorer la transmission de la lumière et de créer un filtre précis.

L'analyse des spectres de transmission de cette structure montre que la longueur de résonance change avec la variation des longueurs **L1** et **L2** de cavité. Enfin, nous avons atteint une structure composée de quatre cavités avec même distance  $d$  entre deux cavités. Les résultats montrent que la structure qui correspond à quatre T donne un filtre coupe bande avec une très bonne transmission et une large bande interdite

# Conclusion Générale

## **Conclusion générale**

les filtres plasmoniques sont des composants optiques prometteurs qui offrent des possibilités passionnantes dans le domaine de la photonique. Leur capacité à contrôler et à manipuler la lumière à l'échelle nanométrique ouvre de nouvelles perspectives pour des applications telles que la détection, la spectroscopie, l'imagerie et les communications optiques. Les filtres plasmoniques exploitent les propriétés uniques des plasmons de surface, permettant une sélectivité spectrale élevée, une taille compacte et une intégration avec d'autres composants optiques. les recherches se poursuivent activement pour améliorer les performances des filtres plasmoniques et pour explorer de nouvelles approches de conception. Avec des avancées continues, les filtres plasmoniques deviendront sans aucun doute des éléments clés dans le développement de technologies optiques avancées, ouvrant la voie à des applications novatrices dans divers domaines de la science et de la technologie.

L'objectif de notre travail est de concevoir un filtre optique basé sur les plasmons, qui facilite le transfert des ondes électromagnétiques en exploitant les oscillations collectives des électrons libres présents sur des métaux. Ce filtre est composé d'un guide d'onde et d'une cavité forme **T** , où l'argent est utilisé comme matériau métallique et l'air comme matériau isolant.

Dans ce travail, nous avons débuté en examinant quelques concepts théoriques et les principes fondamentaux de la plasmonique, comprenant leurs définitions, leurs différentes catégories et leurs mécanismes de fonctionnement. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les notions de base des filtres optiques en mettant l'accent sur leurs caractéristiques principales. À la fin de ce chapitre, nous avons fourni une description détaillée des filtres optiques plasmoniques, notamment les filtres à résonance d'anneau ainsi que les structures MIM (métal-isolant-métal) et IMI (isolant-métal-isolant). Le dernier chapitre se concentre sur la simulation de la structure du filtre souhaité en utilisant le logiciel RSoft, plus précisément le module Fullwave et nous avons exposé les résultats de simulation concernant l'étude des modèles d'acheminement des ondes et des cavités plasmoniques en ajustant les paramètres techniques et physiques pour optimiser la transmission.

D'après les résultats obtenus, on peut observer une nette amélioration de la qualité de transmission suite à l'optimisation de la structure de référence de ce type de configuration.

# Bibliographies

- [1] Li, W. B.; Zhang, L.; Zhou, J. H.; Wu, H. K., Well-Designed Metal Nanostructured Arrays for Label-Free Plasmonic Biosensing. *Journal of Materials Chemistry C* 2015, 3, 64796492.
26. Wood, R. W., On a Remarkable Case of Uneven Distribution of Light in a Diffraction Grating Spectrum. *Phil. Mag.* 1902, 4, 396.
- [2] Rayleigh, L., Note on the Remarkable Case of Diffraction Spectra Described by Prof. Wood. *Philos. Mag* 1907, 14, 60-65.
- [3] Pines, D., Collective Energy Losses in Solids. *Reviews of Modern Physics* 1956, 28, 184198.
- [4]. Pines, D.; Bohm, D., A Collective Description of Electron Interactions .2. Collective Vs Individual Particle Aspects of the Interactions. *Physical Review* 1952, 85, 338-353.
- [5]. Ritchie, R. H., Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. *Physical Review* 1957, 106, 874-881.
- [6]. Powell, C. J.; Swan, J. B., Effect of Oxidation on the Characteristic Loss Spectra of Aluminum and Magnesium. *Physical Review* 1960, 118, 640-643.
- [7]. Otto, A., *Z. Phys* 1968, 216, 398-410.
- [8]. E. Kretschmann, H. R., *Z. Naturforsch.* 1968, 23, 2135-2136.
- [9]. Liedberg, B., *Sens. Actuators* 1983, 4, 299-304.
- [10] Rycenga, M.; Cogley, C. M.; Zeng, J.; Li, W.; Moran, C. H.; Zhang, Q.; Qin, D.; Xia, Y., Controlling the synthesis and assembly of silver nanostructures for plasmonic applications. *Chemical Reviews*, 111 (6), 3669-3712 (2011).
- [11] : HEINZ RAETHER, “ Surfaces plasmons on Smooth and Rough surfaces and on gratings”, Springer-verleg, Berlin, heidel-berg, Germany, pp.4-16, 1988.
- [12] Julien Burgin « Étude femtoseconde de la dynamique électronique et vibrationnelle de nanoobjets métalliques et de l'ordre local dans les verres » thèse de doctorat, 14 Septembre 2007, l'université Bordeaux I.
- [13] Jaromír Pištora et All « Surface plasmon resonance sensor with a magneto-optical structure » *optica applicata*, vol. XL, No. 4, 2010.
- [14] Flaien Pillet « Développement d'un outil d'analyse d'interactions moléculaires basé sur la

Résonance plasmonique de surface (SPRi) » thèse de doctorat, 15 décembre 2010, INSA Toulouse.

[15] Stewart, M. E.; Anderton, C. R.; Thompson, L. B.; Maria, J.; Gray, S. K.; Rogers, J. A.; Nuzzo, R. G., Nanostructured Plasmonic Sensors. *Chemical Reviews* 2008, 108, 494-521.

[16] Sébastien Massenot « étude modélisation et réalisation de composants diffractant : contribution a l'étude de matériaux accordables et application a l'enregistrement holographique de filtres résonants » thèse de doctorat, 03 février 2006, l'université de Bretagne Sud.

[17] Fabrice Bardin « capteur a fibre optique a gradient d'indice inverse base sur la résonance plasmon de surface : applications à la détection d'espèces chimiques » thèse de doctorat, 10 Décembre 2001, l'université jean Monnet de Saint-Etienne.

[18] Sébastien Massenot « étude modélisation et réalisation de composants diffractant : contribution a l'étude de matériaux accordables et application a l'enregistrement holographique de filtres résonants » thèse de doctorat, 03 février 2006, l'université de Bretagne Sud.

[19] M.A. Garcia. Surface plasmons in metallic nanoparticles : fundamentals and applications. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 44(28), 2011.

[20] M. Hamidi. Modélisation par la méthode FDTD des plasmons de surface localisés. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri (zi Ouzou), 2012

[21] Keltouma Nouri « CONCEPTION, REALISATION ET CHARACTERISATION DE FILTRES ET DE DUPLEXEURS EN TECHNOLOGIES GUIDES D'ONDES ET SIW APPLICATION AUX SYSTEMES DE COMMUNICATIONS » thèse de doctorat, 15 Décembre 2008, l'université University Dr Moulay Tahar SAIDA .

[22] A. Amiri Faghani, E. Yaghoubi, E. Yaghoubi, Triple-channel glasses-shape nanoplasmonic demultiplexer based on multi nanodisk resonators in MIM waveguide, *Optics* 237 (2021), 166697,

[23] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature* 424, 824–830 (2003). [CrossRef]

[24] W. L. Barnes, "Surface plasmon-polariton length scales: A route to sub-wavelength optics," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 8, S87–S93 (2006).

[25] S. A. Maier, P. G. Kik, and H. A. Atwater, "Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguides," *Phys. Rev. B* 67, 205402(1-5) (2003).

[26] W. H. Weber and G. W. Ford, "Propagation of optical excitations by dipolar interactions in metal nanoparticle chains," *Phys. Rev. B* 70, 125409(1-8) (2004).

[27] K. Leosson, T. Nikolajsen, A. Boltasseva, and S. I. Bozhevolnyi, "Long-range surface

- plasmon polariton nanowire waveguides for device applications,” *Opt. Express* 14, 314–319 (2006).
- [28] J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto, and T. Kobayashi, “Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter,” *Opt. Lett.* 22, 475–477 (1997).
- [29] S. A. Maier and H. A. Atwater, “Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures,” *J. Appl. Phys.* 98, 011101(1-10) (2005). [CrossRef]
- [30] F. I. Baida, A. Belkhir, D. V. Labeke, and O. Lamrous, “Subwavelength metallic coaxial waveguides in the optical range: Role of the plasmonic modes,” *Phys. Rev. B* 74, 205419(1-7) (2006).
- [31] S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, and T. W. Ebbesen, “Channel plasmon-polariton guiding by sub-wavelength metal grooves,” *Phys. Rev. Lett.* 95, 046802(1-4) (2005).
- [32] D. F. P. Pile, T. Ogawa, D. K. Gramotnev, T. Okamoto, M. Haraguchi, M. Fukui, and S. Matsuo, “Theoretical and experimental investigation of strongly localized plasmons on triangular metal wedges for subwavelength waveguiding,” *Appl. Phys. Lett.* 87, 061106(1-3) (2005).
- [33] G. Veronis and S. Fan, “Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides,” *Appl. Phys. Lett.* 87, 131102(1-3) (2005).
- [34] T. Lee and S. Gray, “Subwavelength light bending by metal slit structures,” *Opt. Express* 13, 9652–9659 (2005).
- [35] Asanka Pannipitiya, Ivan D. Rukhlenko, Malin Premaratne, Haroldo T. Hattori, and Govind P. Agrawal << Improved transmission model for metal-dielectric-metal plasmonic waveguides with stub structure >> article ©2010 Optical Society of America , 11 MARCH 2011
- [36] Fateh LARIOUI « Etude et application des cristaux photoniques : Démultiplexeur » thèse de doctorat, 6 octobre 2022, FRERES MENTOURI UNIVERSITY – Constantine 1.
- [37] Y. Qin, Y. Yu, W. Wu, and X. Zhang, “Integrated tunable optical add/drop filter for polarization and wavelength multiplexed signals,” *Opt. Express*, OE, vol. 24, no. 7, pp. 7069–7078, Apr. 2016.
- [38] W. D. Sacher and J. K. S. Poon, “Dynamics of microring resonator modulators,” *Opt. Express*, OE, vol. 16, no. 20, pp. 15741–15753, Sep. 2008.
- [39] Amir Setayesh, Sayyed Reza Mirnaziry, and Mohammad Sadegh Abrishamian << Numerical Investigation of Tunable Band-pass\band-stop Plasmonic Filters with Hollow-core

Circular Ring Resonator >>, Journal of the Optical Society of Korea , 1 Mars 2011

- [39] S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonic nanoguides and circuits," in *Plasmonics and Metamaterials* (Pan Stanford Publishing, Singapore, 2008).
- [40] E. Ozbay, "Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions," *Science* 311, 189-193 (2006).
- [41] J. Jung, "Optimal design of dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguide with genetic algorithm," *J. Opt. Soc. Korea* 14, 277-281 (2010).
- [42] K. M. Byun, "Development of nanostructured plasmonic substrates for enhanced optical biosensing," *J. Opt. Soc. Korea* 14, 65-76 (2010).
- [43] A. Ramier, "Intégration de guides d'onde et micro résonateurs à mode de galerie par assemblage à puce retournée", Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées, Université de Montréal, Canada, (2014).
- [44] L. Ghisa, "Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal". Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, (2008).
- [45] S. Kim, Y. T. Byun, D.-G. Kim, N. Dagli, and Y. Chung, "Widely tunable coupled-ring reflector laser diode consisting of square ring resonators," *J. Opt. Soc. Korea* 14, 38-41 (2010).
- [46] J. Yoon, G. Lee, S. H. Song, C.-H. Oh, and P.-S. Kim, "Photonic band gaps for surface plasmon modes in dielectric gratings on a flat metal surface," *J. Opt. Soc. Korea* 6,76-82 (2002).
- [47] Z. Fu, Q. Gan, K. Gao, Z. Pan, and F. J. Bartoli, "Numerical investigation of a bidirectional wave coupler based on plasmonic Bragg gratings in the near infrared domain," *J. Lightwave Technol.* 26, 3699-3703 (2008).
- [48] D. K. Gramotev and D. F. P. Pile, "Single-mode sub-wavelength waveguide with channel plasmon-polaritons in triangular," *Appl. Phys. Lett.* 85, 6323-6325 (2004).
- [49] E. Verhagen, J. A. Dionne, L. Kuipers, H. A. Atwater, and A. Polman, "Near-field visualization of strongly confined surface plasmon polaritons in metal-insulator-metal waveguides," *Nano Lett.* 8, 2925-2929 (2008).
- [50] J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto, and T. Kobayashi, "Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter," *Opt. Lett.* 22, 475-477 (1997).
- [51] K. Leosson, T. Nikolajsen, A. Boltasseva, and S. I. Bozhevolnyi, "Long-range surface plasmon polariton nanowire waveguides for device applications," *Opt. Express* 14, 314-319 (2006).
- [52] P. P. Absil et al., "Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators,"

Opt. Lett., vol. 25, no. 8, pp. 554-556, (April2000).

[53] S. A. Maier, P. G. Kik, H. A. Atwater, S. Meltzer, E. Harel, B. E. Koel, and A. G. Requicha, "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides," *Nature* 2, 229- 232 (2003).

[54] M. Quinten, A. Leitner, J. R. Krenn, and F. R. Aussenegg, "Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles," *Opt. Lett.* 23, 1331-1333 (1998).

[55] S. A. Maier, P. G. Kik, and H. A. Atwater, "Optical pulse propagation in metal nanoparticle chain waveguides," *Phys. Rev. B* 67, 205402-1~205402-5 (2003).

[56] D. F. P. Pile and D. K. Gramotev, "Channel plasmon-polariton in a triangular groove on a metal surface," *Opt. Lett.* 29, 1069-1071 (2004).

16. S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, and T. W. Ebbesen, "Channel plasmon-polariton guiding by subwavelength metal grooves," *Phys. Rev. Lett.* 95, 046802-1~046802-4 (2005).

[57] Y. Matsuzaki, T. Okamoto, M. Haraguchi, M. Fukui, and M. Nakagaki, "Characteristics of gap plasmon waveguidewith stub structures," *Opt. Express* 16, 16314-16325 (2008).

18. S. S. Xiao, L. Liu, and M. Qiu, "Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal," *Opt. Express* 14,

2932-2937 (2006).

19. Q. Zhang, X. G. Huang, X. S. Lin, J. Tao, and X. P. Jin, "A subwavelength coupler-type MIM optical filter," *Opt. Express* 17, 7549-7554 (2009).

[58] A. Hosseini and Y. Massoud, "Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry," *Appl. Phys. Lett.* 90, 181102 (2007).

21. T. B. Wang, X. W. Wen, C. P. Yin, and H. Z. Wang, "The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator," *Opt. Express* 17, 24096-24101 (2009).

[59] B. Yun, G. Hu, and Y. Cui, "Theoretical analysis of a nanoscale plasmonic filter based on a rectangular metalinsulator-metal waveguide," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43, 385102 (2010).

[60] G. Veronis, and S. Fan, Guided sub wavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film, *Opt. Lett.*, 30, pp. 3359-3361, (2005).

[61] K.S.Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", *IEEE Trans. Antennas and propagation*, Vol.14, pp.302-307, (1966).

[62] H. Lu, X. Liu, D. Mao, L. Wang, and Y. Gong, "Tunable bandpass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators," *Opt. Express* 18, 17922-17927 (2010).

[63] Amir Setayesh, Sayyed Reza Mirnaziry, and Mohammad Sadegh Abrishamian << Numerical Investigation of Tunable Band-pass\band-stop Plasmonic Filters with Hollow-core

Circular Ring Resonator >>, Journal of the Optical Society of Korea , 1 Mars 2011

[64] P. Bouchon, C. Koechlin, F. Pardo, R. Haïdar, and J.-L. Pelouard, “Wideband omnidirectional infrared absorber with a patchwork of plasmonic nanoantennas,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 6, pp. 1038–1040, (Mar 2012).

[65] G. Veronis, and S. Fan, Guided sub wavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film, *Opt. Lett.*, 30, pp. 3359-3361, (2005).

[66] Timon Brownsis « Accurate Nanofabrication Techniques for High-Index-Contrast Microphotonic Devices » thèse de doctorat, 1 august 2005, massachusetts Institute of technology .

[67] RSoft CAD 5.1.9, “User guide” RSoft Design Group, 200 Executive Blvd. Ossining, NY 10562

[68] RSoft Design Group, Inc, « FullWAVE 6.1User Guide », license 16847214, 1999-2008.

[69] F. Bougriou, « Etude théorique des matériaux à bandes interdites photoniques bidimensionnels: Applications dans le domaine du guidage optique et la détection », Thèse de doctorat, Université Constantine 1, 2013.

[70] A. Harhouz, « Contribution à l’étude et la conception des capteurs à base de cristaux photoniques », Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M’sila, 2017.

[71] A.Taflove, S.C. Hagness, "Computational Electrodynamics: the Finite Difference Time Domain Method", Artech House, Book, Second Edition, (997pages), Norwood, (2005).

[72] D. Botteldooren, « Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems, » *JAcoustSoc Am*, vol. 98, pp. 3302– 3308, (1995).

[73] S. Wang, «Finite-difference time-domain approach to underwater acoustic scattering problems, >>*J Acoust Soc Am*, vol. 99, pp. 1924–1931, (1996).