

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de Technologie Département
d'Electronique**



Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Master Académique

Présentée par :

AMROUCHE Amin

TEBANI Choayb

THÈME

Conception d'un filtre optique à base plasmonique


Soutenue publiquement le

Devant le jury :

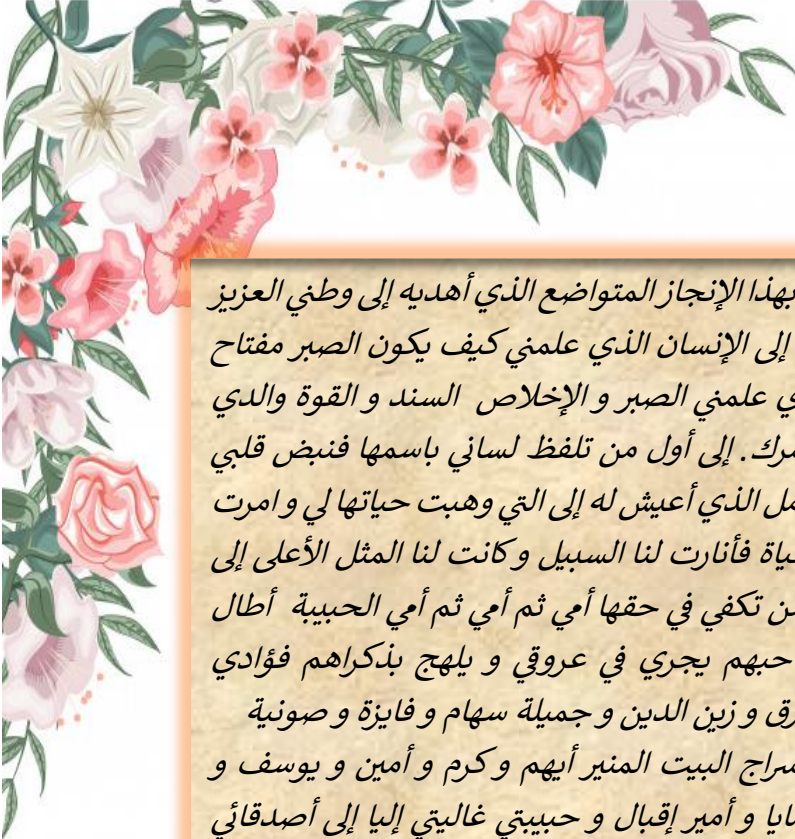
N° :

Année universitaire : 2019 /2020

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات و الصلاة و السلام على رسوله الكريم و من تبعه بإحسانه إلى يوم الدين ، بادئ أشكرب العباد العلي التقدير شكرا جزيلا طيبا مباركا فيه الذي أنارنا بالعلم ، و أكرمنا بالتقوى ، و أنعم علينا بالعافية ، و أنار طريقنا و يسر و وفق و أعاننا على إتمام هذه الدراسة و تقديمها على الشكل الذي هي عليه الآن ، لله الحمد و الشكر و هو الرحمان المستعان . و عرفانا بالمساعدات التي قدمت حتى يتسنى اتمام هذا العمل الشكر و التقدير إلى الأيتاذ حسيني عبد السلام ، فله أخلص تحية و أعظم تقدير على كل ما قدمه لنا من توجيهات و إرشادات و على كل ما خصني به من جهد و وقت طوال إشرافه على هذه الدراسة حيث توجيهاته فكرية و نصائحه قيمة ظاهرة في أكثر من موقع من صفحات هذا الرسالة . كما أتقدم بالإمتنان و العرفات للأساتذة الكرام أعضاء لجنة المناقشة الوقرة على تفضيلهم مناقشة هذه الرسالة . ولا يفوتني توجيه الشكر و التقدير لكافة الأعضاء الكرام أعضاء الهيئة التدريسية في كلية العلوم و التكنولوجيا خاصة قسم الالكترونيك جامعة محمد بوضياف بالمسيلة و كل الإداريين و العاملين في الجامعة على حسن المعاملة و أتقدم بالشكر إلى الأستاذة حرحوز التي كانت السند لإستكمال هذا العمل ، كما لا يفوتني أن أتقدم بالشكر الجزيل إلى كل من ساهم في إنجاز هذا العمل من قريب او من بعيد و وفق كل من مد يد العون ولو بكلمة طيبة مشجعة إلى كل هؤلاء أقول شكرا جزيلا



أسأل الله عز وجل الذي ألهمنا الصبر والثبات بالقوة والعزم على مواصلة مشوارنا الدراسي وتوفيقه لنا في إنجاز هذا العمل. إلى ينبوع الذي لا يمل من العطاء إلى من حاكت سعادتي بخيوط منسوجة من قلبها إلى من اهدتني الحياة وأعطتني جزء من روحها إلي التي الجنة تحت قدميها أمي الغالية حبيبتي أطل الله في عمرك. إلى من سعى و شقي لأنعم بالراحة و الهناء الذي لم يبخل بشيء من أجل دفعي في طريق النجاح الذي علمني أن أرتقي سلم الحياة بالحكمة و الصبر أبي الغالي أطل الله في عمرك. إلى من حبهم يجري في عروقي و يلهج بذكراهم فؤادي إلى شقيقتي ماريا و شقيقتي إلياس إلى كتاكيتي الصغار إلى سراج بيتنا المنير أسماء و نزييم حفضكم الله لنا, إلى من اخترتها لنسير في درب الحياة معا إلى أم اولادي المستقبلية إلى خطيبتي شهيناز أدامها الله لي. إلي صديقي العزيز و أخي الغالي الذي أنجبته لي الأيام شعيب حفضك الله لي. إلى كل من قدم لي يد العون في إنجاز هذه الطروحة.



الحمد لله الذي أكرمني بهذا الإنجاز المتواضع الذي أهديه إلى وطني العزيز
الجزائر الصامدة بأهلها إلى الإنسان الذي علمني الصبر والإخلاص السند والقوة والذي
العزير أطال الله في عمرك. إلى أول من تلفظ لساني باسمها فنفض قلبي
قلبي إلى التي أعطتني الأمل الذي أعيش له إلى التي وهبت حياتها لي وامرت
أن تكمل رسالتها في الحياة فأنارت لنا السبيل وكانت لنا المثل الأعلى إلى
التي لو أهديتها حياتي لن تكفي في حقها أمي ثم أمي ثم أمي الحبيبة أطال
الله في عمرك إلى من حبهم يجري في عروقي و يلهج بذكراهم فؤادي
شقيقاي وشقيقاتي طارق وزين الدين وجميلة سهام وفايزة وصونية
إلى الكتاكيت الصغار سراج البيت المنير أيهم وكرم وأمين ويوسف و
ميساء ورؤيا أسيل ومايا وأمير إقبال وحببتي غاليتي إليا إلى أصدقائي
أمين رمزي وحمزة نصرو وأختي التي لم تلدها أمي نعيمة صاحبة القلب
الطيب نعم الأخت والصديقة وكل من قدم لي العون والمساعدة في
إنجاز هذه الأطروحة

Résumé

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. L'un des domaines les plus récents exploitant les propriétés des plasmons de surface est celui des filtres optiques qui constitue un domaine de recherche très prometteur en raison de leur extrême miniaturisation, sélectivité. Les applications des plasmoniques sont très vastes : Photo détection, cellules photovoltaïques, des guides d'ondes, des filtres optiques, des capteurs...etc.

Dans ce contexte, cette mémoire vise à l'étude et la conception d'un filtre optique à base de plasmonique bidimensionnels (2D) pour application en optique intégrée. Les filtres à base plasmonique offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur une dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications dans le domaine de télécommunication optique. Nous avons utilisé le logiciels Rsoft CAD basé sur le module FullWAVE, basé sur la méthode des différences finies temporelles (FDTD).

Le but de ce travail est la conception d'un filtre optique à base plasmonique à 2D avec la meilleure qualité de transmission possible à l'aide du logiciel Rsoft CAD.

Mots-Clés : plasmonique, filtre optique, optique intégrée, capteurs, guides d'ondes, cavité, FDTD

Summary

Surface plasmon are electromagnetic waves associated with a collective oscillation of electrons in the plasma of free electrons on the surface of a metal. One of the most recent fields exploiting the properties of surface plasmons is that of optical filters, which constitutes a very promising field of research because of their extreme miniaturization and selectivity. The applications of plasmonics are very vast: Photo detection, photovoltaic cells, waveguides, optical filters, sensors...etc.

In this context, this thesis aims at the study and design of an optical filter based on two-dimensional (2D) plasmonics for application in integrated optics. Optical filters based on plasmonic offer the ability to control the propagation of light over a dimension of the order of magnitude of the wavelength in the material. It is this property in particular that makes them interesting for many applications in the field of optical telecommunications. We used Rsoft CAD software based on the FullWAVE module, based on the temporal finite difference method (FDTD).

The goal of this work is the design of a 2D plasmon based optical filter with the best possible transmission quality using Rsoft CAD software.

Keywords : plasmonic, optical filter, integrated optics, sensors, waveguides, cavity, FDTD

المخلص

البلازمونات السطحية هي موجات كهرومغناطيسية مرتبطة بالتذبذب الجماعي للإلكترونات في بلازما الإلكترونات الحرة على سطح المعدن. من أحدث المجالات التي تستغل خواص البلازمونات السطحية مجال المرشحات الضوئية ، والتي تشكل مجالاً بحثياً واعدًا للغاية بسبب تصغيرها الشديد وانتقائها. تطبيقات البلازمونات واسعة جدًا: الكشف عن الصور ، والخلايا الكهروضوئية ، والموجهات الموجية ، والمرشحات الضوئية ، وأجهزة الاستشعار...إلخ.

في هذا السياق ، تهدف هذه الرسالة إلى دراسة وتصميم مرشح بصري يعتمد على بلازمون ثنائي الأبعاد (2D) للتطبيق في البصريات المتكاملة. توفر المرشحات القائمة على البلازمون إمكانية التحكم في انتشار الضوء على حسب أبعاد حجم الطول الموجي في المادة. هذه الخاصية على وجه الخصوص هي التي تجعلها مثيرة للاهتمام للعديد من التطبيقات في مجال الاتصالات الضوئية. استخدمنا برنامج **Rsoft CAD** على أساس وحدة **FullWAVE** ، بناءً على طريقة الفروق المحدودة الزمنية (FDTD).

الهدف من هذا العمل هو تصميم مرشح بصري ثنائي الأبعاد قائم على البلازمون مع أفضل جودة نقل ممكنة باستخدام

برنامج **Rsoft CAD**.

الكلمات المفتاحية : بلازمون, مرشحات بصرية, البصريات المدمجة, أجهزة الاستشعار, الموجه الموجي, تجويف,

FDTD

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I: Généralités sur les plasmoniques

I.1. Introduction.....	03
I.2. Propriétés optiques des métaux.....	03
I.3. Effet plasmonique dans les métaux.....	04
I.3.1. Plasmon de volume.....	04
I.3.2. Plasmon de surface.....	04
I.3.2.1. Historique.....	04
I.3.2.2. Théorie des plasmons de surface.....	05
I.3.2.3. Type de plasmon de surface.....	08
Plasmon de surface délocalisé.....	08
Plasmon de surface localisé.....	09
I.3.2.4. Théorie de la LSPR.....	11
I.3.2.5. Performance et limitations de la LSPR.....	12
I.4. Modèles théoriques de calcul des plasmons de surface.....	13
I.4. La résonance de plasmons de surfaces.....	14
I.4.1. Le principe.....	14
I.4.2 Relation de dispersion des plasmons de surface.....	15
I.5. Conclusion.....	16

Chapitre II: Les filtres optiques à base plasmonique

II.1. INTRODUCTION.....	17
II.2. Les Filtres optiques.....	17
II.2.1. Filtres actifs AF (Active Filter)	18
II.2.2. Micro-résonateur en anneau RS (Ring Resonator)	18
II.3. Le résonateur en anneau.....	18
II.3.1. Attributs des résonateurs en anneaux.....	18
II.3.1.1. Facteur de qualité.....	19
II.3.1.2. Finesse.....	19
II.3.2. Les applications d'un résonateur en anneau.....	20

II.3.3. Résonateurs à anneau couplé - théorie et modèle de simulation.....	22
II.4. Les cavités optiques.....	23
II.4.1. La différence entre TW et SW.....	23
II.4.2. Caractériser une cavité.....	23
II.5. Couplage optique.....	24
II.5.1. Les configurations d'excitation principales d'une onde plasmon de surface.....	24
II.5.1.1. Couplage par prisme.....	24
II.5.1.2. Couplage par réseau de diffraction.....	25
II.5.1.3. Couplage par ondes optiques guidées.....	25
II.6. Synthèse de filtres optiques à l'aide de résonateurs en anneau.....	26
II.7. Les filtres optiques à base plasmonique.....	26
II.7.1. Structures Métal-Isolant-Métal (MIM)	27
II.7.2. Structures Isolant-Métal-Isolant (IMI)	27
II.8. Exemples d'application des plasmons de surface.....	28
II.8.1. Biomédecine.....	28
II.8.2. Énergie solaire.....	28
II.8.3. Technologie de l'information.....	29
II.8.4. La diffusion Raman exaltée de surface.....	29
II.8.5. Exaltation de l'émission des OLED.....	29
II.9. Conclusion.....	30

Chapitre III: Outils de simulation et résultats et interprétations

III.1. INTRODUCTION.....	31
III.2. Introduction au logiciel Rsoft CAD.....	31
III.2.1. Préface.....	31
III.2.2. Modules de simulation associés.....	31
III.2.2.1. Le module de simulation FullWAVE.....	31
III.2.3. Méthode de modélisation.....	32
III.2.3.1. La méthode de FDTD.....	32
III.3. Les étapes de simulation.....	33
III.3.1. Création d'un nouveau fichier de conception.....	33
III.3.2. Définition des variables.....	35
III.3.3. Création de la structure.....	35

III.3.4. Description de la structure.....	35
III.3.4. Définition des Propriétés du guide.....	36
III.3.4. Définition des Propriétés de l'anneau.....	37
III.3.5. Vision du profil d'indice.....	37
III.3.6. Description du chemin de simulation.....	38
III.3.7. Insertion des time monitors.....	39
III.3.8. Traçage du spectre en longueur d'onde.....	39
III.4. L'influence de la largeur X.....	41
III.5. Amélioration de la Structure.....	42
III.6. L'influence de la hauteur h.....	44
III.7. Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47

Bibliographie

TABLE DES FIGURES

Chapitre I: Généralités sur les plasmoniques

Figure I.1 : Schématisation des plasmons de surface (SP) à l'interface métal-diélectrique (plan X-Z) et propagation des polaritons de plasmon de surface (SPP) lorsqu'excités par une lumière polarisée TM. Le plan XY est perpendiculaire au plan XZ.....	06
Figure I.2 : Schéma de la dispersion de k_x dans l'air (ligne noire) et de k_{sp} (courbe bleu), le couplage via un prisme (ligne rouge) ou un réseau (ligne verte) augmente k_x et permet l'excitation des SP.....	06
Figure I.3 : Déplacement bathochromique du signal SPR d'un film d'or suite à l'augmentation de l'indice de réfraction du milieu diélectrique. I_p/I_s correspond au ratio d'intensité de lumière polarisée p (I_p) et polarisée s (I_s).....	07
Figure I.4(a) : Vision schématique de la propagation des oscillations du plasma d'électrons libres à la surface du métal.....	08
Figure I.4(b) : Composante normale du champ électrique du plasmon de surface selon la direction z perpendiculaire à la surface.....	08
Figure I.5 : Relation de dispersion des plasmons de surface.....	09
Figure I.6 : Schéma illustratif de la propagation des plasmons polaritons de surface à l'interface d'un métal et d'un diélectrique.....	10
Figure I.7 : Schéma du phénomène de résonance des plasmons de surface localisés.....	11
Figure I.8 : La formation de l'onde évanescente.....	14
Figure I.9 : Relation entre angle de résonance et mesure du signal en SPR et SPRi.....	14
Figure I.10 : Relation de dispersion des plasmons de surface.....	15

Chapitre II: Les filtres optiques à base plasmonique

Figure II.1 : Filtre de suppression de canal de résonateur en anneau.....	18
Figure II.2 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.....	19
Figure II.3 : Résonateur à anneau unique (SRR) comme élément constitutif des compensateurs de dispersion multi-étages.....	20
Figure II.4 : Résonateur à micropores tout actif couplé verticalement.....	21
Figure II.5 : Résonateur en anneau à une longueur d'onde de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$	22

Figure II.6 : Schémas de cavités individuelles. (a) et (b) sont des cavités SW avec une configuration d'accouplement latéral et d'accouplement d'épaulement désignées par S1 et S2, respectivement. (c) est une cavité TW notée T 1.....	23
Figure II.7 : Courbe de dispersion du plasmon de surface avec le modèle de Drude. En rouge la relation du plasmon de surface, en bleu le cône de lumière dans l'air et en noir l'asymptote du plasmon de surface a $\omega = \omega_p/\sqrt{2}$	24
Figure II.8 : Couplage par prisme (méthode ATR)	25
Figure II.9 : Couplage par réseau de diffraction.....	25
Figure II.10 : Couplage par un guide d'onde optique.....	25
Figure II.11 : Schéma d'un filtre MIM typique avec une matrice carrée (période P) de Schéma d'un filtre MIM typique avec une matrice carrée (période P) de patches carrés (taille a)	27
Figure II.12 : Vues schématiques de (a) une configuration IMI et (b) d'une seule interface métal-diélectrique. Les lignes Vues schématiques de (a) une configuration IMI et (b) d'une seule interface diélectrique. Les lignes rouges indiquent Re (Ez) tandis que les lignes vertes représentent Re (Hy)..	27

Chapitre III: Outils de simulation et résultats et interprétations

Figure III.1 : La fenêtre principale du RSoft CAD Layout.....	33
Figure III.2 : La fenêtre de démarrage où les informations de base sur la structure sont définies.....	34
Figure III.3 : Illustration d'une fenêtre de disposition dans laquelle le domaine de simulation et le champ de lancement sont également affichés.....	34
Figure III.4 : L'éditeur de table de symboles.....	35
Figure III.5 : Schéma d'un filtre plasmonique à résonateur en anneau rectangle (Structure 1).....	36
Figure III.6 : La boîte de dialogue Propriétés du composant pour le composant guide.....	36
Figure III.7(a) : La boîte de dialogue propriétés du composant pour le composant rect 1 en Ag.....	37
Figure III.7(b) : La boîte de dialogue propriétés du composant pour le composant rect 2 en Ag.....	37
Figure III.8 : La boîte de dialogue Compute Index Profile.....	37
Figure III.9 : Le profile des matériaux de la structure 1.....	38
Figure III.10 : Définition des paramètres du Launch Field.....	38
Figure III.11 : Définition des paramètres du time monitor.....	39
Figure III.12 : Paramètres de simulation.....	39
Figure III.13 : La distribution de champ magnétique dans la structure 1.....	40
Figure III.14(a) : Le Spectre de transmission de la cavité en échelle linéair.....	40
Figure III.14(b) : Le Spectre de transmission de la cavité en dB.....	40

Figure III.15(a) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de x en échelle linéaire.....	41
Figure III.15(b) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de x en dB.....	41
Figure III.16 : Schéma d'un filtre plasmonique à 2 résonateur en anneau rectangle (Structure 2).....	42
Figure III.17 : Le profile des matérieaux de la structure 2.....	42
Figure III.18 : La distribution de champ magnétique dans la structure proposé.....	43
Figure III.19(a) : Le Spectre de transmission de la cavité en échelle linéaire.....	43
Figure III.19(b) : Le Spectre de transmission de la de la cavité en dB.....	43
Figure III.20 (a) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de h en échelle linéaire.....	44
Figure III.20(b) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de h en dB.....	44
Figure III.21(a) : Comparaison entre les deux pics qui correspond au $\lambda_{res} = 840 \text{ nm}$ en échelle linéaire.....	45
Figure III.21(b) : Comparaison entre les deux pics qui correspond au $\lambda_{res} = 840 \text{ nm}$ en dB.....	45
Figure III.22 : Comparaison entre les spectre de transmission de la structure 1 et 2.....	45

LIESTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Les caractéristiques d'un filtre optique.....	17
---	-----------

LISTE DES ACRONYMES

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

ω_p : La fréquence plasma.

m_e : La masse effective des électrons.

n_e : La densité de charge.

e : La charge élémentaire d'un électron.

K : Vecteur d'onde.

L_{sp} : La longueur de propagation.

L_{pi} : La longueur de pénétration du plasmon.

ϵ_s : Constante relative positive.

ϵ_m : Constante diélectrique complexe.

m : Milieu métallique.

S : Diélectrique ou vide.

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

E : Le vecteur champ électrique.

B : L'induction magnétique.

H : Le champ magnétique.

D : Le vecteur déplacement électrique.

k_0 : La norme du vecteur d'onde dans le vide.

ω_{sp} : La pulsation du plasmon de surface.

Φ_0 : Flux lumineux incident.

Φ : Le flux transmis par le filtre.

T : Facteur de transmission.

λ : La longueur d'onde.

F : La finesse.

Q : Le facteur de qualité.

ATR : Attenuated Total Reflection.

CAO : *Conception Assistée Par Ordinateur*.

DBR : Dual Behavior Resonator.

DFB : Digital Filter 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.
ISL : La Distance Entre Deux Pics.
LSP : Localized Surface Plasmon.
LSPR : Localized Surface Plasmon Resonance.
MIM : Métal – Isolant – Metal.
OLED : Diode Electroluminescente Organique.
OTDM : Optical Time Division Multiplexing
PPS : Plasmon Polariton De Surface.
PS : Plasmon De Surface.
RI : Refractive Index).
RS : Ring Resonator.
SAM : Self Assembled Monolayer.
SERS : Surface Enhanced Raman Scattering.
SP : Surface Plasmons.
SPP : Plasmons-Polaritons De Surface.
SPR : Résonance Par Plasmon De Surface.
SRR : Résonateur À Anneau Unique.
TE : Transverse Electric.
TM : Transverse Magnetic.
WG : Wave Guide.

Introduction Générale

Introduction générale :

Les structures plasmonique sont des matériaux métalliques supportant un plasma d'électrons conducteurs qu'on appelle les plasmons de surface (surface plasmons, SP) [1], de nombreuses études portent sur le développement de capteurs optiques qui supportent le phénomène des SP [2], de ce fait, le domaine de la plasmonique correspond à l'étude des interactions lumière-métal.

Afin de supporter un SP, les structures plasmoniques sont composés d'un métal ayant une constante diélectrique avec une partie réelle négative et une partie imaginaire positive. L'or et l'argent sont des métaux conducteurs qui respectent ces conditions et sont les plus efficaces à des fréquences optiques dans le visible et l'infrarouge. [3, 4] De plus, l'or et l'argent offrent une bonne chimie de surface permettant la formation des monocouches auto-assemblées (Self Assembled Monolayer, SAM) avec les composés ayant un groupement thiol. Par contre, il est important de préciser que l'argent a l'inconvénient de s'oxyder aisément et que l'Ag₂O n'est pas actif en plasmonique. Pour ces raisons, malgré son prix élevé, l'or est considéré comme le standard pour effectuer de la plasmonique tant en recherche académique qu'en industrie.

Dans la littérature, il existe une multitude de structures plasmoniques pouvant être utilisées selon les objectifs de recherche [5]. Il est possible de diviser ces structures en trois catégories : film continu, réseaux métalliques et nanostructures. Ces structures diffèrent entre elles de par leurs méthodes de fabrication, leur sensibilité, leurs domaines d'applications et leurs modes d'excitations.

De ce fait, le film continu (e.g : film d'or) est une des structures les plus utilisées pour effectuer de la SPR. La structure consiste à un substrat de verre (e.g : verre BK7) recouverte d'une couche d'épaisseur de 1 nm de chrome sur laquelle est déposé 50 nm d'or.

Ces films peuvent être excités (e.x : générer des plasmons) à l'aide d'un prisme par SPR conventionnelle (i.e : configuration Kretschmann). La simplicité de fabrication de cette structure et sa sensibilité expliquent pourquoi elle est le standard dans le domaine académique et industriel. Par contre, l'inconvénient du film d'or et de la SPR en général est le besoin de coupler la lumière avec un prisme. Cette particularité technique limite la miniaturisation des montages SPR et diminue son débit d'analyses.

Les réseaux (grating) correspondent à des structures plasmoniques en une dimension (1D). Des exemples de ces structures 1D sont le réseau à rainures étroites (narrow grooves) [6] ou le réseau de nanofils (nanowires) développé par Corn [7]. Ces structures permettent l'excitation de SP par diffraction de la lumière à l'aide d'un montage optique en réflexion [8]. L'excitation de ces structures en SPR ne requiert pas d'angle d'excitation spécifique ce qui simplifie le montage et permet de le miniaturiser [6].

Pour continuer, les structures plasmoniques les plus étudiées lors des dernières années sont certainement les nanoparticules. L'engouement envers ces structures plasmoniques est due à ses diverses bioapplications : études biophysiques, diagnostic médical, imagerie et photothérapie du cancer [9,10], Il existe une plénitude de nanoparticules telles que : les nano-sphères, les nano-étoiles, les nano-tiges et les nano-coquilles [11,12]. De nombreuses voies de synthèses permettent de fabriquer ces différentes nanoparticules via la réduction de sels d'or [13]. Les nanostructures ont l'avantage d'être excités en transmission via un plasmon de surface localisé ; ce qui simplifie le montage optique par rapport à la SPR. Cependant, les nanostructures ont l'inconvénient d'être très sensibles aux variations de pH et de force ionique du milieu, ce qui affecte leur stabilité, malgré leur grande versatilité, leurs désavantages pourraient limiter leurs applications en chimie analytique.

Pour continuer, les réseaux nanostructurés sont probablement les structures les plus polyvalentes. En effet, ces dernières permettent de coupler la lumière avec les SP selon différentes méthodes : avec prisme, par diffraction et en transmission. Il existe une multitude de réseaux nanostructurés, par exemple : réseaux de nanotrous, réseaux de microtrous, réseaux de nanodisques, réseaux de nano-vides, réseaux de nano-triangles, etc [14]. Dépendamment de la structure et de la configuration optique utilisées, il est possible d'exciter divers modes plasmoniques tel que les modes propagatifs, localisés, de Bragg et les ondes de Bloch.

Une explication détaillée de chacun de ces modes plasmoniques sera faite dans les prochaines sections. Auparavant, la fabrication de réseaux nanostructurés était grandement limitée à des techniques dispendieuses et lentes telles que la lithographie à faisceau d'électrons ou à faisceau ionique focalisé [15]. De nos jours, il est possible de développer ces structures rapidement et à grande échelle via des méthodes de micro-fabrication.

Pour terminer, le choix d'une structure plasmonique optimale dépend en grande partie de l'objectif de recherche. De ce fait, un des objectifs de la thèse est de développer un dispositif plasmonique pouvant effectuer de la bioanalyse par criblage à haut débit. Pour parvenir à ces fins, il est important d'utiliser une structure plasmonique ayant une grande sensibilité, pouvant être fabriqué à grande échelle et qui requiert une instrumentation optique simple. De ce fait, les réseaux nanostructurés respectent tous ces paramètres.

Chapitre

I

Généralités sur les Plasmoniques

I.1. Introduction :

Depuis les vingt 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 [16], en tant que biocapteur pour des diagnostics médicaux ou thérapeutiques [17, 18] dans les circuits photoniques [1] et dans les cellules solaires [19]. 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.

I.2. Propriétés optiques des métaux :

La réponse optique d'un métal peut être décrite par l'interaction entre le solide, représenté par sa fonction diélectrique $\epsilon(\omega)$ et la lumière assimilée à une onde électromagnétique.

La propagation de cette onde dans le milieu considéré est régie par les équations de Maxwell :

$$\text{div } \vec{D} = \rho_{\text{libre}} \quad (\text{I.1})$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{I.2})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (\text{I.3})$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (\text{I.4})$$

Où \vec{E} représente le champ électrique, \vec{H} le champ magnétique, \vec{B} l'induction magnétique, \vec{D} Le déplacement électrique, ρ_{libre} la densité de charge libre et \vec{j} Libre la densité de courant des charges libres. Ces relations sont complétées par les relations constitutives :

$$\vec{D} = \epsilon(\omega)\vec{E} = \epsilon_0 \tilde{\epsilon} \vec{E} \quad (\text{I.5})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{I.6})$$

Et la loi d'Ohm :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{I.7})$$

Avec ϵ_0^1 , μ_0^2 la permittivité et la perméabilité du vide respectivement, σ la conductivité électrique, et $\tilde{\epsilon}$ et μ_r la permittivité et la perméabilité relative du milieu respectivement (dans la suite du travail, on considérera un milieu non magnétique ainsi μ_r sera égale à 1) [20]. La fonction diélectrique relative $\tilde{\epsilon}(\omega)$, qui caractérise la réponse du milieu de propagation de la lumière, est généralement complexe :

$$\tilde{\epsilon}(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2 = \tilde{n}^2 \quad (\text{I.8})$$

ϵ_1 Et ϵ_2 représentent respectivement les parties réelle et imaginaire de $\tilde{\epsilon}(\omega)$, \tilde{n} et l'indice de réfraction complexe, cette fonction peut comporter deux contributions différentes : la contribution intra-bande (modèle de Drude) due aux électrons $n_s - p^1$, et la contribution interbande (modèle de Drude Lorentz) due aux électrons $(n-1)d^{10}$.

I.3. Effet plasmonique dans les métaux :

Le modèle de Drude fait apparaître une pulsation particulière dans le réseau cristallin des métaux, la pulsation plasmon. A cette pulsation, un mode longitudinal peut se propager dans le métal, le plasmon de volume.

L'oscillation des électrons est aussi possible à l'interface entre un métal et un milieu diélectrique, les ondes qui se propagent à l'interface sont alors appelées plasmons de surface [21].

I.3.1. Plasmon de volume

Un métal peut être assimilé à un plasma dans lequel les électrons de conduction se déplacent librement, la densité électronique peut fluctuer et l'énergie d'oscillation des électrons peut être quantifiée.

Le quantum d'énergie associé à ces oscillations est le plasmon de volume dont la pulsation est donnée par :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}} \quad (I.9)$$

L'énergie de ces plasmons est de l'ordre de 10 à 20 eV. Il n'est donc pas possible de les exciter avec une excitation optique dans le visible, d'où la nécessité d'utiliser des électrons ou des rayons X pour les exciter [22].

I.3.2. Plasmon de surface

Un plasmon de surface est une onde électromagnétique se propageant à l'interface entre un métal et un diélectrique. Cette onde provient du couplage entre les photons incidents et les électrons libres proches de l'interface.

On distingue deux types de plasmons de surface : les plasmons de surface délocalisés et les plasmons de surface localisés.

I.3.2.1. Historique

Tout d'abord, le phénomène des plasmons de surface fut observé pour la première fois en 1902 par Wood [23], 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 [24], 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 [25], 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 [25 ,26].

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 [27 ,28], c'est en 1968 qu'une interprétation complète du phénomène de résonance des plasmons de surface fut établie par Otto [29].

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 [30], 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 [31].

Finalement, depuis les années 1990, la SPR est en constante effervescence et est appliquée à de nombreux domaines de recherche.

I.3.2.2. Théorie des plasmons de surface :

Tout d'abord, un plasmon de surface est une oscillation collective des électrons libres de la bande de conduction d'un métal noble (**Figure I.1**) [16].

L'excitation des SP par un photon génère des polaritons de plasmons de surface (surface plasmon polaritons, SPP), ces derniers correspondent à une onde électromagnétique se propageant de façon longitudinale à l'interface métal-diélectrique tout en ayant une amplitude exponentiellement décroissante (**Figure I.1**) [16].

Les SPP sont ainsi qualifiés de plasmon propagatif capable de sonder des variations d'indice de réfraction (**n**) à la surface du capteur plasmonique.

En effet, les ondes SPP se propagent sur le film d'or sur des longueurs de l'ordre du μm et sondent dans le milieu diélectrique avec une distance de pénétration de 200-300 nm [32].

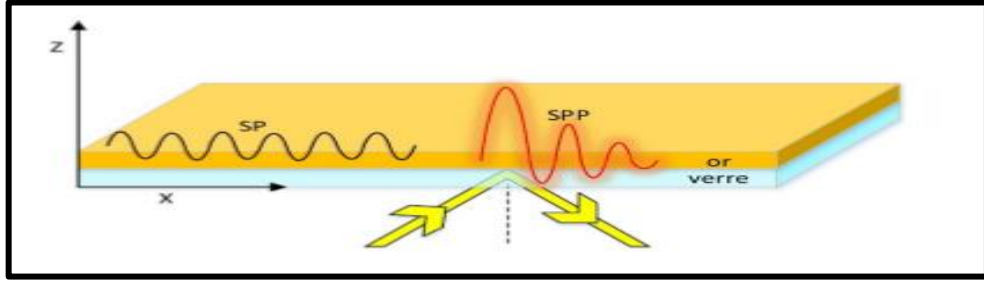


Figure I.1 : Schématisation des plasmons de surface (SP) à l'interface métal-diélectrique (plan X-Z) et propagation des polaritons de plasmon de surface (SPP) lorsqu'excités par une lumière polarisée TM. Le plan XY est perpendiculaire au plan XZ.

De ce fait, les SP sont des ondes dites transverses magnétiques (TM) ayant leur composante magnétique dans le plan XY du métal-diélectrique et perpendiculaire à la direction de propagation [18].

Le vecteur d'onde du SP (\mathbf{k}_{sp}) est défini à l'équation (I.10) où ω correspond à la fréquence angulaire, c à la vitesse de la lumière, ϵ_M et ϵ_S correspondent respectivement aux constantes diélectriques du métal et du milieu environnant le métal.

Une variation de ϵ_S , donc de l'indice de réfraction du milieu ($\epsilon_S = n_2$), affecte le couplage plasmonique et permet la détection de composantes près de la surface du capteur.

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m(\omega)\epsilon_D(\omega)}{\epsilon_m(\omega) + \epsilon_D(\omega)}} \quad (\text{I. 10})$$

Pour continuer, il est nécessaire d'utiliser une lumière polarisée TM (ou polarisée p) afin d'exciter les plasmons de surface du substrat plasmonique (e.g : film d'or). Le vecteur d'onde de la lumière (\mathbf{k}_x) est défini à l'équation (I.11) où λ correspond à la longueur d'onde.

$$k_x = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{I. 11})$$

Lorsque les conditions de couplage sont respectées, il y a un effet de résonance dû à une égalité entre \mathbf{k}_{sp} et \mathbf{k}_x . Par contre, les conditions de couplage ne sont jamais atteintes pour une surface infinie excitée avec de la lumière libre dans le vide (**Figure I.2**) [19].

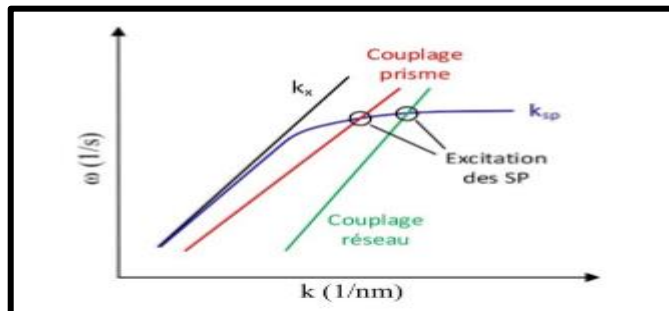


Figure I.2 : Schéma de la dispersion de k_x dans l'air (ligne noire) et de k_{sp} (courbe bleu), le couplage via un prisme (ligne rouge) ou un réseau (ligne verte) augmente k_x et permet l'excitation des SP.

En effet, dans ces conditions, le moment de k_{sp} sera toujours supérieur à celui de k_x . La **Figure I.2** démontre que le vecteur d'onde de la lumière est linéaire et ne croise jamais la courbe de k_{sp} .

Afin d'obtenir une résonance ($k_x = k_{sp}$), il est nécessaire d'augmenter le moment de k_x , en SPR, ceci peut être effectué en augmentant l'indice de réfraction à laquelle la lumière interagit avec les plasmons à l'aide d'un prisme.

Dans ce type de montage optique (configuration Kretschmann), la lumière traversant le prisme est dirigée en réflexion totale interne sur la surface du film d'or afin qu'une onde évanescente se couple avec les SP.

L'utilisation d'un prisme change la définition du vecteur d'onde de la lumière selon l'équation (I.12) où n_D correspond à l'indice de réfraction du prisme et θ à l'angle d'incidence du photon.

$$K_S = \frac{2\pi}{\lambda} n_D \sin(\theta) \quad (I.12)$$

Une résonance est obtenue s'il y a égalité entre les équations (I.10) et (I.12). Ce qui peut être fait en modulant k_x selon un balayage de λ (si θ est fixe) ou θ (si λ est fixe). Le phénomène SPR s'observe ainsi par une absorption de la lumière par les SP pouvant être mesurés par spectroscopie (**Figure I.3**).

La longueur d'onde à laquelle la bande plasmonique absorbe la lumière est influencé par l'indice de réfraction du milieu environnant le capteur. Lorsque l'indice de réfraction (RI, refractive index) augmente, la bande plasmonique effectue un déplacement bathochromique. Ainsi, avec une chimie de surface adaptée, il est possible de détecter une grande variété de cibles chimiques ou biochimiques à l'aide d'un capteur plasmonique.

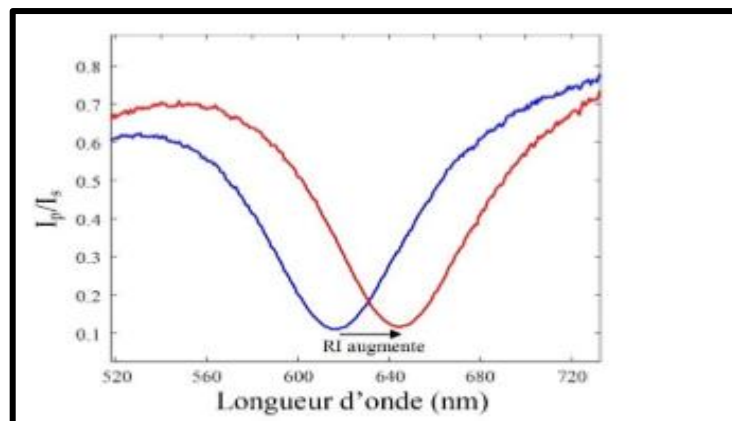


Figure I.3 : Déplacement bathochromique du signal SPR d'un film d'or suite à l'augmentation de l'indice de réfraction du milieu diélectrique. I_p/I_s correspond au ratio d'intensité de lumière polarisée p (I_p) et polarisée s (I_s).

Pour terminer, il est important de préciser qu'il existe une multitude de configurations optiques et de matériaux plasmoniques permettant d'exciter les SP. En effet, il est possible d'utiliser un réseau métallique afin d'augmenter le momentum de k_x (**Figure I.3**) pour obtenir un couplage avec les SP [19].

I.3.2.3. Type de plasmon de surface :

a- Plasmon de surface délocalisé :

Ce type de plasmon de surface se propage sur des surfaces métalliques planes. Des fluctuations longitudinales de la densité d'électrons de surface se propagent le long de l'interface diélectrique-métal de manière couplée avec une onde électromagnétique évanescente (**Figure I.4**).

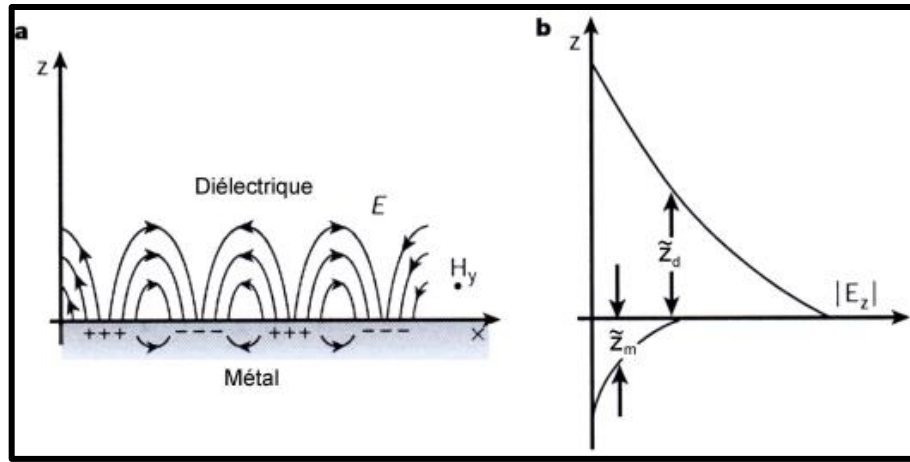


Figure I.4(a) : Vision schématique de la propagation des oscillations du plasma d'électrons libres à la surface du métal, **Figure I.4(b)** : Composante normale du champ électrique du plasmon de surface selon la direction z perpendiculaire à la surface [33].

Il a été établi, en appliquant les conditions de continuité des champs électrique et magnétique à l'interface diélectrique-métal, que ces ondes électromagnétiques, les plasmons, ne peuvent exister que pour une polarisation TM, et que leurs constantes diélectriques respectives doivent vérifier $\epsilon_m \epsilon_D < 0$ [33].

Cette excitation de surface obéit à la relation de dispersion suivante :

$$K_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m(\omega)\epsilon_D(\omega)}{\epsilon_m(\omega) + \epsilon_D(\omega)}} \quad (I.13)$$

Où K_{sp} désigne le vecteur d'onde de propagation du plasmon dans la direction \mathbf{X} , sur la surface métallique [20].

La **Figure I.5** représente la relation de dispersion I.13. On note que la courbe de dispersion des plasmons de surface reste toujours strictement en dessous de la courbe dite ligne de lumière, à laquelle correspond la relation de propagation dans le vide.

Cette absence d'intersection entre la ligne de lumière et la courbe de dispersion des plasmons de surface interdit tout couplage ou résonance entre une onde électromagnétique du domaine du visible en particulier, et un mode de propagation des plasmons de surface [34].

Pour exciter et observer des plasmons de surface, il faut donc se servir de systèmes optiques à géométrie particulière. Les plus utilisés sont des montages par prisme à indice n plus élevé que celui n_d du diélectrique, comme dans le cas d'une configuration Otto ou Kretschmann [21], confinant le plasmon de surface.

Une seconde méthode, largement répandue, consiste à structurer l'interface métal/diélectrique ramenant ainsi, par effet de diffraction par le réseau, les vecteurs d'onde au-dessus de la droite définie par $\omega = \frac{ck}{n_d}$ [20,21].

Il existe une autre forme de plasmons de surface qui eux peuvent être excités directement en éclairant le métal avec une source de lumière. Ces plasmons de surface sont dits plasmons de surface localisés.

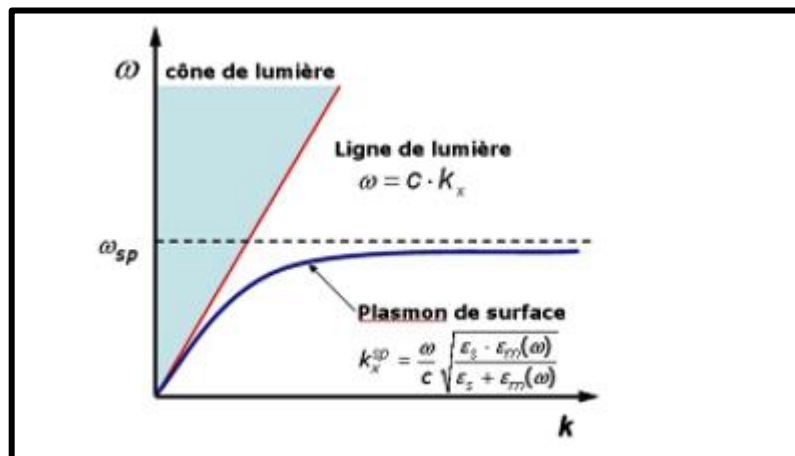


Figure 1.5 : Relation de dispersion des plasmons de surface [34].

b- plasmon de surface localisé :

Le plasmon de surface localisé (LSP) est une oscillation collective et cohérente de sélectrons de conduction à la surface d'une particule métallique de taille nanométrique sous l'action d'un champ électrique extérieur.

A l'inverse des plasmons de surface délocalisés, les LSP peuvent être directement excités par la lumière incidente (pas besoin de milieu de couplage) et sont confinés à l'échelle de la nanoparticule. Ces propriétés très intéressantes conférant aux LSP un grand intérêt de la part des nano-opticiens avec l'étude des effets de la taille, de la forme, de la nature de la nanoparticule et de la matrice diélectrique hôte (ou du substrat en cas de dépôt) sur la position et la largeur de la résonance plasmon de surface localisé (LSPR).

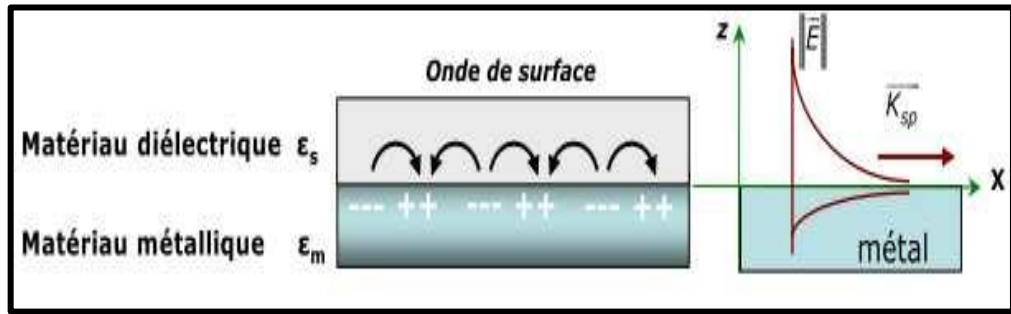


Figure I.6 : Schéma illustratif de la propagation des plasmons polaritons de surface à l'interface d'un métal et d'un diélectrique.

La bande de fréquence qui vérifie la relation $\epsilon(\omega) < 0$ est le siège de modes électromagnétiques de surface confinés que l'on nomme plasmons de surface. Ils apparaissent donc à des fréquences différentes de celles des plasmons de volume qui eux doivent satisfaire à la condition $\epsilon(\omega) = 0$. Ils ont pour origine une oscillation longitudinale de la densité des charges due aux électrons de la surface du métal.

Ces oscillations résonantes de densité de charge sont couplées à une onde électromagnétique appelée plasmon polariton ou phonon polariton suivant l'origine microscopique de cette onde : si l'on est dans un métal ou dans un matériau polaire respectivement. Considérons l'interface entre un milieu métallique de constante R_m et un milieu diélectrique de constante R_s [2].

Il existe des modes optiques longitudinaux dans ce plasma d'électrons libres qui sont des oscillations de la densité d'électrons et qui se propagent dans le métal avec un vecteur d'onde K_r dirigé dans le même sens que les oscillations (modes longitudinaux).

Physiquement un plasmon polariton de surface (PPS) correspond donc à une onde électromagnétique couplée aux oscillations collectives des électrons libres dans un conducteur, habituellement un métal, se propageant le long de l'interface métal diélectrique, comme représenté sur la **Figure I.6**.

Ce champ est maximum à l'interface et décroît exponentiellement dans les directions perpendiculaires. Comme tous les phénomènes résonants, le PPS champ proche est considérablement amplifié avec le champ lumineux incident [1].

I.3.2.4. Théorie de la LSPR :

Le phénomène LSPR correspond à une oscillation collective d'électrons à la surface d'une nanostructure composée d'un métal comme l'or ou l'argent (**Figure I.7**).

Les plasmons de surface localisée (LSP, localized surface plasmon) sont excités directement par un photon ayant une longueur d'onde plus grande que la taille de la nanostructure [35].

Les nanostructures sont généralement synthétisées en solution ou fabriqués sur un substrat de verre, tels que les nanosphères, nanotriangles, nanofils, nanobâtonnets, etc.

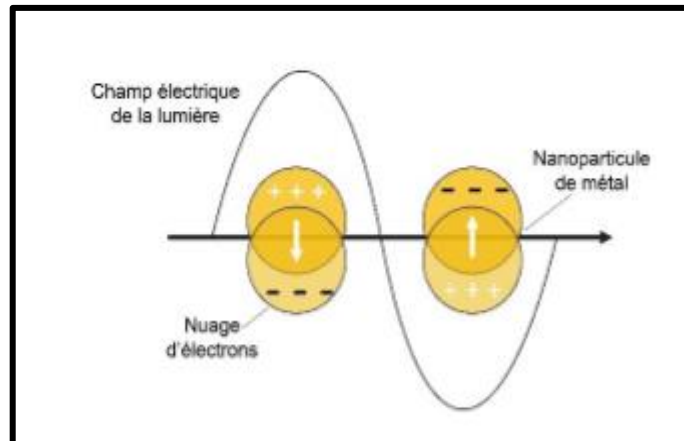


Figure I.7 : Schéma du phénomène de résonance des plasmons de surface localisés.

Ainsi, il y a résonance lorsque le champ électromagnétique de la lumière se couple avec les électrons oscillant à la surface de la nanostructure [36], cette résonance de la nanostructure génère une forte absorption et diffusion des photons incidents.

Le plasmon de surface d'une nanoparticule entre en résonance à une ou des longueurs d'onde spécifiques comme démontré par l'équation (1.14).

$$E(\lambda) = \frac{24\pi N \alpha^3 \epsilon_s^{3/2}}{\lambda \ln(10)} \left[\frac{\epsilon_i(\lambda)}{(\epsilon_r(\lambda) + \chi \epsilon_s)^2 + \epsilon_i(\lambda)^2} \right] \quad (I.14)$$

Dans cette équation, $E(\lambda)$ est l'extinction à une λ spécifique, N est le nombre de particules, α est la taille, χ est le facteur de forme, ϵ_r et ϵ_i correspondent respectivement à la constante diélectrique réelle et imaginaire du métal.

Ainsi, l'intensité et la fréquence du signal LSPR (absorption ou dispersion) dépend énormément de la forme, de la taille, de la composition de la nanoparticule et de l'indice de réfraction du milieu environnant [37].

De plus, la LSPR génère un champ plasmonique intense confinée sur une distance de 10 à 40 nm de la surface de la nanostructure [38].

I.3.2.5. Performance et limitations de la LSPR :

Tout d'abord, grâce aux caractéristiques fondamentales de la LSPR, les nanostructures ont énormément d'applications en tant que biocapteur plasmonique [38].

En effet, les capteurs LSPR peuvent être excités directement par la lumière ce qui simplifie énormément leur instrumentation optique. Ainsi, l'utilisation de nanostructures permettrait le développement de plateformes miniaturisées pouvant effectuer du multiplexage [14].

Pour continuer, les nanostructures ont des coefficients d'absorption molaire si élevés qu'il est possible d'observer leurs changements de couleur à l'œil nu [36]. D'ailleurs, une étude a démontré que la dispersion provenant d'une seule nanoparticule d'argent (80 nm de taille) était équivalente à la dispersion de 106 fluorophores [37].

Cette particularité des nanoparticules en fait des substrats plasmonique idéaux pour la technique SERS. De plus, les nanoparticules ont l'avantage de ne pas être affectées par des effets de photoblanchiments à l'instar des fluorophores. Ainsi, les nanoparticules métalliques ont beaucoup d'applications en tant que marqueur pour des études d'imageries biologiques [9].

D'ailleurs, puisque l'excitation des nanoparticules génère de la chaleur, ces dernières sont très utilisées pour des études de photothérapies thermiques du cancer [10].

Tel que mentionné précédemment, la fréquence d'oscillation d'une nanostructure est directement reliée à l'indice de réfraction du milieu l'environnant. Ainsi, le greffage d'un ligand sur la nanoparticule permet de détecter une multitude de cibles chimiques ou biologiques. La sensibilité en solution des capteurs LSPR (~100-500 nm/RIU) est très faible par rapport à la SPR (~3000 nm/RIU).

Par contre, de nombreuses études ont démontré que la sensibilité de la LSPR pour la détection de protéines était similaire à celle de la SPR. [30,40] Ceci s'explique par l'intense confinement localisé du champ plasmonique autour de la nanostructure [35]. C'est pourquoi il faut distinguer la sensibilité en solution d'un capteur de sa sensibilité en surface [41].

Pour terminer, certains défis doivent être résolus afin de favoriser le développement de plateformes de bioanalyse basées sur la LSPR. En effet, malgré ses avantages, la LSPR est limitée à un certain nombre d'études par sa sensibilité. Ce faisant, de nombreuses recherches portent sur le développement de nouvelles nanostructures offrant de meilleures performances de détection.

Par contre, le défi est aussi de développer ces structures nano-plasmoniques à faible cout et à grande échelle. De plus, la bio-fonctionnalisation des nanostructures est considérée comme leur talon d'Achille [14, 17].

En fait, l'impact de la chimie de surface menant à la détection d'un analyte via la reconnaissance biologique est souvent sous-estimé dans la littérature. Par exemple, les nanoparticules en solution sont sujettes à des effets d'agrégations indésirables dépendamment du milieu environnant. L'analyse de biomolécules en transmission dans un milieu complexe est compliquée par des effets de bio-adhésion (biofouling) à la surface de la nanostructure.

Finalement, malgré son potentiel, peu d'instruments basés sur les capteurs LSPR ont été développés afin d'effectuer du criblage à haut débit [14].

I.4. Modèles théoriques de calcul des plasmons de surface :

Quand une particule est sous l'action d'un champ électromagnétique, ses électrons se mettent à osciller transformant ainsi une partie de l'énergie de l'onde incidente par un processus d'absorption. Ces mêmes électrons peuvent être accélérés et émettre une énergie par un processus de diffusion.

L'atténuation du faisceau incident d'intensité I_0 sera alors caractérisée par la section efficace d'extinction σ_{ext} ³ donnée par :

$$\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{diff} = \frac{W_{abs} + W_{diff}}{I_0} \quad (I. 15)$$

Où W_{abs} et W_{diff} représentent respectivement la puissance absorbée et diffusée par la particule, et σ_{abs} ⁴ et σ_{diff} ⁵ les sections efficaces d'absorption et de diffusion respectivement [20].

Le choix d'un modèle de calcul de ces sections efficaces est dicté par la taille de la nanoparticule par rapport à la longueur d'onde de la lumière incidente.¹

3. Surface fictive représentant la capacité d'une particule à enlever des photons d'un faisceau incident [1].

4. Section géométrique fictive d'une particule totalement opaque absorbant le même nombre de photons que la particule étudiée [1].

5. Section géométrique fictive d'une particule totalement diffusive qui a la même efficacité de diffusion que la particule étudiée [1].

I.4. La résonance de plasmons de surfaces :

I.4.1. Le principe :

Lorsque la lumière incidente est dirigée à un certain angle (angle de résonance) sur un métal riche en électrons libres tel que l'or ou l'argent, les photons provoquent une oscillation des électrons libres appelée Résonance Plasmonique de Surface (SPR).

Ces oscillations se caractérisent par une onde évanescente dont l'amplitude diminue exponentiellement depuis la surface sur une distance maximale de 200 nm (**Figure I.7**) [42, 43,44].

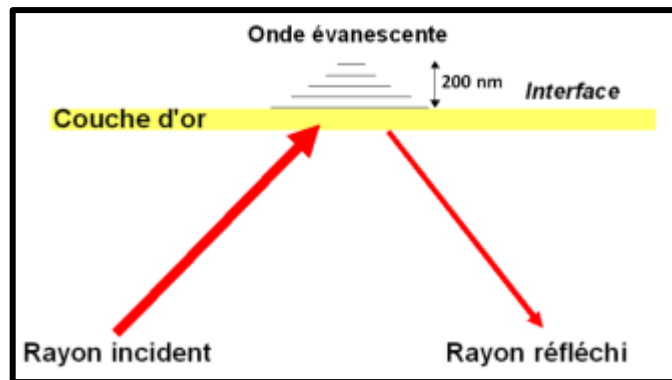


Figure I.8 : La formation de l'onde évanescente.

L'onde évanescente est le point central des mesures d'interactions. En effet, une perturbation de l'onde évanescente, consécutif à l'interaction de biomolécules sur la surface va induire une diminution de l'angle de résonance directement mesurable [45,46].

Deux stratégies sont alors envisageables (**Figure I.8**). 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) [47].

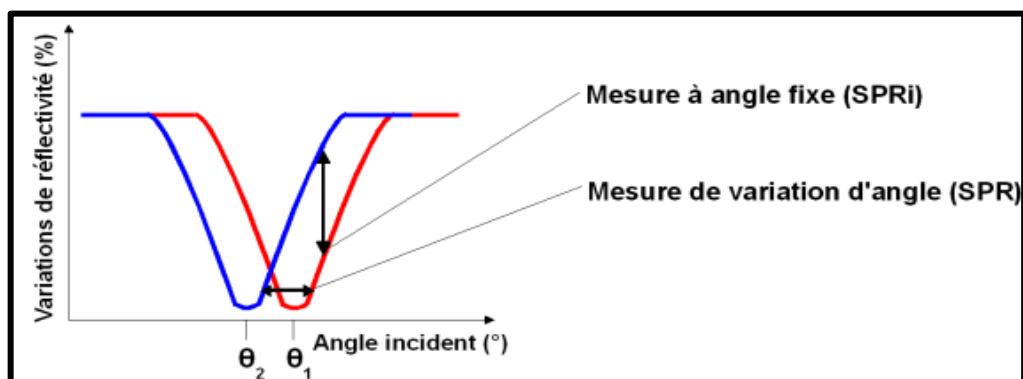


Figure I.9 : Relation entre angle de résonance et mesure du signal en SPR et SPRi.

I.4.2 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 $\tilde{\epsilon}_m$ dont la partie réelle est négative dans le domaine visible [1].

Pour étudier les plasmons de surface, il est intéressant de tracer sur un graphique 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 [48]. 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.10**).

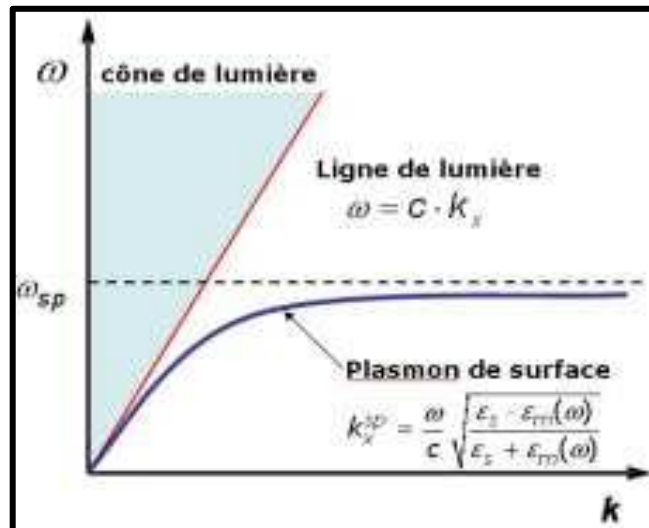


Figure I.10 : Relation de dispersion des plasmons de surface.

La **Figure I.10** 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 $k = \omega/c$ [1].

Nous remarquons que la relation de dispersion des plasmons de surface reste toujours strictement en dessous de la ligne de lumière (**Figure I.10**). 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.5. Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons apporté des définitions et des notions de bases ainsi qu'une bref historique associées aux plasmoniques. Nous avons vu les deux classes du plasmon : plasmon de surface et ces deux types : plasmon de surface localisé et délocalisé, et la deuxième classe qui 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. À la fin de ce chapitre, nous avons présenté La résonance de plasmons de surfaces et son principe ainsi que la dispersion des plasmons de surface.

Chapitre **II**

Filtre à base plasmoniques

II.1. INTRODUCTION :

Un filtre optique transmet de manière sélective une partie du spectre optique et en rejette d'autres. Les filtres optiques sont couramment utilisés en microscopie, spectroscopie, analyse chimique et vision industrielle. Plusieurs types et niveaux de précision de filtres sont disponibles.

Bien que les filtres partagent de nombreuses spécifications avec d'autres composants optiques, il existe un certain nombre de spécifications uniques propres aux filtres devant être connues et comprises pour pouvoir déterminer le filtre le mieux adapté à votre application.

Ce chapitre présente les bases théoriques nécessaires qui permettent la compréhension des notions générales des filtres optiques, puis nous avons décrit les résonateurs d'anneau et les cavités, Enfin nous présenterons les principes des filtres optiques à base plasmonique et les structures MIM, IMI.

II.2. Les Filtres optiques :

Les filtres optiques servent à transmettre des bandes spectrales de largeur déterminée dans un spectre continu. Ils sont fondés sur différents types de phénomènes comme par exemple la réflexion, les interférences à ondes multiples, les interférences en lumière polarisée [49].

La caractéristique fondamentale d'un filtre est son facteur de transmission T . Soit ϕ_0 le flux lumineux incident et ϕ le flux transmis par le filtre, on appelle « facteur de transmission T » le rapport du flux transmis au flux incident [50] :

$$T = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (\text{II} - 1)$$

Naturellement le facteur de transmission T est toujours inférieur à l'unité. Plus T est voisin de 1 et plus le filtre est lumineux. La caractéristique la plus importante d'un filtre optique est sa transmission spectrale c'est-à-dire la variation de son facteur de transmission en fonction de la longueur d'onde λ . Les caractéristiques les plus importantes des filtres optiques sont énumérées dans le tableau :

Symboles	Spécifications
N	Nombre de canaux
$\Delta\lambda$	Plage d'accord
$\delta\lambda$	Bande passante à mi-hauteur
Taux d'accord	Plage de déplacement de la longueur d'onde filtré
Taux de réjection	Rapport signal sur bruit (S/B)
λ_0	La longueur d'onde centrale du filtre
τ	Temps de commutation

Tableau II.1 : Les caractéristiques d'un filtre optique [51].

II.2.1. Filtres actifs AF (Active Filter) :

Le fonctionnement d'un FP, d'un DFB ou d'un DBR en dessous de son seuil produit un filtre avec du gain. Le fonctionnement du laser en dessous de son point de seuil produirait un filtre efficace (par le résonateur) avec un gain supplémentaire. Des filtres actifs ont démontré de bons résultats avec FP, DFB et des lasers DBR. Les inconvénients de ces dispositifs sont la stabilisation de température, le bruit d'émission spontané, la dépendance de polarisation et le comportement non-linéaire causé par la saturation de gain, entre autres [52].

II.2.2. Micro-résonateur en anneau RS (Ring Resonator) :

Les micros résonateurs en anneau représentent une classe de filtres ayant des caractéristiques similaires aux filtres Fabry-Pérot. Cependant, ils offrent l'avantage que les signaux incidents et réfléchis sont séparés dans des guides d'ondes différentes, et que, leur conception est relativement simple par rapport à leur homologue. De plus leur taille réduite (avec des diamètres qui ne dépassent pas les dizaines de micro-mètres), et leurs caractéristiques de filtre en font des dispositifs particulièrement attractifs pour l'optique intégrée. Les RS sont utilisés pour des applications de filtrage, des lignes à retard, des multiplexeurs à insertion/extraction [53].

II.3. Le résonateur en anneau :

La proposition d'utiliser un résonateur annulaire intégré pour un filtre passe-bande a été faite en 1969 par E. A. Marcatili. La structure du filtre de chute de canal est illustrée à la **Figure II.1**. Les propriétés de transmission du guide utilisé consistant en une tige diélectrique de section transversale rectangulaire, entourées de plusieurs diélectriques d'indices de réfraction plus faibles, ont été décrites par E. A. Marcatili dans [54].

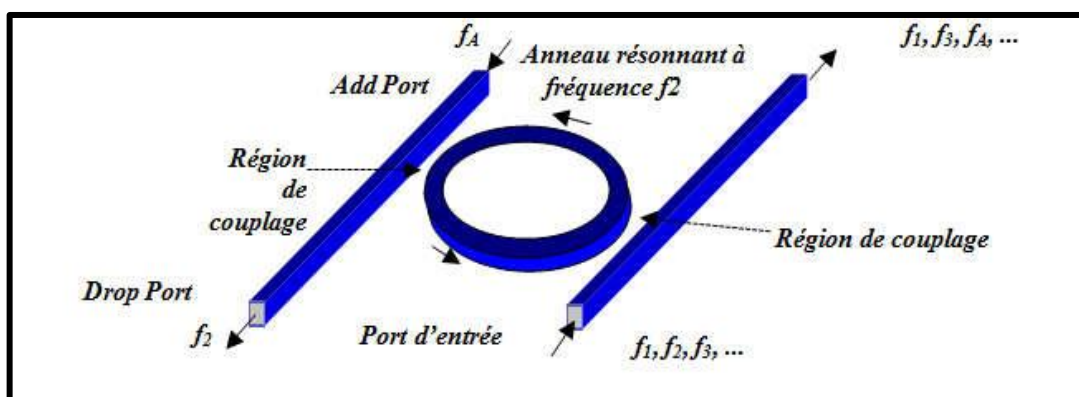


Figure II.1 : Filtre de suppression de canal de résonateur en anneau.

II.3.1. Attributs des résonateurs en anneaux :

Lorsqu'on parle des résonateurs en anneaux, on se réfère souvent à plusieurs quantités décrivant des attributs spécifiques du résonateur. Il existe deux caractéristiques importantes des résonateurs : la finesse **F** et le facteur de qualité **Q**.

II.3.1.1. Facteur de qualité :

Le facteur de qualité (**Q**) est une grandeur utilisée pour exprimer le confinement temporel de l'énergie dans un résonateur. Plus la lumière demeure dans le résonateur (avant d'en sortir), plus le facteur de qualité est élevé, et meilleur est le résonateur. Peut être défini en fonction de celle-ci par la relation [55][56] :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda} = \frac{\omega_r}{\Delta\omega} \quad (\text{II-2})$$

Avec λ_r le rapport entre la longueur d'onde centrale e résonance et de sa largeur à mi-hauteur $\Delta\lambda$ (full width at half maximum, FWHM) et ω_r La fréquence à la résonance.

Le facteur de qualité est inversement proportionnel au FWHM, ce qui implique qu'une résonance étroite dans le domaine fréquentiel correspond à un résonateur à faibles pertes.

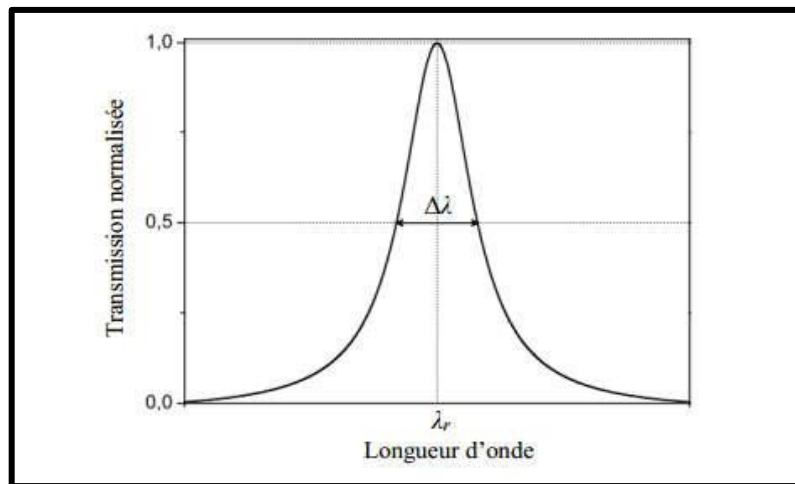


Figure II.2 : Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.

II.3.1.2. Finesse :

En plus du facteur de qualité, une autre mesure communément utilisée est la finesse (**F**) du résonateur. Elle est définie comme le rapport entre l'intervalle spectral libre (**ISL**) : la distance entre deux pics) et la largeur à mi-hauteur ($\Delta\lambda$) d'une résonance :

$$F = \frac{ISL}{\Delta\lambda} \quad (\text{II-3})$$

La finesse est d'autant plus grande que les pics sont étroits. Elle se rapporte au nombre de passages du champ dans le résonateur, ainsi, pour des résonateurs de haute finesse, le champ intra-résonateur peut être très élevé, ce qui favorise l'apparition d'effets non-linéaires. [55][56].

ISL : Free spectral range (FSR), L'ISL correspond à un intervalle en longueur d'onde à partir duquel deux longueurs d'onde espacées de ce même intervalle et injectées dans la même fibre d'entrée vont être orientées dans la même fibre de sortie [2]. Il est aussi défini comme étant la bande de fréquence pour laquelle le déphasage est égal à $\beta\pi$ [1λ].

II.3.2. Les applications d'un résonateur en anneau :

Il existe un large éventail d'applications pour l'utilisation de résonateurs en anneau, cette section est un moyen de mettre en évidence quelques exemples d'utilisation des résonateurs en anneau.

- ✚ La première application est l'utilisation de ces résonateurs en anneau couplés dans des lignes à retard optique [57], qui fournissent un retard dans le temps pour un signal optique. Dans les systèmes de communication optiques multiplexés par répartition dans le temps (OTDM), par exemple, cette fonction est requise à des fins de synchronisation. Dans les démultiplexeurs OTDM et dans les portes logiques optiques, par exemple, les signaux de commande locaux doivent se chevaucher dans le temps avec les signaux de données entrants.
- ✚ Un autre domaine important est l'utilisation des résonateurs en anneau pour la compensation de dispersion flexible. La dispersion chromatique est provoquée par une variation de la vitesse de groupe de la lumière se propageant dans une fibre avec des modifications de la fréquence optique. Une impulsion de données contient toujours un spectre de longueurs d'onde. Lorsque l'impulsion se déplace le long de la fibre, les composantes de longueur d'onde les plus courtes se déplacent plus rapidement (dispersion négative) que les composantes de longueur d'onde plus longues (dispersion positive). Cet effet élargit les impulsions et les fait interférer avec les impulsions voisines et déforme le signal de transmission. Les compensateurs de dispersion pratiques doivent avoir une accordabilité limitée, une perte d'insertion uniforme lors de l'ajustement de la dispersion et un fonctionnement à plusieurs longueurs d'onde. Les résonateurs en anneau peuvent être utilisés pour augmenter la longueur physique en forçant la lumière à traverser la distance physique plusieurs fois. L'amélioration de la résonance, cependant, se fait au prix d'une bande passante finie. Plus l'amélioration est importante, plus la bande passante est étroite. Les résonateurs en anneau permettent une compensation importante pour plusieurs longueurs d'onde simultanément dans une plage de fréquences jusqu'ici limitée [58]. Le bloc constitutif d'un compensateur de dispersion à plusieurs étages utilisant des résonateurs en anneau est illustré à la **Figure II.3**. Le retard de groupe du résonateur en anneau suit une courbe périodique. La mise en cascade de plusieurs boucles permet la synthèse de diverses courbes de retard.

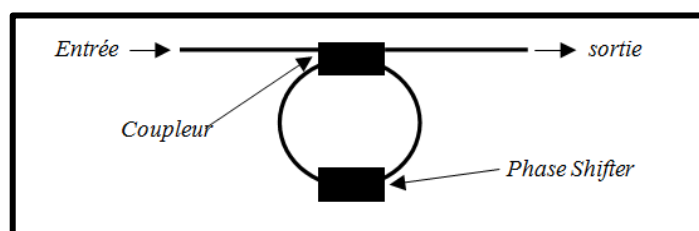


Figure II.3 : Résonateur à anneau unique (SRR) comme élément constitutif des compensateurs de dispersion multi-étages.

- ✚ L'intégration d'un résonateur en anneau avec un interféromètre de Mach-Zehnder a été réalisée récemment pour une utilisation en tant que filtre coupe-bande compact et en tant que multi / démultiplexeur périodique [59]. Dans le cas du filtre coupe-bande, la perte aller-retour dans l'anneau est faible comparée à la force de couplage du guide d'ondes. L'anneau introduit un déphasage dû à la résonance sur le guide d'ondes couplé latéralement. Les résonateurs à anneau unique couplés à un guide d'onde qui sont présentés dans cette thèse peuvent être utilisés comme filtres coupe-bande avec un rapport d'activation / désactivation supérieur à 20 dB [60].
- ✚ Les résonateurs en anneau couplés verticalement sont également des candidats possibles pour la réalisation de filtres add / drop. Les dispositifs basés sur le couplage latéral nécessitent l'utilisation de technologies de fabrication avancées pour obtenir des largeurs de bande de filtre reproductibles et une efficacité de suppression élevée. Un autre moyen de coupler le résonateur en anneau au guide d'onde est le couplage vertical [61]. La séparation sensible entre le résonateur en anneau et les guides d'ondes de bus est contrôlée par la croissance ou le dépôt de matériau permettant la fabrication d'espaces vides $<0,3 \mu\text{m}$. La technologie de couplage vertical utilisée jusqu'à présent concerne principalement les dispositifs passifs.

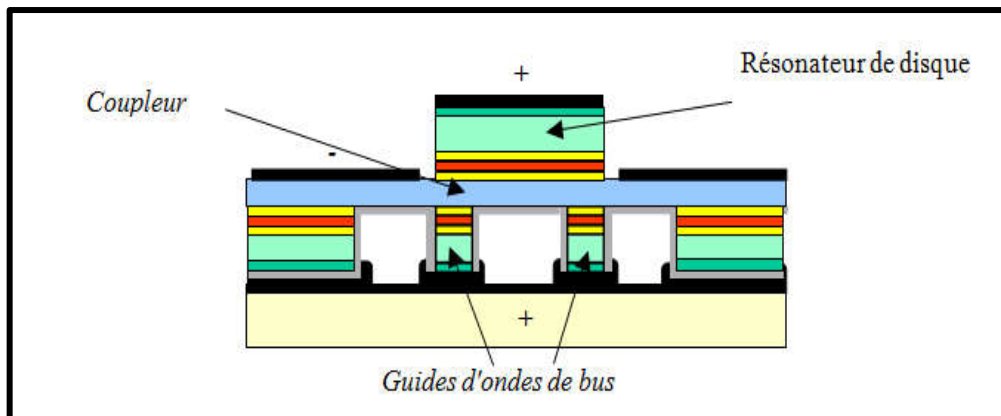


Figure II.4 : Résonateur à micropores tout actif couplé verticalement.

- ✚ Une expérience de transmission multiplexée par division de fréquence (FDM) utilisant une DRR a été présentée dans L'expérience a été réalisée en utilisant 8 canaux à un débit de données de 622 Mb / s avec un espacement de canal de 10 GHz. Le DRR utilisé avait un FSR d'environ 100 GHz. Selon les auteurs, il s'agit d'une des premières expériences de transmission utilisant des résonateurs en anneau. Récemment, une expérience de transmission à 5 Gbit / s utilisant une microsphère comme dispositif d'addition / extraction a été rapportée [62].

II.3.3. Résonateurs à anneau couplé - théorie et modèle de simulation :

Les résonateurs en anneau actifs et passifs sont des candidats prometteurs pour les applications de filtrage en longueur d'onde de routage de commutation de modulation, de conversion [63] et de multiplexage / démultiplexage. Les résonateurs en anneau ne nécessitent pas de facettes ni de réseaux pour le retour optique et sont particulièrement adaptés à l'intégration monolithique avec d'autres composants [64].

La forme de la bande passante des filtres à résonateur en anneau peut être conçue en utilisant plusieurs résonateurs couplés. La caractéristique du filtre (forte décroissance, sommet plat et contraste élevé > 20 dB) dépend du flux d'énergie dans les résonateurs qui définit la forme de filtre souhaitée. Il est nécessaire de réaliser des flancs de guide d'onde lisses pour de faibles pertes de guide d'onde [65], des courbures gravées profondes pour de faibles pertes de flexion et des dimensions précises du guide d'onde pour la répartition de la puissance. La réjection hors-bande et la réjection hors bande plus raides nécessitent des résonateurs à micro-anneaux en cascade [66].

La mise en œuvre de SOA dans le résonateur en anneau ouvre la possibilité d'ajuster le flux d'énergie pour une réponse optimale. L'adaptation de la fréquence de résonance de chaque anneau dans plusieurs résonateurs à anneau couplés est inévitable pour obtenir la caractéristique de filtre souhaitée. La fonction principale d'un résonateur à anneau unique (SRR).

Le résonateur **Figure II.5** n'est pas en résonance avec la longueur d'onde insérée au port d'entrée. La longueur d'onde passe et peut être détectée au port de débit. La quantité de lumière qui pénètre dans le résonateur en anneau dépend du facteur de couplage du coupleur utilisé.

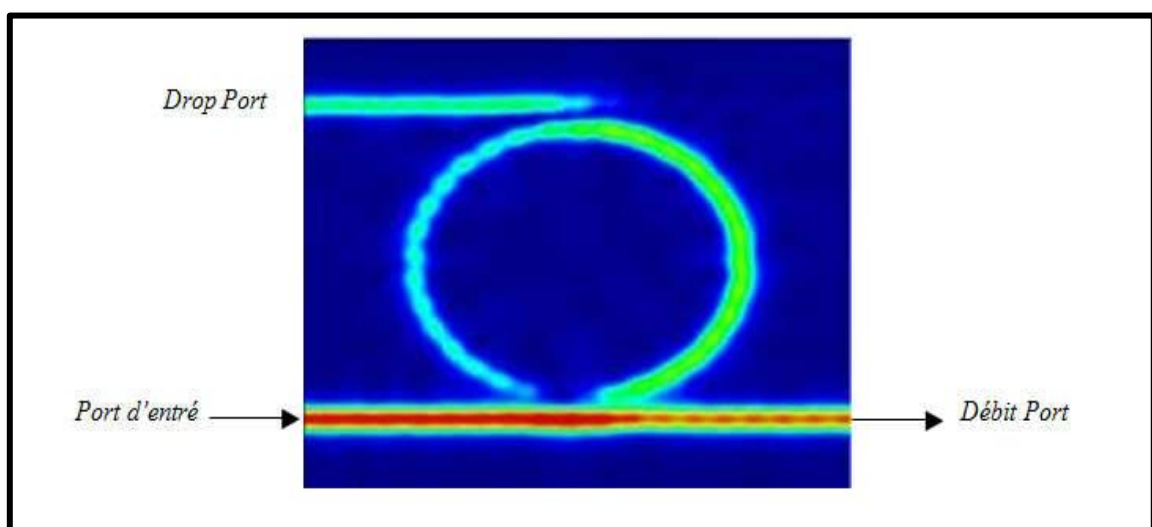


Figure II.5 : Résonateur en anneau à une longueur d'onde de $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

II.4. Les cavités optiques :

La cavité optique a été un sujet de grand intérêt car elle est un bloc fonctionnel essentiel pour le filtrage, la modulation, la mise en mémoire tampon et la commutation pour le traitement optique intégré en nanophotonique [67-68].

Les cavités optiques peuvent également être appliquées dans le domaine du traitement de l'information quantique [69], de l'optomécanique [70], de la détection [71], etc. D'une manière générale, les cavités optiques peuvent être classées en deux groupes : cavités à ondes stationnaires (SW) et en déplacement cavités à ondes (TW). Les deux types de cavités ont fait l'objet de recherches approfondies.

II.4.1. La différence entre TW et SW :

Une cavité, par exemple, est traitée comme un oscillateur dans le temps. Pour une cavité SW couplée à un guide d'ondes, son mode de cavité se désintègre également dans le mode guide d'ondes à propagation avant et arrière.

Tandis que pour une cavité TW, le mode de la cavité se désintègre dans une seule direction en raison de l'adaptation d'impulsion [71].

II.4.2. Caractériser une cavité :

Un système global est décrit en termes d'un ensemble de composants faiblement couplés, dont chacun peut être analysé en utilisant des principes généraux, Pour caractériser une cavité, nous définissons les paramètres suivants : ω_0 (λ_0) est la fréquence de résonance (longueur d'onde), α est l'amplitude du mode de la cavité : $S_i / S_t / S_r / S_a$ sont les amplitudes du mode guide d'ondes incident / transmis / réfléchi / abandonné, qui sont normalisées de telle sorte que leurs valeurs au carré correspondent à la puissance incidente / transmise / réfléchie / perdue, $1/\tau_i$ et $1/\tau_w$ sont des taux de décroissance dus respectivement à la perte intrinsèque et à la perte de couplage du guide d'ondes, Q_i et Q_w sont des facteurs de qualité de cavité liés respectivement à la perte intrinsèque et à la perte de couplage du guide d'ondes; Q_t est le facteur de qualité totale.

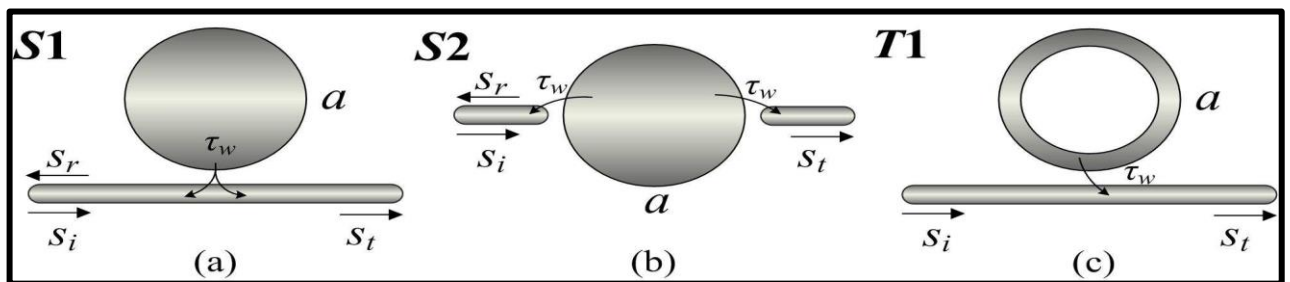


Figure II.6 : Schémas de cavités individuelles. (a) et (b) sont des cavités SW avec une configuration d'accouplement latéral et d'accouplement d'épaulement désignées par S1 et S2, respectivement. (c) est une cavité TW notée T1 [71].

II.5. Couplage optique

Nous pouvons remarquer sur la **Figure II.4** que la courbe de dispersion du plasmon de surface se situe sous le cône de lumière. Il ne sera donc jamais possible d'exciter le plasmon de surface directement avec une onde lumineuse depuis l'air. Il existe cependant plusieurs méthodes permettant de coupler le plasmon de surface avec une excitation lumineuse.

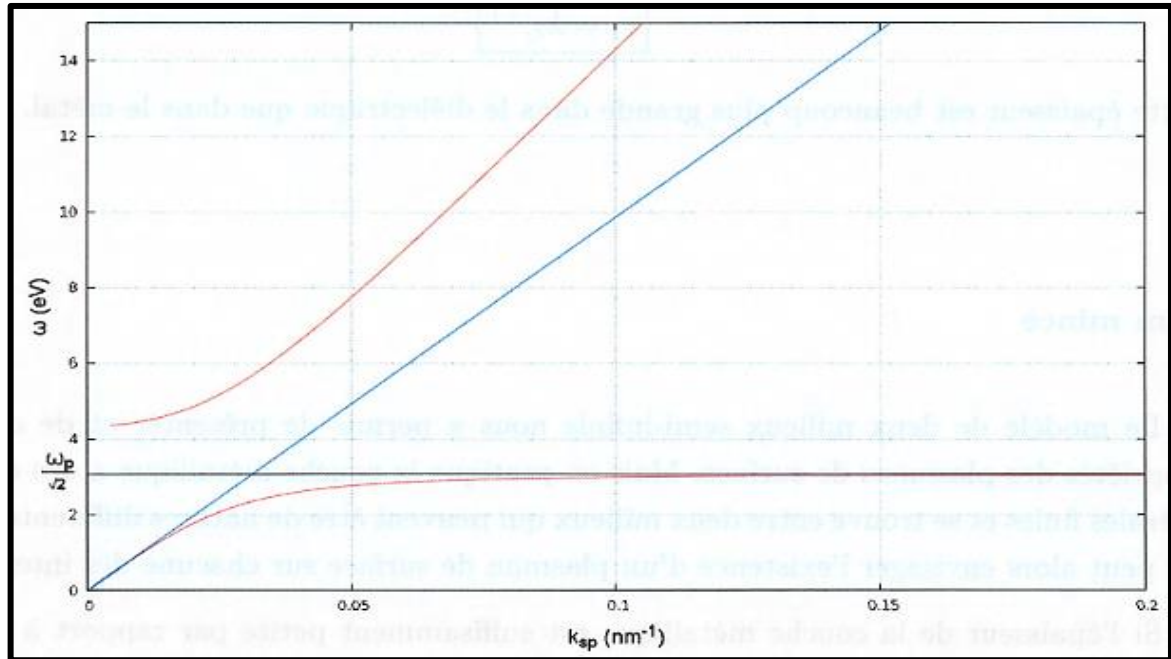


Figure II.7 : Courbe de dispersion du plasmon de surface avec le modèle de Drude. En rouge la relation du plasmon de surface, en bleu le cône de lumière dans l'air et en noir l'asymptote du plasmon de surface à $\omega = \omega_p / \sqrt{2}$.

II.5.1. Les configurations d'excitation principales d'une onde plasmon de surface :

Le principe est le même pour toutes les configurations. Lorsqu'il y a égalité des indices effectifs des ondes lumineuses et plasmons de surface, le couplage est réalisé et cela se traduit par une perte d'énergie du faisceau lumineux, dissipée sous forme de chaleur [72].

II.5.1.1. 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 II.8** 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 [72].

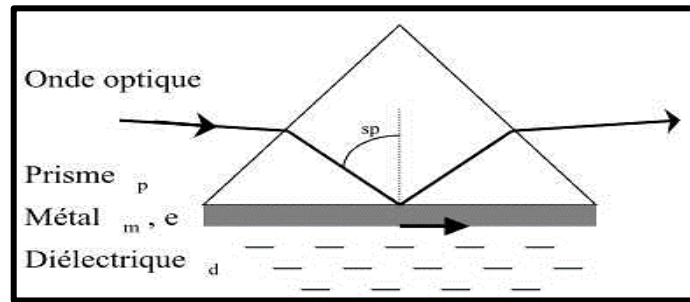


Figure II.8 : Couplage par prisme (méthode ATR).

II.5.1.2. 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 [73].

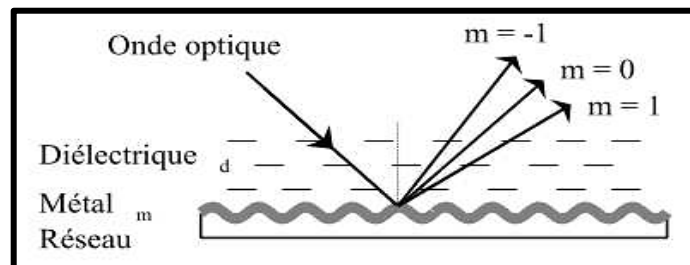


Figure II.9 : Couplage par réseau de diffraction.

II.5.1.3. 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.

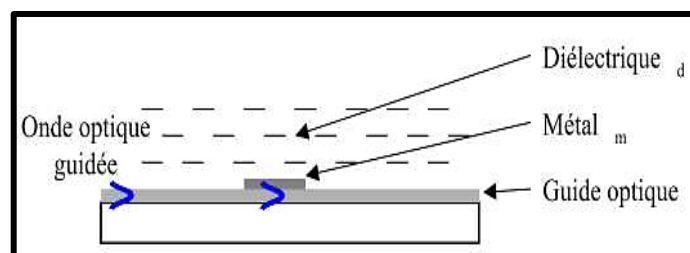


Figure II.10 : Couplage par un guide d'onde optique.

II.6. Synthèse de filtres optiques à l'aide de résonateurs en anneau :

La synthèse de filtres à résonateur en anneau concaténés en série ou en parallèle a déjà été décrite en 1988 et réalisée à l'aide de fibres optiques. La synthèse de divers types de filtres optiques utilisant des résonateurs en anneau a récemment attiré l'attention [74]. L'objectif est la réalisation d'une forme de filtre en forme de boîte et d'un rapport d'activation / désactivation élevé.

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, ce qui n'est pas le cas en réalité.

La fréquence de résonance des résonateurs en anneau à couplage doit être adaptée pour surmonter les tolérances de fabrication et obtenir la forme de filtre souhaitée. Du point de vue des auteurs, un filtre à résonateur en anneau composé de plus de trois ou quatre résonateurs en anneau fabriqués à l'aide de la technologie de pointe actuelle n'est pas praticable.

II.7. Les filtres optiques à base plasmonique :

Les polaritons de plasmons de surface (SPP) sont des ondes électromagnétiques de surface se propageant à l'interface métal – diélectrique et se confinant de manière évanescente dans la direction perpendiculaire de l'interface. Les guides d'ondes plasmoniques transfèrent les ondes électromagnétiques couplées à la surface des oscillations collectives d'électrons libres sur des métaux qui ont été considérés comme supports d'énergie et d'information en nanophotonique. Deux des guides d'ondes plasmonique multicouches bien connus sont métal – isolant – métal (MIM) et isolant – métal – isolant (IMI) structures [75]. Parmi les différents guides d'ondes à base de SPP, métal – isolant – métal (MIM).

Les filtres optiques, l'un des éléments constitutifs des circuits optiques intégrés, ont attiré l'attention considérable. Différents types de filtres plasmoniques, tels que les topologies en forme de dent en sous-longueur d'onde et en gouttes additionnelles, sont introduits et analysés par des méthodes numériques. De plus, les filtres à résonateur en anneau génèrent des ondes stationnaires en opposition de phase en utilisant des cavités optiques, à utiliser comme suppresseur de certaines longueurs d'onde ciblées dans le spectre de transmission [76]. Alors on distingue deux catégories de structures plasmoniques pour le filtrage et on s'intéresse par la structure MIM.

II.7.1. Structures Métal-Isolant-Métal (MIM)

Les Structures MIM sont des structures répandues dans le domaine de la nanophotonique. Des applications remarquables on peut citer notamment : les guides d'ondes plasmoniques, Généralement capables de fournir efficacité d'absorption élevée sur tout le spectre IR, en fonction des dimensions des structures et sur l'épaisseur de la cavité diélectrique.

Ces dispositifs sont généralement fabriqués avec une matrice de plaques isolantes métalliques reposant sur une couche métallique continue [77].

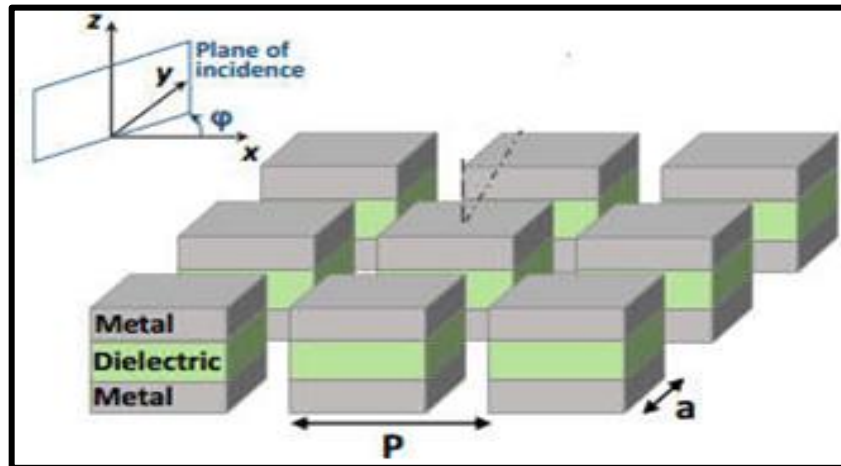


Figure II.11 : Schéma d'un filtre MIM typique avec une matrice carrée (période P) de patches carrés (taille a).

II.7.2. Structures Isolant-Métal-Isolant (IMI) :

Outre le guide d'onde MIM, il existe une autre hétérostructure à trois couches : un métal mince couche prise en sandwich entre deux gaines diélectriques, appelée isolant - métal - isolant (IMI) guide d'ondes, comme indiqué à la **Figure II.12** [78].

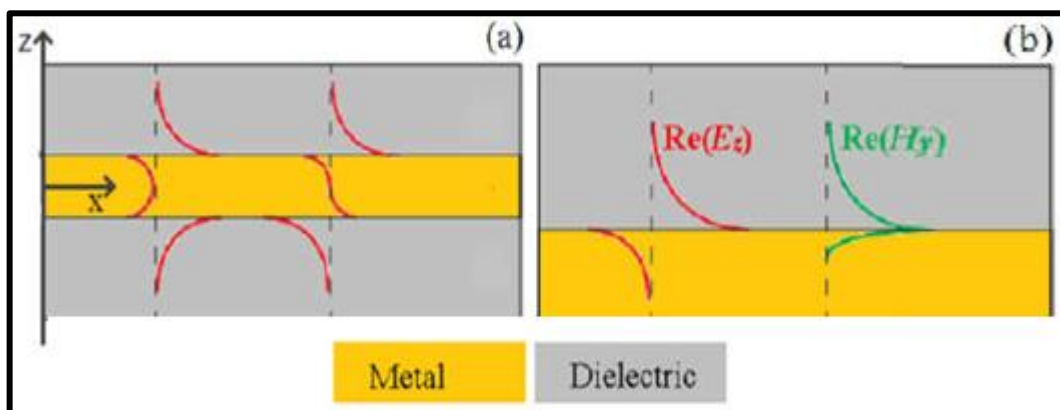


Figure II.12 : Vues schématiques de (a) une configuration IMI et (b) d'une seule interface métal-diélectrique. Les lignes rouges indiquent $Re(E_z)$, tandis que les lignes vertes représentent $Re(H_y)$.

II.8. 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.

II.8.1. 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 [79][80].

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 [79].

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 [79].

d- L'administration des médicaments :

Le médicament est revêtu d'une enveloppe constituée d'un polymère sur lequel des nanoparticules d'or, fonctionnalisées du côté 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 [79].

II.8.2. 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.

En effet, des nanoparticules métalliques peuvent être placées sur la surface du dispositif et diffuser la lumière arrivant en incidence normale le long des couches absorbantes, mais aussi, elles peuvent être disposées à l'interface des jonctions pour améliorer l'efficacité d'absorption.

II.8.3. 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 [79].

II.8.4. 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 [80].

II.8.5. 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 [81-82].

II.9. Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, Nous avons commencé par quelques généralités et caractéristiques des filtres optiques ainsi que ses différents types, Ensuite nous avons parlé du résonateur en anneau et son large éventail de ses applications et son fort potentiel des principales technologies dans le domaine optique. Après la définition et les applications des résonateurs en anneau, on a présenté quelques notions sur les cavités et le couplage optique.

La dernière partie de ce chapitre présente les filtres optiques à base plasmonique et les deux catégories de structures plasmoniques (MIM et IMI) dans le but de réaliser la structure MIM d'un filtre optique à base plasmonique dans le chapitre 3.

Chapitre

III

Outils de simulation et résultats et Interprétations

III.1. INTRODUCTION :

Le plasmon de surface est classiquement défini comme la variation de l'oscillation collective des électrons à l'interface d'un métal et d'un diélectrique. Les électrons oscillent alors à la fréquence de résonance ω_p (ou fréquence plasma). L'une des nanostructures à base plasmonique les plus largement utilisées pour la réalisation de circuits optiques intégrés est le schéma de guide d'ondes (WG) métal-isolant-métal (MIM). Les MIM sont des structures plasmoniques dans lesquelles un isolant est enfermé par deux revêtements métalliques. La conception simple et la capacité de ces groupes de travail à confiner la lumière au niveau de la sous-longueur d'onde sont les principales caractéristiques de ce système.

Le but de ce travail est la réalisation d'un filtre optique basé sur un résonateur d'anneau 2D à l'aide du logiciel de simulation Rsoft CAD développé par Rsoft en choisissant l'outil de simulation FULLWAVE qui est basé sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

III.2. Introduction au logiciel Rsoft CAD :

III.2.1. Préface :

Le RSoft CAD est le programme de base de RSoft Component Design Suite, et agit comme un programme de contrôle pour les modules de simulation d'appareils passifs de RSoft BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD, DiffractMOD, FemSIM et ModePROP. Il est utilisé pour définir l'entrée la plus importante requise par ces modules de simulation : les propriétés des matériaux et la géométrie structurelle d'un dispositif photonique. Un utilisateur conçoit généralement d'abord une structure dans l'interface CAO, puis utilise un ou plusieurs moteurs de simulation pour modéliser divers aspects des performances de l'appareil [83].

III.2.2. Modules de simulation associés :

RSoft CAD est le programme de contrôle principal pour une série de modules de simulation qui sont autorisés séparément de RSoft. Ces modules de simulation avec des applications typiques, sont : BeamPROP, DiffractMOD, BandSOLVE, GratingMOD, FemSIM, ModePROP et celui que nous avons utilisé durant notre travail FullWAVE [83].

III.2.2.1. Le module de simulation FullWAVE :

FullWAVE est idéal pour la conception de dispositifs photoniques complexes. Le logiciel utilise la méthode du domaine temporel à différence finie FDTD pour la simulation, qui permet l'analyse d'appareils, tels que les bandes interdites photoniques et les résonateurs en anneau, qui ne peuvent pas être modélisés avec des techniques telles que la méthode de propagation efficace du faisceau (BPM) [83].

III.2.3. Méthode de modélisation :

Afin que résoudre les équations de Maxwell, il existe des plusieurs méthodes numériques qui peuvent être classées suivant différents critères, comme le domaine dans lequel elles opèrent, temporel ou fréquentiel, ou encore le nombre de dimensions de l'espace qu'elles discrétisent [84].

III.2.3.1. La méthode de FDTD :

a. Principe :

La FDTD peut reproduire le comportement d'une onde électromagnétique ou acoustique sur une large bande de fréquence basant sur une simple transformée de Fourier et un développement en différences finies des dérivées partielles. Ces différences finies reposent sur une discrétisation des équations de Maxwell dans l'espace (pour les dérivées spatiales) et une autre temporelle (relative aux dérivées temporelles) dans le temps .

Le principe de cette méthode consiste à introduire une excitation dans le système. Puis, on détecte l'évolution de la déformation élastique $u(x,y,z,t)$ et de la vitesse $v(x,y,z,t)$ au cours du temps. Au bout d'un temps suffisant, par transformée de Fourier, on obtient une réponse fréquentielle du système à la déformation initiale. On peut alors obtenir des informations telles que les courbes de dispersion et les coefficients de transmission [83][84].

b. Avantage :

- ✓ Obtenir en une seule simulation des informations temporelles et spectrales sur une structure.
- ✓ c'est une méthode simple : elle met en jeu, en effet, des concepts et des outils de résolutions élémentaires (équations de Maxwell, différences finies).
- ✓ Offrir la possibilité d'obtenir la distribution du champ à différents temps.
- ✓ Modéliser des structures aux géométries complexes dont les matériaux peuvent être anisotropes ou inhomogènes.
- ✓ La méthode FDTD donne la possibilité d'intégrer dans l'algorithme de résolution de nombreuses sources (ondes planes, modes guidés, dipôles oscillants,...) [85].

c. Limitation :

- ✓ Le schéma de Yee impose une discrétisation en mailles régulières.
- ✓ Il faut des longueurs d'arêtes entre $\lambda/16$ et $\lambda/20$ pour avoir la convergence en maillage.
- ✓ La FDTD étant un schéma explicite, le pas temporel maximal est relié au pas spatial par une condition de stabilité.
- ✓ Il est difficile de prendre en compte des matériaux dispersifs [84].

III.3. Les étapes de simulation :

La **Figure III.1** représente la fenêtre principale du programme Rsoft CAD Layout, cette dernière contient une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre des outils qui porte plusieurs icônes et la ligne d'état.

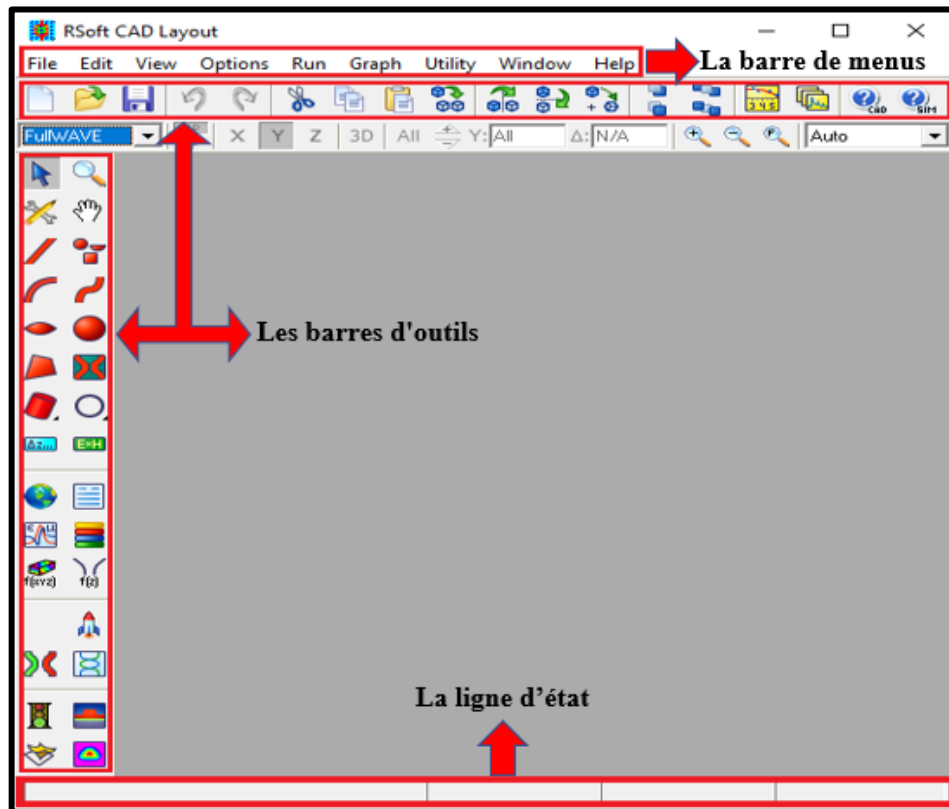


Figure III.1 : La fenêtre principale du RSoft CAD Layout.

La barre de menus permet d'accéder au divers dossier standard et aux opérations d'édition. Le CAD possède plusieurs barres d'outils :

- La barre d'outils supérieure.
- La barre d'outils Affichage.
- La barre d'outils latérale.

La barre d'état fournit des informations sur le mode actuel de l'interface CAO ainsi que les coordonnées actuelles de la souris [83].

III.3.1. Création d'un nouveau fichier de conception :

Pour créer une structure ; on ouvre l'interface du logiciel Rsoft CAD une fois le logiciel ouvert, cliquez sur l'icône Nouveau circuit (l'icône la plus à gauche dans la barre d'outils supérieure) ou choisissez Fichier / Nouveau dans le menu. La boîte de dialogue de démarrage apparaîtra comme indiqué sur la **Figure III.2** où les informations de base sur la structure et l'outil de simulation à utiliser.

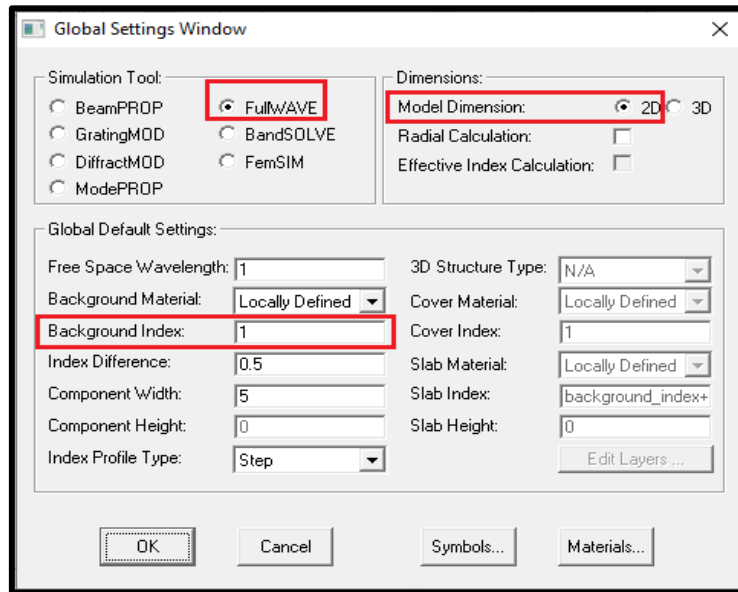


Figure III.2 : La fenêtre de démarrage où les informations de base sur la structure sont définies.

La description des options :

- **Model Dimension** (Dimension du modèle) : La dimension de la structure.
- **Index Difference** (Différence d'index) : Différence d'index par défaut entre un composant et l'index de la région d'arrière-plan.
- **Background Index** (Index de fond) : L'index de la région d'arrière-plan (blanc).
- **Simulation Tool** (Outil de simulation) : L'outil de simulation à utiliser. Étant donné que ce didacticiel ne portera que sur la CAO, l'outil choisi n'a pas d'importance [83].

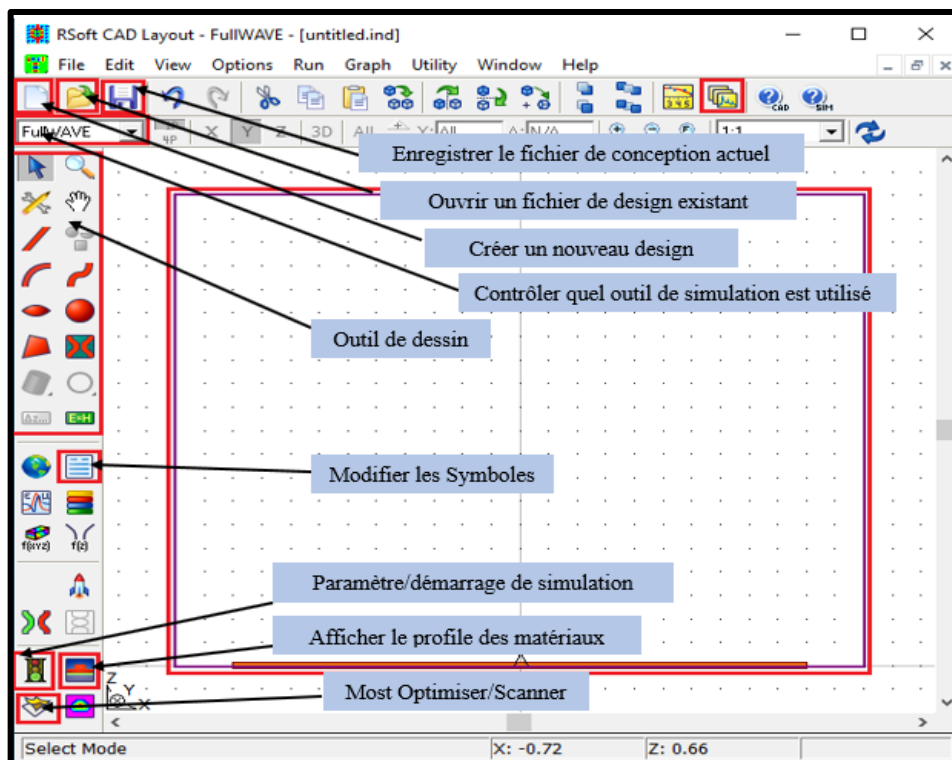


Figure III.3 : Illustration d'une fenêtre de disposition dans laquelle le domaine de simulation et le champ de lancement sont également affichés.

III.3.2. Définition des variables :

La table des symboles aura plusieurs symboles déjà définis qui correspondent aux paramètres définis dans la fenêtre de démarrage.

Il est généralement avantageux de créer des variables qui représenteront divers aspects de la structure, pour créer une variable cliquez sur l'icône modifier les symboles dans la barre d'outils de gauche pour ouvrir l'éditeur de table de symboles, comme illustré à la Figure **Figure III.4**.

Il est possible de changer, supprimer et ajouter autant de variables qu'on veut. Il suffit de cliquer sur la variable et choisir soit delete symbol si on veut supprimer, new symbole si on veut ajouter et confirmer en cliquant sur accept symbol. Une fois tout est fait cliquer sur Ok [83].

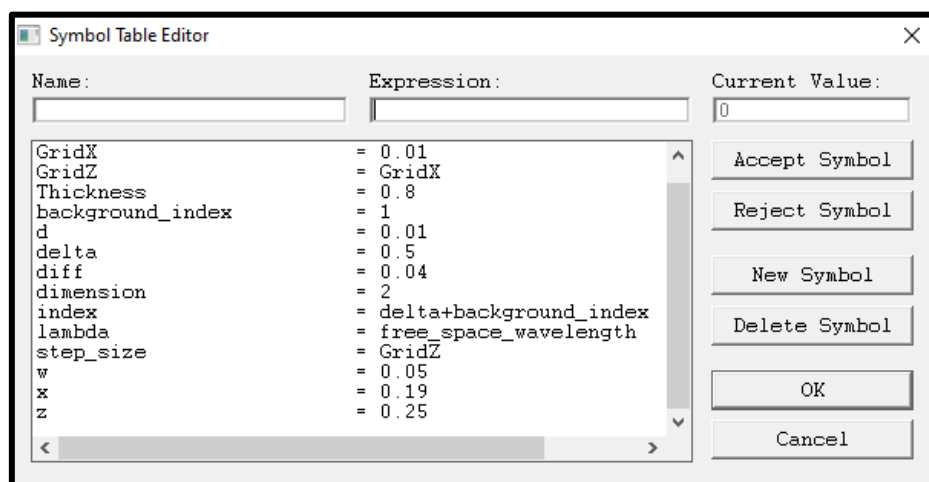


Figure III.4 : L'éditeur de table de symboles

III.3.3. Création de la structure :

Pour créer un composant, il suffit de tracer un segment/polygone dans l'interface de CAD et définir les propriétés des composants exactement afin d'avoir un contrôle précis sur les propriétés des composants tels que l'indice de réfraction, la position et la taille.

Cela se fait via la boîte de dialogue Propriétés du composant illustrée à la **Figure III.5** qui peut être ouverte en cliquant avec le bouton droit de la souris sur un composant.

III.3.4. Description de la structure :

La largeur du bus MIM WG et SRR est notée **W** et **diff**, respectivement. La longueur d'onde résonante (λ_{res}) dépend de la largeur **X** et d'un espace **d** entre le bus WG et SRR.

La longueur de cavité **L** est maintenue constante. Le métal et les matériaux isolants sont définis comme l'argent **Ag** et l'air, respectivement.

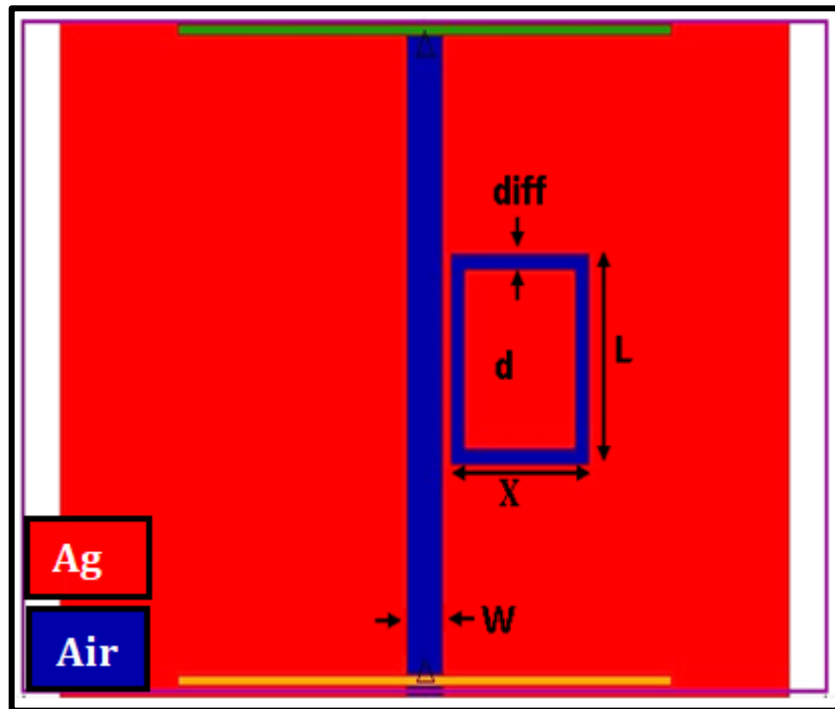


Figure III.5 : Schéma d'un filtre plasmonique à résonateur en anneau rectangle (Structure 1).

III.3.4. Définition des Propriétés du guide :

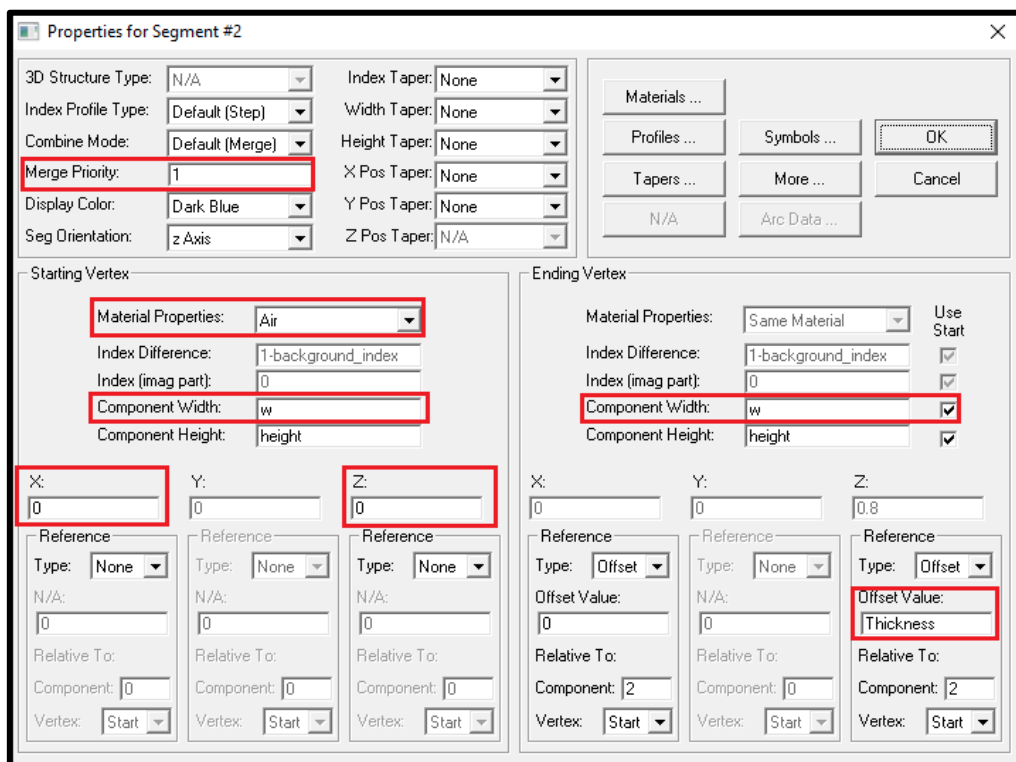


Figure III.6 : La boîte de dialogue Propriétés du composant pour le composant guide.

La figure Figure III.6 définit les dimensions et les matériaux utilisés pour la conception du guide d'onde de la structure.

III.3.4. Définition des Propriétés de l'anneau :

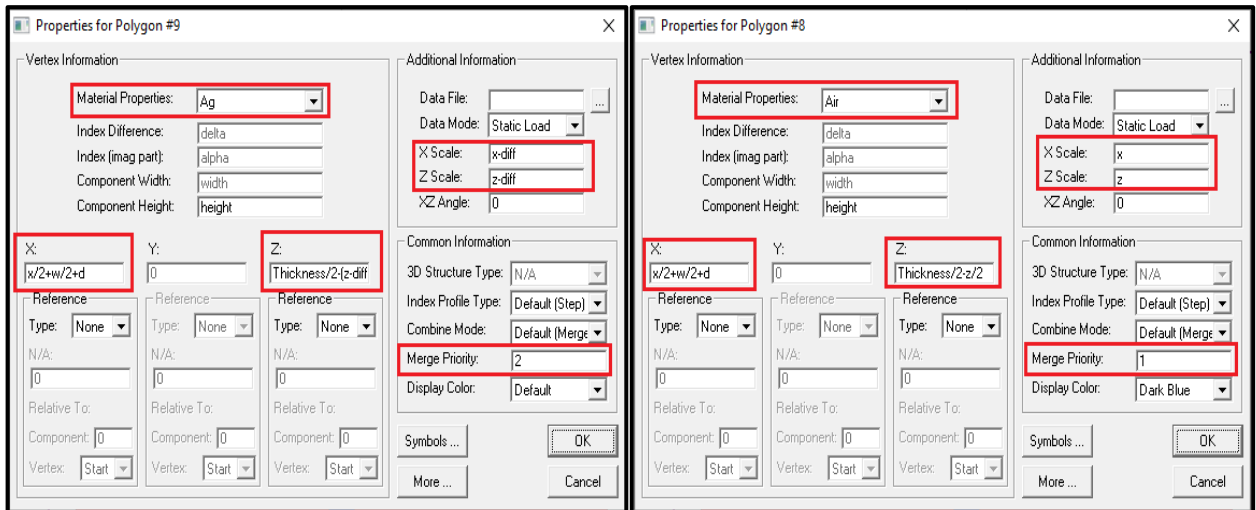


Figure III.7(a) : La boîte de dialogue propriétés du composant pour le composant rect 1 en Ag.

Figure III.7(b) : La boîte de dialogue propriétés du composant pour le composant rect 2 en Ag.

La figure **Figure III.7** définit les dimensions et les matériaux utilisés pour la conception de l'anneau de la structure, il est très important de modifier **Merge priority** afin qu'on obtienne la structure souhaitée.

III.3.5. Vision du profil d'indice :

Il est important de simuler réellement la distribution d'indice souhaitée, pour voir le profil d'indice, on clique sur l'icône Display Index Profile et on change Display Mode pour être ContourMap (XZ).

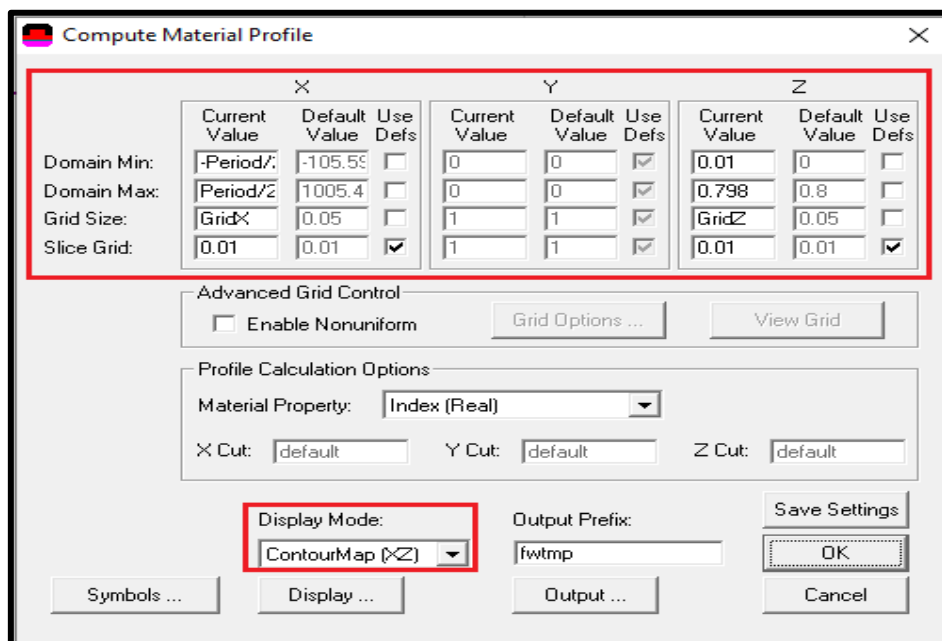


Figure III.8 : La boîte de dialogue Compute Index Profile.

Après avoir entré les valeurs de Domain Min/Max, Slice Step, Compute Step, appuyez sur OK pour voir le profil d'indice et une figure suivante apparaît [83].

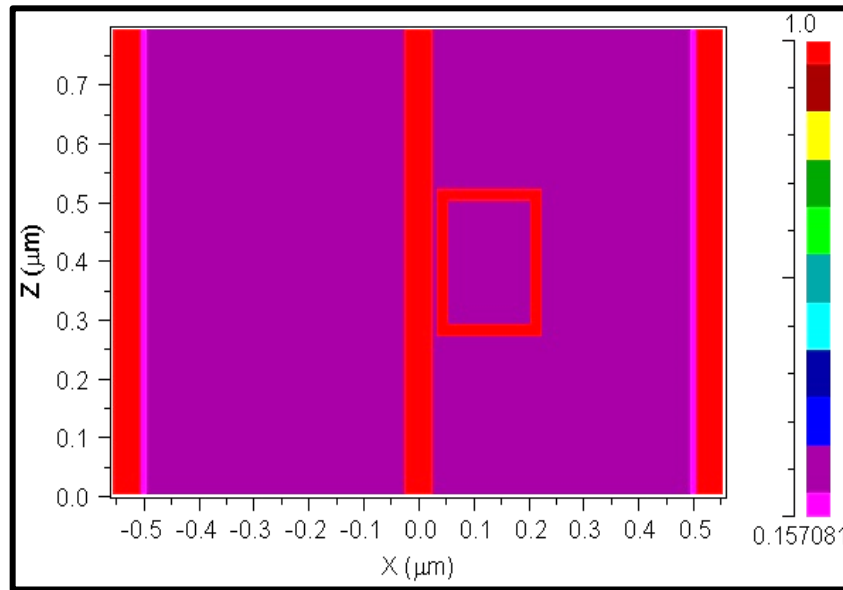


Figure III.9 : Le profil des matériaux de la structure 1.

Pour vérifier que la structure dessinée est strictement correcte, un outil permettant d'afficher le profil du matériau, comme la **Figure III.9** montre que le guide est gravé par un matériel isolant (**air**, dont son indice de réfraction est bien connu $n=1$), la cavité est gravée par un rectangle en argent **Ag** à l'intérieur d'un rectangle en **air**.

III.3.6. Description du chemin de simulation :

Avant de passer à la simulation, nous devons spécifier le chemin du champ et la durée d'analyse pour tracer le spectre fréquentiel, on clique sur l'icône Edit Launch Field, Launch Type est mis sur Slab Mode ainsi que les paramètres montrés dans la **Figure III.10**, on fait OK [83].

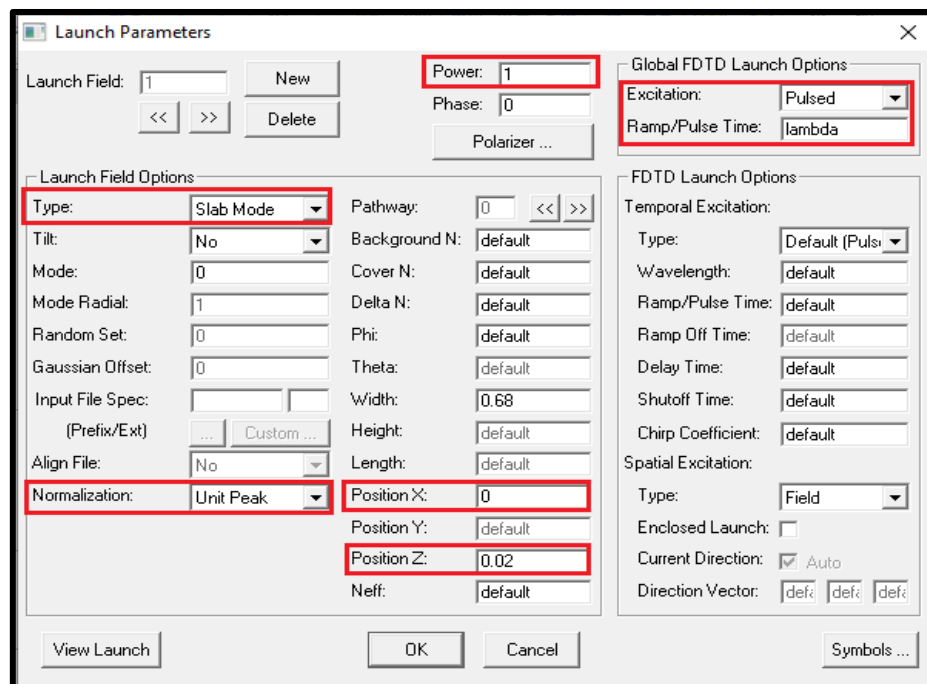


Figure III.10 : Définition des paramètres du Launch Field.

III.3.7. Insertion des time monitors :

L'étape suivante consiste à insérer des time monitors dans le design qui pourra être utilisé pour les analyses de la simulation. On a utilisé un time monitors pour mesurer le champ qui est transmis, à partir du top menu, on sélectionne Options/Insert/Time Monitor, changé X et Z vertex de référence pour que ce time monitor est placé au top du guide d'onde, enfin, définir the Frequency Analysis to FFT, comme la **Figure III.11** montre [83].

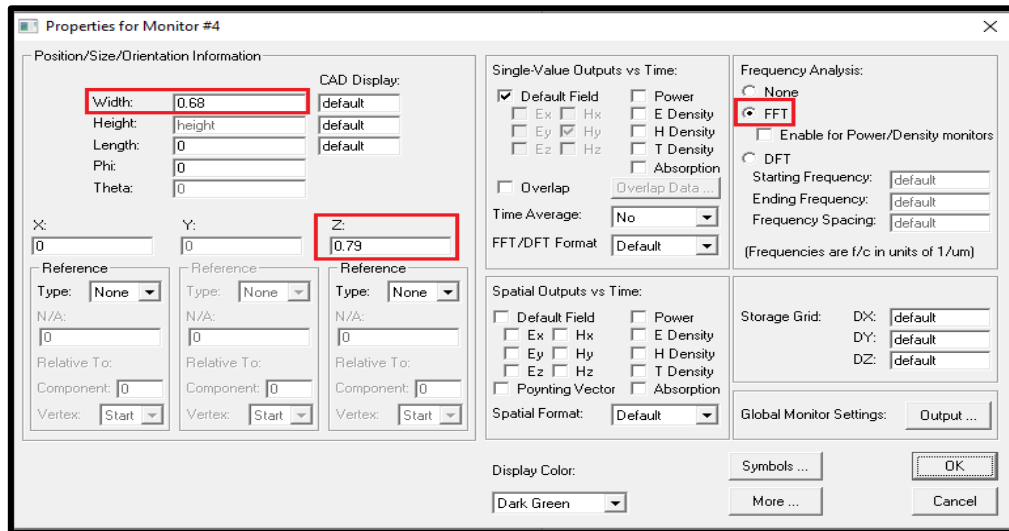


Figure III.11 : Définition des paramètres du time monitor.

III.3.8. Traçage du spectre en longueur d'onde :

On clique sur l'icône Perform Simulation pour spécifier les paramètres de simulation. Le Time Step doit être assez élevé pour satisfaire la condition de stabilité, le Stop Time doit être assez élevé pour pouvoir enregistrer le maximum possible du temps de réponse du système ; cela maximise l'efficacité de la FFT pour le calcul de la réponse fréquentielle [83].

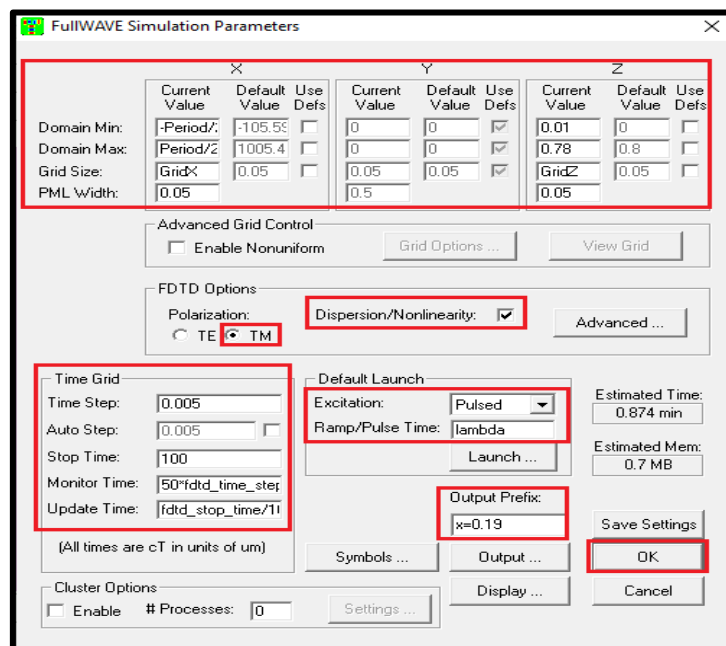


Figure III.12 : Paramètres de simulation

On verra comme le montre la **Figure III.13** et la **Figure III.14** les résultats des tracés recueillis à partir des time monitors :

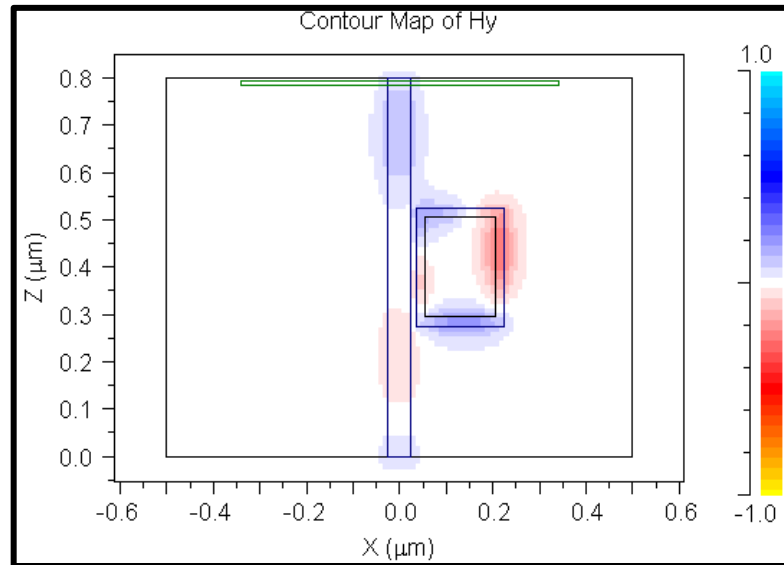


Figure III.13 : La distribution de champ magnétique dans la structure 1.

La distribution du champ magnétique de la structure est représentée sur la **Figure III.13**, on remarque que la lumière est bien pénétré dans guide et se propage, une partie de la lumière est transporté vers la cavité grâce à la présence du condition de couplage qui dépend du paramètre d qui exprime l'espace entre le bus WG et SRR (confinement de la lumière aux λ_{res} correspondants).

Le spectre de transmission pour cette structure de SRR en longueur d'onde est présenté sous dessous.

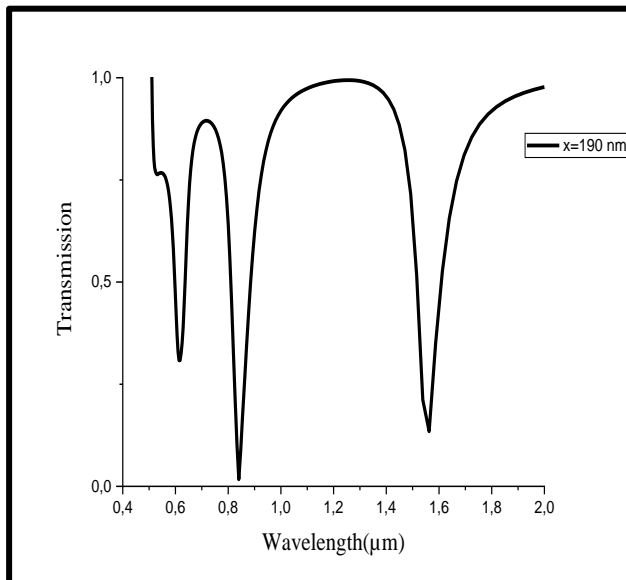


Figure III.14(a) : Le Spectre de transmission de la cavité en échelle linéair.

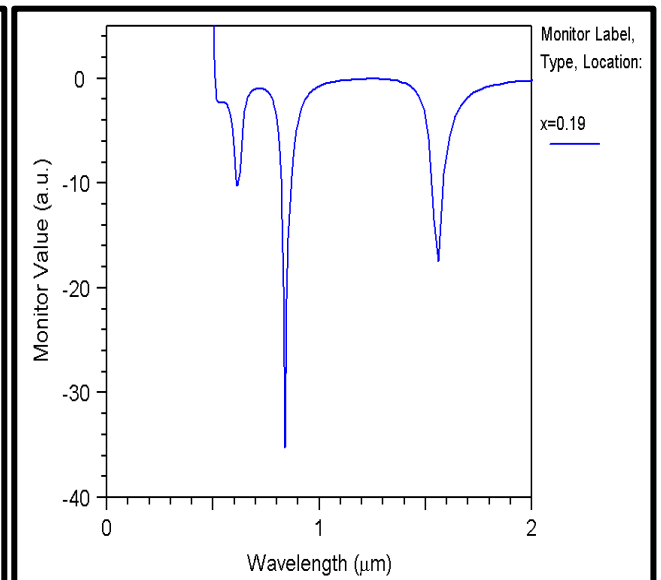


Figure III.14(b) : Le Spectre de transmission de la cavité en dB.

C'est clair qu'on a trois fréquences de résonance mais, on s'intéresse par le pic le plus étroite qui dépend de la fréquence de résonance $\lambda_{res} = 840 \text{ nm}$ et s'approche de la valeur -35dB avec une transmission de 90% .

III.4. L'influence de la largeur X :

Afin que voir l'influence du paramètre de la largeur **X**, nous simulons la structure précédente pour voir l'effet de la largeur de la cavité sur les caractéristiques spectrales de la transmission lorsque les paramètres géométriques suivants sont définis par : le bus MIM WG, $W = 50 \text{ nm}$, $\text{diff} = 40 \text{ nm}$, le SRR est séparé du bus MIM WG avec $d = 10 \text{ nm}$.

Le **L** de la structure est fixé à **25nm** et le mode TM fondamental du bus MIM WG est excité par une onde plane.

La **Figure III.15** résume et compare les résultats trouvés pour $x = [190\text{nm} \ 230\text{nm}]$ avec un pas de **20nm**.

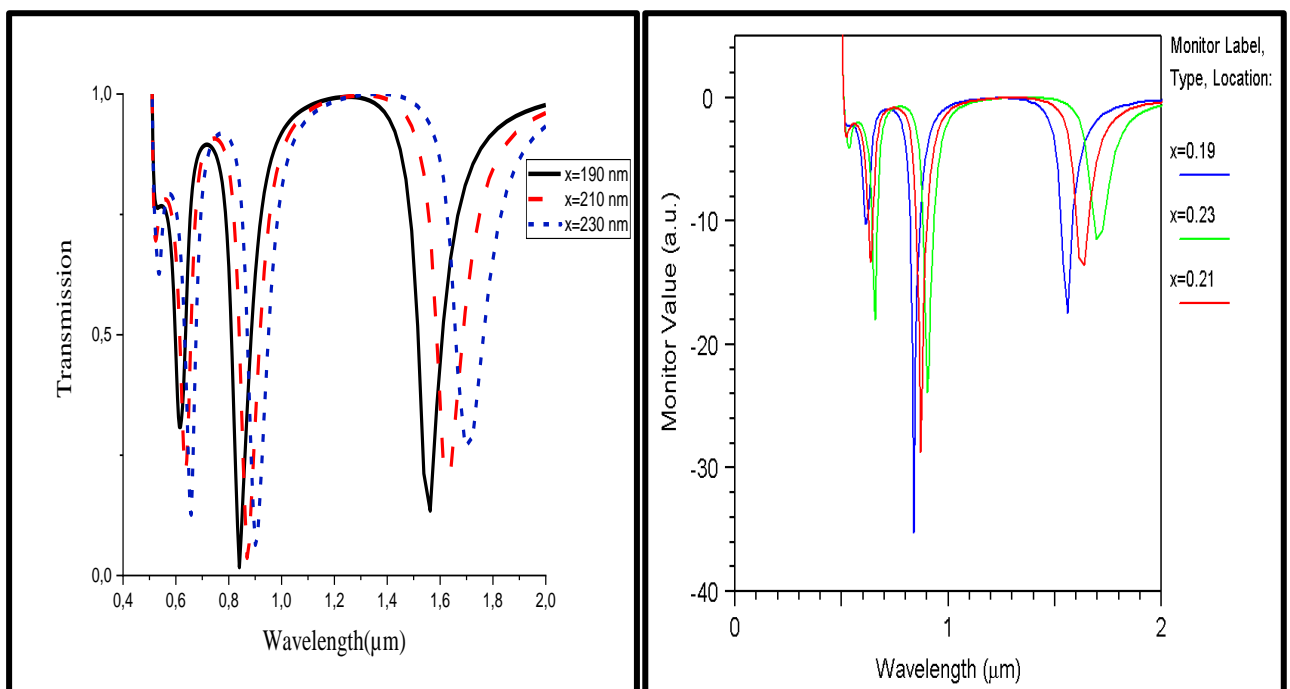


Figure III.15(a) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de x en échelle linéaire.

Figure III.15(b) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de x en dB.

Le spectre de transmission pour la structure de SRR précédente est présenté sur la **Figure III.15** pour des différentes valeurs de largeurs **190nm**, **210nm**, **230nm**

On remarque que, cette structure possède trois mods, on s'intéresse par les pics les plus étroites, donc la longueur d'onde de résonance pour les largeurs précédentes est approximativement égale à **840nm**, **860nm** et **900nm**, respectivement (un décalage vers la droite).

Finalement, on peut conclure que la meilleure valeur pour le paramètre **X** est **190nm**.

III.5. Amélioration de la Structure :

Afin que améliorer la première structure, nous utilisons la structure illustré dans la **Figure III.16**.

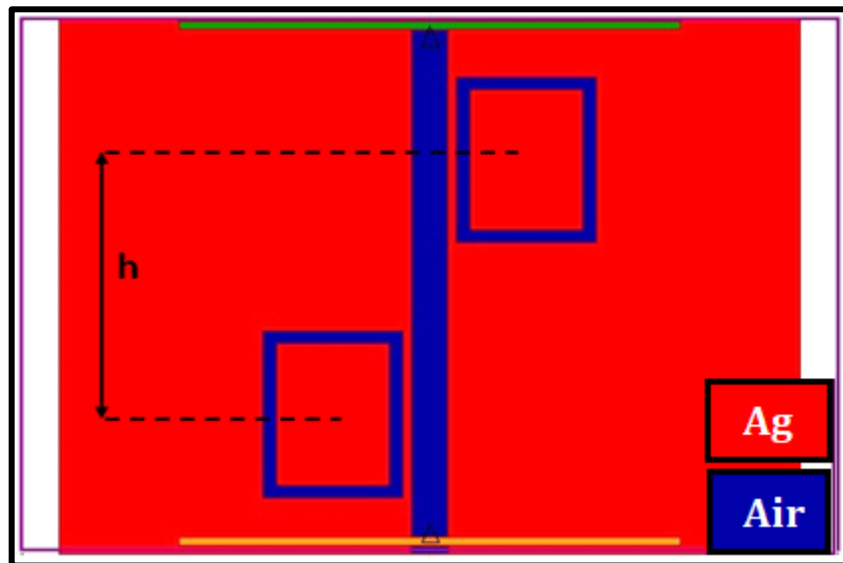


Figure III.16 : Schéma d'un filtre plasmonique à deux résonateurs en anneau rectangle (Structure 2).

Description de la structure :

Une doublure pour la première cavité dans le sens inverse (gauche) par rapport au guide telle que, le centre de gravité des deux rectangles est décalé par une hauteur $\pm h$ dans l'axe Z .

Les mêmes paramètres géométriques de la première structure sont utilisés (W , d , diff , L , X), juste le paramètre h qui va varier jusqu'à l'arrivée à une transmission mieux que la première.

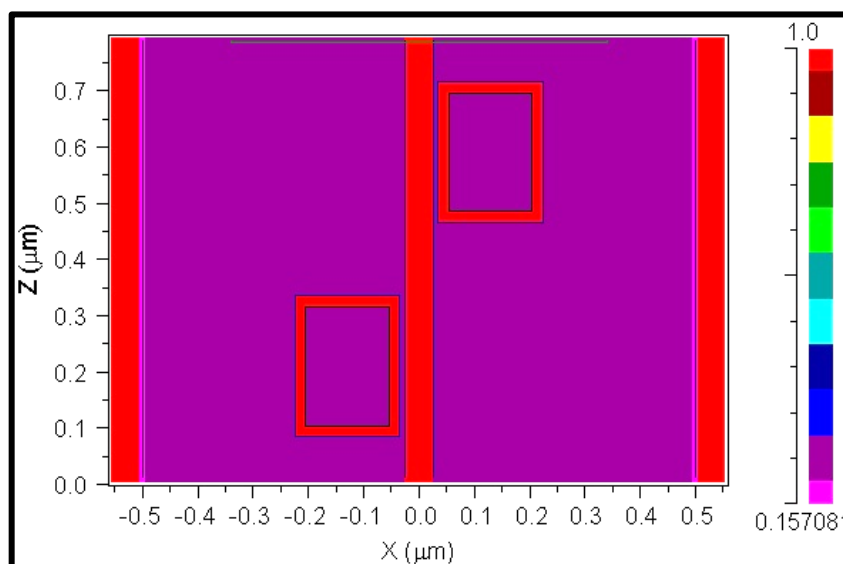


Figure III.17 : Le profil des matériaux de la structure 2.

La **Figure III.17** obtenu à l'aide d'un outil d'affichage du profil de matériau montre que la structure gravée sur le métal est strictement correcte, le guide est toujours gravé par un matériau isolant (**air**), les deux cavités sont gravées par un rectangle en argent **Ag** à l'intérieur d'un rectangle en **air**.

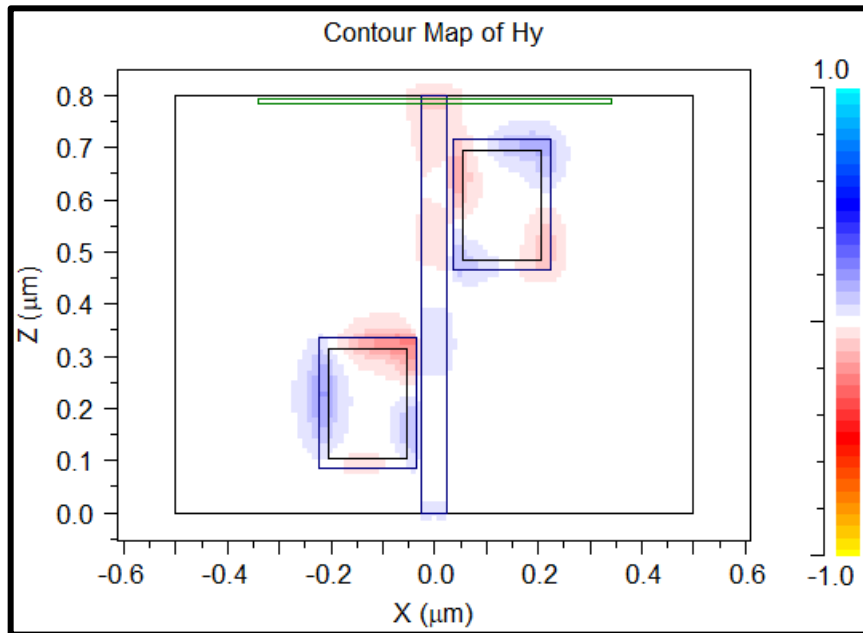


Figure III.18 : La distribution de champ magnétique dans la structure proposé.

La distribution du champ magnétique de la structure amélioré est représentée sur la **Figure III.18**, on remarque la propagation de la lumière le long du guid ainsi que une partie de cette lumière est transporté vers les deux cavité grace à la présence du condition de couplage.

Le spectre de transmission pour cette structure de SRR est présenté sur la **Figure III.19**.

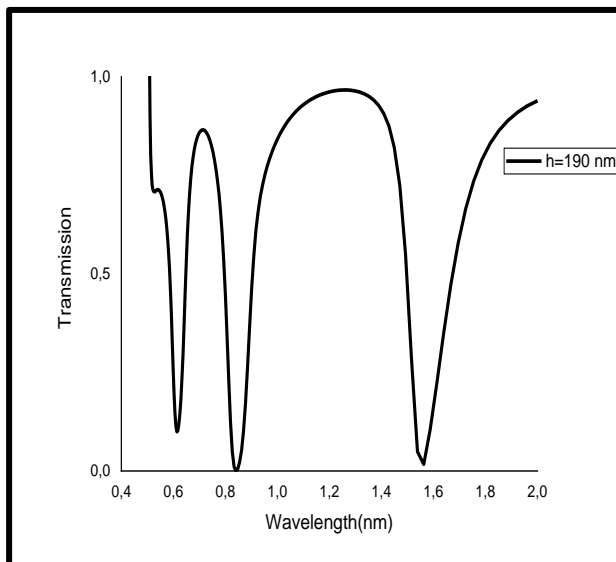


Figure III.19(a) : Le Spectre de transmission de la cavité en échelle linéaire.

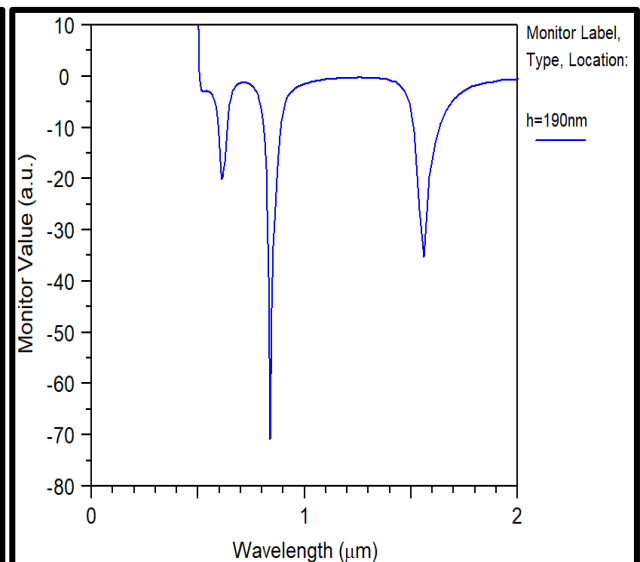


Figure III.19(b) : Le Spectre de transmission de de la cavité en dB.

Le pic le plus étroite qui dépend de la fréquence de résonance $\lambda_{res} = 840 \text{ nm}$ et tend vers **-71dB** avec une transmission de **95%**.

III.6. L'influence de la hauteur h :

Pour voir l'influence du paramètre de la hauteur h sur les caractéristiques spectrales de la transmission il faut simuler la structure lorsque les paramètres géométriques suivants sont définis par : le bus MIM WG, $W = 50 \text{ nm}$, $\text{diff} = 40 \text{ nm}$, le SRR est séparé du bus MIM WG avec $d = 10 \text{ nm}$.

Le L de la structure est fixé à 25 nm et le mode TM fondamental du bus MIM WG est excité par une onde plane.

La **Figure III.20** résume et compare les résultats trouvés pour $h = [0, 100 \text{ nm } 190 \text{ nm}]$.

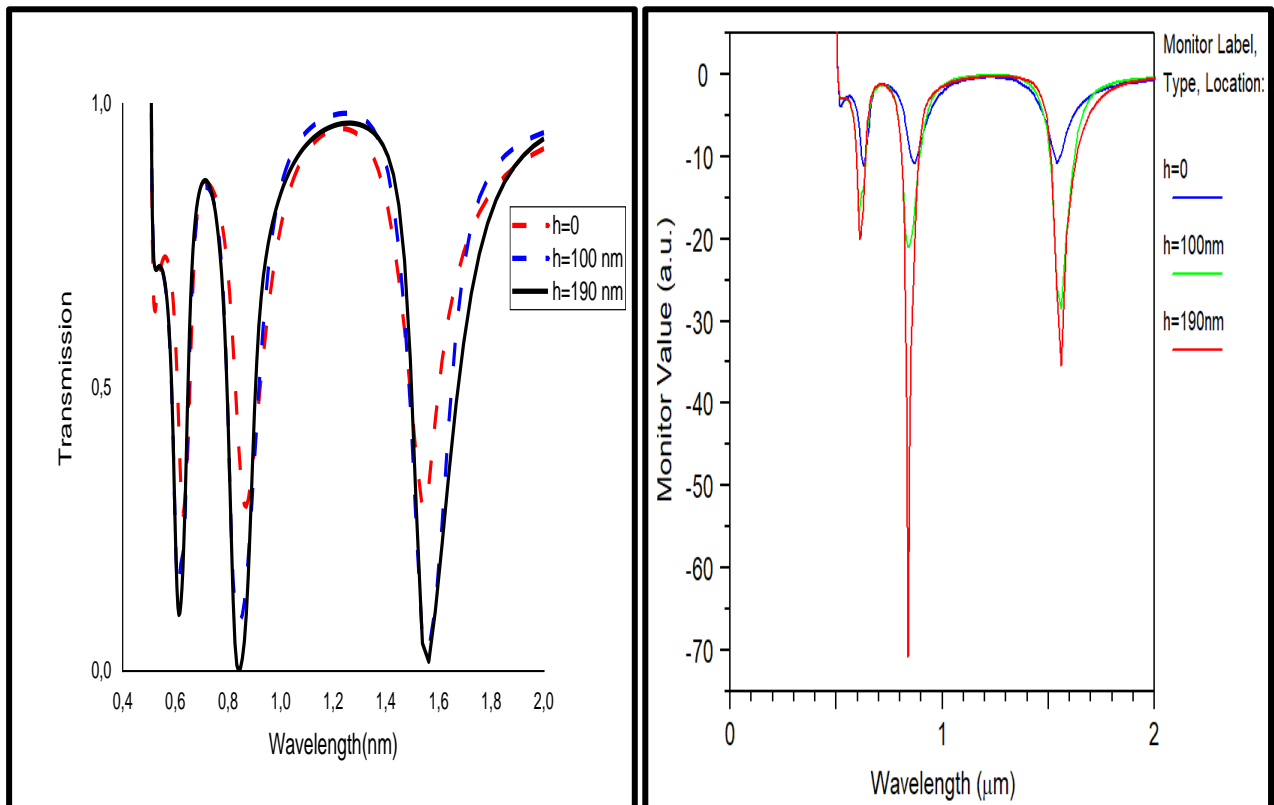


Figure III.20(a) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de h en échelle linéaire.

Figure III.20(b) : Comparaison entre les spectres de transmission de la cavité pour différentes valeurs de h en dB.

Les deux figures illustrent le spectre de transmission pour la structure étudiée en échelle linéaire/dB pour des différentes valeurs de la hauteur h , toujours on a trois modes et un pic plus étroit que les autres pics. On remarque que, la meilleure valeur pour le paramètre h qui est **190 nm**.

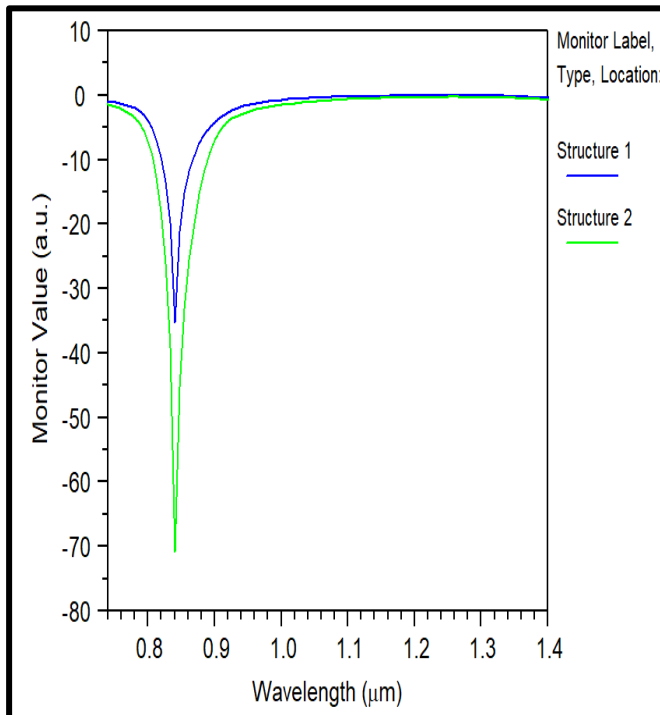


Figure III.21(a) : Comparaison entre les deux pics qui correspondent au $\lambda_{res} = 840$ nm en échelle linéaire.

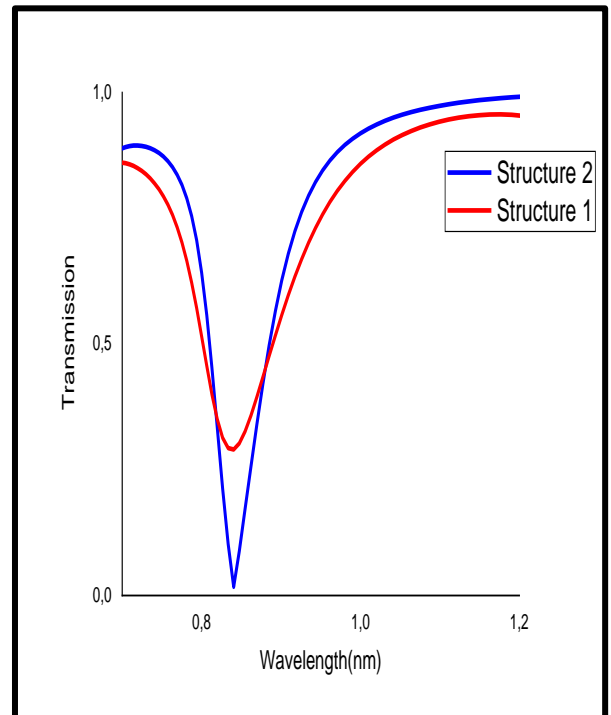


Figure III.21(b) : Comparaison entre les deux pics qui correspondent au $\lambda_{res} = 840$ nm en dB.

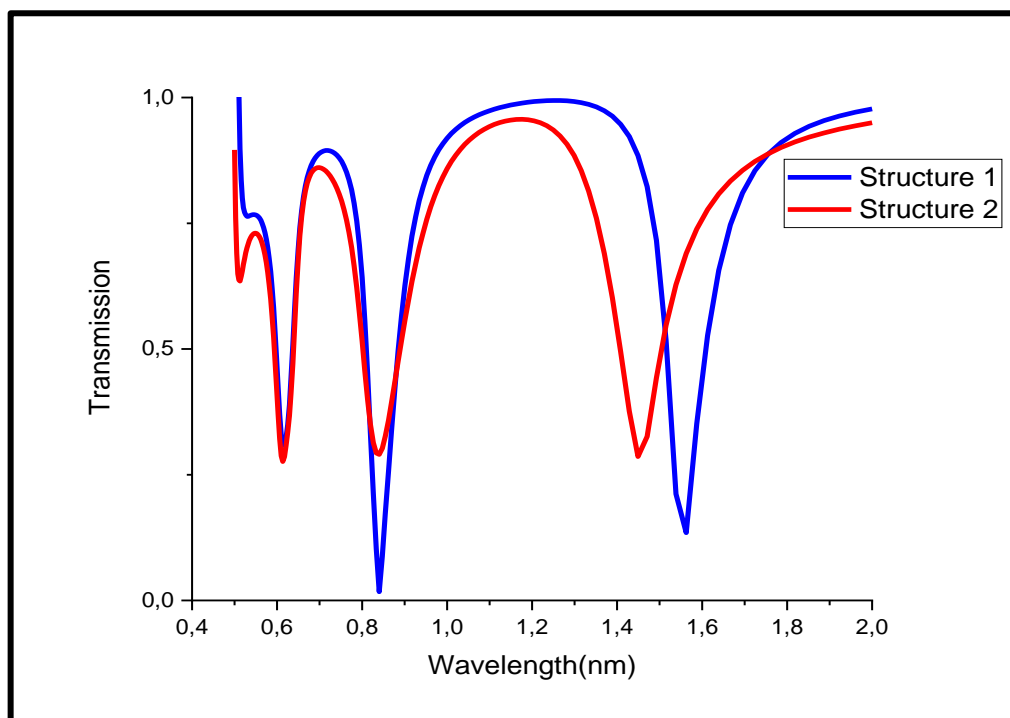


Figure III.22 : Comparaison entre les spectre de transmission de la structure 1 et 2.

D'après ces figures : **Figure III.21(a)**, **Figure III.21(b)**, **Figure III.22**, on remarque que la modification de la structure 1 pour obtenir la structure 2 a bien amélioré la performance du filtre ; une transmission de **95%** et un pic plus étroit qui tends vers **-71db**, puissance de départ supérieur à **-3db**.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié et simulé une structure MIM d'un filtre optique à base plasmonique bidimensionnels, en utilisant deux type de matériaux (Métal : Argent Ag, Isolant : Air) nous avons présenté en premier lieu le logiciel de simulation Rsoft CAD et ces modules de simulation associés ainsi que la méthode de modélisation FDTD et les différentes étapes nécessaires pour créer une structure.

En outre, nous avons vu après simulation sous Rsoft les différents résultats générés (spectre de transmission) de l'émission jusqu'à la réception. Nous avons étudié et simulé le couplage d'un guide d'onde avec une cavité afin qu'obtenir la meilleure transmission possible.

La dernière partie dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence des différentes paramètres géométriques sur la transmission afin que fait une optimisation pour améliorer la qualité de transmission et avoir une bonne puissance à la sortie de port de ce couplage.

Notre étude indique que la structure proposée d'un guide d'onde couplé avec un double résonateur rectangulaire donne une bonne qualité de transmission par rapport à la structure d'un guide d'onde couplé avec un seul résonateur rectangulaire.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Depuis les dernières années, l'intérêt de la communauté scientifique envers les matériaux plasmoniques n'a cessé de croître à cause de leurs nombreuses applications dans divers domaines de nanotechnologies et de nanosciences. Les applications des plasmoniques sont très vastes : Photo détection, cellules photovoltaïques, des guides d'ondes, des filtres optiques, des capteurs... etc.

Notre travail se résume à la conception d'un filtre optique à base plasmonique qui transfère les ondes électromagnétiques couplées à la surface des oscillations collectives d'électrons libres sur des métaux, en utilisant un guide d'onde et une cavité rectangulaire et l'argent comme matériau métal, l'air comme un matériau isolant.

L'outil de simulation utilisé au cours de ce travail, présenté dans la troisième partie, qui est parfaitement adapté à l'étude de structures à base plasmoniques et des cristaux photoniques à deux dimensions 2D, en tenant compte des conditions de validité de la méthode 2D, permettant ainsi d'obtenir une réponse rigoureuse des structures étudiées. L'objectif de ce travail est consacré à l'étude et à la Conception d'un filtre optique à base de plasmonique.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord dressé quelques rappels théoriques et les principes de base des plasmoniques, leurs définitions, leurs différents types et leurs principes de fonctionnement. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté des notions de base sur les filtres optiques et dans ce cadre nous avons abordé leurs principales caractéristiques. Et à la fin de ce chapitre, nous avons présenté une description des filtres optiques à base plasmoniques plus particulièrement les filtres optiques à résonateur d'anneau et les structures MIM et IMI. Le dernier chapitre est consacré à la simulation de la structure du filtre désiré, en utilisant le simulateur RSoft, le module Fullwave.

Nous avons ensuite analysé la structure de référence proposée déjà, en se basant sur les propriétés géométriques de la cavité et les conditions du couplage (distance de couplage). La cavité de cette structure donne un décalage de la longueur d'onde de résonance λ .

Une optimisation de la structure de référence est menée en vue d'améliorer la transmission et la puissance à la sortie de port de ce couplage. En effet, notre modification a porté sur la création d'une autre cavité résonante symétrique par rapport à la première cavité existante et commençant à décaler les deux cavités par rapport au plan (OZ) jusqu'à l'obtention de la meilleure valeur de la hauteur qui permet de garantir une excellente qualité de transmission.

D'après les résultats obtenus, on peut remarquer que la qualité de transmission est bien augmentée après l'optimisation de la structure de référence (95%), ce type de structure avec une double cavité est bien connu qu'il a une bonne transmission.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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.
- [2] Murray, W. A.; Barnes, W. L., Plasmonic Materials. *Advanced Materials* 2007, 19, 3771-3782.
- [3] Couture, M.; Zhao, S. S.; Masson, J. F., Modern Surface Plasmon Resonance for Bioanalytics and Biophysics. *Physical Chemistry Chemical Physics* 2013, 15, 11190-11216.
- [4] Lindquist, N. C.; Nagpal, P.; McPeak, K. M.; Norris, D. J.; Oh, S. H., Engineering Metallic Nanostructures for Plasmonics and Nanophotonics. *Reports on Progress in Physics* 2012, 75, 1-61.
- [5] Henzie, J.; Lee, J.; Lee, M. H.; Hasan, W.; Odom, T. W., Nanofabrication of Plasmonic Structures. In *Annual Review of Physical Chemistry*, Annual Reviews: Palo Alto, 2009; Vol. 60, pp 147-165.
- [6] Dhawan, A.; Canva, M.; Vo-Dinh, T., Narrow Groove Plasmonic Nano-Gratings for Surface Plasmon Resonance Sensing. *Optics Express* 2011, 19, 787-813.
- [7] Han, Y.; Corn, R. M., Characterization and Application of Surface Plasmon-Enhanced Optical Diffraction from Electrodeposited Gold Nanowire Arrays. *Journal of Physical Chemistry Letters* 2011, 2, 1601-1606.
- [8] Piliarik, M.; Vala, M.; Tichy, I.; Homola, J., Compact and Low-Cost Biosensor Based on Novel Approach to Spectroscopy of Surface Plasmons. *Biosensors & Bioelectronics* 2009, 24, 3430-3435.
- [9] Jain, P. K.; Huang, X. H.; El-Sayed, I. H.; El-Sayed, M. A., Noble Metals on the Nanoscale: Optical and Photothermal Properties and Some Applications in Imaging, Sensing, Biology, and Medicine. *Accounts of Chemical Research* 2008, 41, 1578-1586.
- [10] Huang, X. H.; Jain, P. K.; El-Sayed, I. H.; El-Sayed, M. A., Plasmonic Photothermal Therapy (Pptt) Using Gold Nanoparticles. *Lasers in Medical Science* 2008, 23, 217-228.
- [11] Chung, T.; Lee, S. Y.; Song, E. Y.; Chun, H.; Lee, B., Plasmonic Nanostructures for Nano-Scale Bio-Sensing. *Sensors* 2011, 11, 10907-10929.
- [12] Hu, M.; Chen, J. Y.; Li, Z. Y.; Au, L.; Hartland, G. V.; Li, X. D.; Marquez, M.; Xia, Y. N., Gold Nanostructures: Engineering Their Plasmonic Properties for Biomedical Applications. *Chemical Society Reviews* 2006, 35, 1084-1094.
- [24] Jones, M. R.; Osberg, K. D.; Macfarlane, R. J.; Langille, M. R.; Mirkin, C. A., Templated Techniques for the Synthesis and Assembly of Plasmonic Nanostructures. *Chemical Reviews* 2011, 111, 3736-3827.

- [14] Estevez, M. C.; Otte, M. A.; Sepulveda, B.; Lechuga, L. M., Trends and Challenges of Refractometric Nanoplasmonic Biosensors: A Review. *Analytica Chimica Acta* 2014, 806, 5573.
- [15] M. Hamidi. Modélisation par la méthode FDTD des plasmons de surface localisés. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri (Tizi Ouzou), 2012
- [16] Zayats, A. V.; Smolyaninov, II; Maradudin, A. A., Nano-Optics of Surface Plasmon Polaritons. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters* 2005, 408, 131-314.
- [17]. Unser, S.; Bruzas, I.; He, J.; Sagle, L., Localized Surface Plasmon Resonance Biosensing: Current Challenges and Approaches. *Sensors (Basel, Switzerland)* 2015, 15, 15684716.
- [18]. Homola, J., Surface Plasmon Resonance Sensors for Detection of Chemical and Biological Species. *Chemical Reviews* 2008, 108, 462-493.
- [19] Catchpole, K. R.; Polman, A., Plasmonic Solar Cells. *Optics Express* 2008, 16, 2179321800.
- [20] M. Hamidi. Modélisation par la méthode FDTD des plasmons de surface localisés. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri (Tizi Ouzou), 2012
- [21] S. Aberra Guebrou. Influence des plasmons de surface propagatifs sur la cohérence de systèmes optiques. PhD thesis, Université Claude Bernard (Lyon 1), 2012.
- [22] S. Khadir. Modélisation et caractérisation d'un dispositif plasmonique pour des applications oleds. Master's thesis, Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ozou), 2013.
- [23] 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.
- [24] Rayleigh, L., Note on the Remarkable Case of Diffraction Spectra Described by Prof. Wood. *Philos. Mag* 1907, 14, 60-65.
- [25] Pines, D., Collective Energy Losses in Solids. *Reviews of Modern Physics* 1956, 28, 184198.
- [26]. 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.
- [27]. Ritchie, R. H., Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. *Physical Review* 1957, 106, 874-881.
- [28]. Powell, C. J.; Swan, J. B., Effect of Oxidation on the Characteristic Loss Spectra of Aluminum and Magnesium. *Physical Review* 1960, 118, 640-643.
- [29]. Otto, A., *Z. Phys* 1968, 216, 398-410.

- [30]. E. Kretschmann, H. R., Z. Naturforsch. 1968, 23, 2135-2136.
- [31]. Liedberg, B., Sens. Actuators 1983, 4, 299-304.
- [32]. Homola, J.; Yee, S. S.; Gauglitz, G., Surface Plasmon Resonance Sensors: Review. Sensors and Actuators B-Chemical 1999, 54, 3-15.
- [33] C. Bonnard. Couplage fort entre plasmons de surface et excitons de semiconducteur organique. PhD thesis, Université Claude Bernard (Lyon1), 2006.
- [34] M.Kanso. Modélisation, réalisation et caractérisation d'un capteur plasmonique à fibre optique : Effets de la rugosité, des réactions de surface et de la cinétique dans un système microfluidique. PhD thesis, Université de Nantes, 2008.
- [35]. Willets, K. A.; Van Duyne, R. P., Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing. In Annual Review of Physical Chemistry, Annual Reviews: Palo Alto, 2007; Vol. 58, pp 267-297.
- [36] Turner, A. P. F., Biosensors: Sense and Sensibility. Chemical Society Reviews 2013, 42, 3184-3196.
- [37]. Guo, L. H.; Jackman, J. A.; Yang, H. H.; Chen, P.; Cho, N. J.; Kim, D. H., Strategies for Enhancing the Sensitivity of Plasmonic Nanosensors. Nano Today 2015, 10, 213-239.
- [38]. Anker, J. N.; Hall, W. P.; Lyandres, O.; Shah, N. C.; Zhao, J.; Van Duyne, R. P., Biosensing with Plasmonic Nanosensors. Nature Materials 2008, 7, 442-453.
- [39]. Yonzon, C. R.; Jeoung, E.; Zou, S. L.; Schatz, G. C.; Mrksich, M.; Van Duyne, R. P., A Comparative Analysis of Localized and Propagating Surface Plasmon Resonance Sensors: The Binding of Concanavalin a to a Monosaccharide Functionalized Self-Assembled Monolayer. Journal of the American Chemical Society 2004, 126, 12669-12676.
- [40]. Haes, A. J.; Van Duyne, R. P., A Unified View of Propagating and Localized Surface Plasmon Resonance Biosensors. Analytical and Bioanalytical Chemistry 2004, 379, 920-930.
- [41]. Couture, M.; Live, L. S.; Dhawan, A.; Masson, J. F., Eot or Kretschmann Configuration? Comparative Study of the Plasmonic Modes in Gold Nanohole Arrays. Analyst 2012, 137, 41624170.
- [42] Flavien Pillet « développement d'un outil d'analyse d'interactions moléculaires basé sur la résonance plasmonique de surface (SPRi) » thèse de doctorat, 15/12/2010, l'université de Toulouse.
- [43] Hafaid Imen « Etude physico-chimique de capteurs à base de nanomatériaux pour des applications biomédicales » thèse de doctorat, 26/06/2009, INSA Lyon.

- [44] Cédric Ayela « Micromembranes résonantes à actionnement et détection piézoélectriques intégrés pour la détection de molécules biologiques en temps réel » thèse de doctorat, 20 décembre 2007, l'université Toulouse III – Paul Sabatier.
- [45] Julien Burgin « Étude femtoseconde de la dynamique électronique et vibrationnelle de nano-objets métalliques et de l'ordre local dans les verres » thèse de doctorat, 14 Septembre 2007, l'université Bordeaux I.
- [46] Jaromír Pištora et All « Surface plasmon resonance sensor with a magneto-optical structure » *optica applicata*, vol. XL, No. 4, 2010.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] M.Françon, “Séparation des radiations par les filtres optiques”, Ed. Masson, P.12:13 1984).
- [50] Daniel Courjon et Claudine Bainier, *Le Champ proche optique : Théorie et applications*, edité chez Springer (2001).
- [51] Toffano Z., « Optoélectronique : Composants photoniques et fibres optiques », Ellipses : Paris (2000).
- [52] W.L. Barnes, A. Dereux et T.W. Ebbesen, Surface plasmon subwavelength optics, *Nature* 424, 824 (2003).
- [53] R. H. Ritchie, E. T. Arakawa, J. J. Cowan, and R. N. Hamm, Surface-plasmon resonance effect in grating diffraction, *Phys. Rev. Lett.* 21, 1530–1532 (1968).
- [54] 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).
- [55] L. Ghisa, “Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal”. Thèse de Doctorat, Université de Rennes I, Rennes, (2008).

- [56] G. Lenz et al., "Optical Delay Lines Based on Optical Filters," *IEEE J. Quantum Electron.* Vol. 37, no. 4, pp. 525-532, (April 2001).
- [57] G. Lenz and C. K. Madsen, "General Optical All-Pass Filter Structures for Dispersion Control in WDM Systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 7, pp. 1248-1254.
- [58] H. Heidrich et al., "Monolithischer Photonik-IC zur schmalbandigen Erzeugung optischer Signale bei Frequenzen im Millimeter-Wellenband," patent application DE 198 20 166, date of registration (29.04.1998).
- [59] M. Kohtoku et al., "200-GHz FSR Periodic Multi/Demultiplexer with Flattened Transmission and Rejection Band by Using a Mach-Zehnder Interferometer with a Ring Resonator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 1174-1176, (September 2000).
- [60] S. T. Chu et al., "An Eight-Channel Add-Drop Filter Using Vertically Coupled Microring Resonators over a Cross Grid," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 691-693, (June 1999).
- [61] Y. Kokubun et al., "Polarization-independent vertically coupled microring resonator filter," *Electron. Lett.* vol. 37, no. 2, pp. 90-92, January 2001. 76, January 2002.
- [62] M. Cai et al., "5 Gbit/s BER Performance on an All Fiber-Optic Add/Drop Device Based on a Taper-Resonator-Taper Structure," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 1177-1179, (September 2000).
- [63] P. P. Absil et al., "Wavelength conversion in GaAs micro-ring resonators," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 8, pp. 554-556, (April 2000).
- [64] G. Allen et al., "All Optical Millimeter-Wave Electrical Signal Generation Using an Integrated Mode-Locked Semiconductor Ring Laser and Photodiode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 1634-1636, (December 1997).
- [65] B. E. Little and S. T. Chu, "Estimating surface-roughness loss and output coupling in microdisk resonators," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 17, pp. 1390-1392, (September 1996).
- [66] J. V. Hryniewicz et al., "Higher Order Filter Response in Coupled Microring Resonators," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 320-322, (March 2000).
- [67] F. Xia, L. Sekaric, and Y. A. Vlasov, "Ultra-compact optical buffers on a silicon chip," *Nature Photon.* 1, 65-71 (2007).
- [68] S. Xiao, M. H. Khan, H. Shen, and M. Qi, "A highly compact third-order silicon microring add-drop filter with a very large free spectral range, a flat passband and a low delay dispersion," *Opt. Express* 15, 14765-14771 (2007).

- [69] K. Aoki, D. Guimard, M. Nishioka, M. Nomura, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Coupling of quantum-dot light emission with a three-dimensional photonic-crystal nanocavity," *Nature Photonics* 2, 688-692 (2008).
- [70] M. Eichenfield, R. Camacho, J. Chan, K. J. Vahala, and O. Painter, "A picogram- and nanometre-scale photonic-crystal optomechanical cavity," *Nature* 459, 550-555 (2009).
- [71] T. Sunner, T. Stichel, S. H. Kwon, T. W. Schlereth, S. Hofling, M. Kamp, and A. Forchel, "Photonic crystal cavity based gas sensor," *Appl. Phys. Lett.* 92, 261112 (2008).
- [72] 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.
- [73] Sébastien Massenet « 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.
- [74] B. E. Little et al., "Filter Synthesis for periodically coupled microring resonators," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 5, pp. 344-346, (March 2000).
- [75] J A Dionne, L A Sweatlock, H A Atwater and A Polman, *Phys. Rev. B* 73, 035407 (2006).
- [76] Q Li, T Wang, Y Su, M Yan and M Qiu, *Opt. Express* 18, 8367 (2010).
- [77] 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).
- [78] 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).
- [79] M.A. Garcia. Surface plasmons in metallic nanoparticles : fundamentals and applications. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 44(28), 2011.
- [80] M. Hamidi. Modélisation par la méthode FDTD des plasmons de surface localisés. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri (Tizi Ouzou), 2012
- [81] Y. Xiao, J. P. Yang, P. P. Cheng, J. J. Zhu, Z. Q. Xu, Y. H. Deng, S. T. Lee, Y. Q. Li, and J. X. Tang. Surface plasmon-enhanced electroluminescence in organic light-emitting diodes incorporating nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 100(1), 2012.
- [82] K.Y. Yang, K.C. Choi, and C.W. Ahn. Surface plasmon-enhanced spontaneous emission rate in an organic light-emitting device structure : Cathode structure for plasmonic application. *Applied Physics Letters*, 94(17), 2009.

[83] RSoft CAD 5.1.9, "User guide" RSoft Design Group, 200 Executive Blvd. Ossining, NY
10562 Rsoft Release Notes RSoft Photonic Component Design Suite Version 2013.12.

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

[85] Bougriou Faïda, « étude théorique des matériaux a bandes interdites photoniques bidimensionnels : applications dans le domaine du guidage optique et la détection », thés de Doctorat, Université Constantine 1 (2013).