

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

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE
N :ME/202/

DOMAINE :SIENCES ET
FELIRE :ELECTRONIQUE
OPTION :MICRO- ELECTRONIQUE



UNIVERSITE MOHAMMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

**Par : Lagoune nadjet
Attar Loubna**

Intitulé

**Conception des captures optique à la base des structures
plasmonique**

Soutenu devant le jury composé de:

ZOUACHE tarek

Université de M'sila

Président

HOCINI abdesselem

Université de M'sila

Rapporteur

Bouras mounir

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude .

Nous tenons de remercier sincèrement Monsieur,
Dr. ABDESSELAM HOCINI
, professeur à l'université de M'sila, pour avoir assuré l'encadrement de ce travail. Sa disponibilité, son expérience, son savoir scientifique et ses qualités humaines ont été déterminants dans l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont aussi, , Mr. **TAREK ZOUACHE** pour ses soutiens et conseils, ses encouragements pendant la durée de ce mémoire .

Mes remerciements s'adressent `a tous les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail. Nos sincères gratitudees `a tous ce qui nous ont enseigné durant ces cinq ans de graduation.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour Leurs soutiens moraux ou matériels, dans la réalisation de ce projet.



DEDICAS

*Je dédie ce modeste travail A ces qui sont plus chers au monde
parent ma
mère et mon père pour leur patience
, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

A mon frère Abd el Ghafour et ma , sœur Amina

A ma cousine Rania

*A tous mes collègues du master spécialisé microélectronique
A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
pour que ce projet soit possible*

Lagoune nadjet

الحمد لله الذي وفق و أعان وشكرا على توالي توفيقه والصلاة

والسلام على خير خلق الله محمد صلى الله عليه وسلم

أما بعد

إلى القلب الذي ينبض في كل لحظة بالحب والرحمة

إلى التي أثارت قلبي وكتبت اسمي على حدقات عيونها إلى

التي جعل الجنة تحت قدميها إلى أروع كلمة نطق بها لساني "أمي"

إلى روح "أبي" الطاهرة. إلى جدي وجدي الذي كان بمثابة أبي فضهما الله

إلى خالتي و أمي الثانية فطيمة إلى أختي الفاضلة وردة وزوجها

وأولادها (جمانة - لؤي - نور - أسينات)

إلى اخوتي فارس - فتحي وزوجته وابنته (الكتكوتة فطومة)

إلى خالتي فاطمة وأولادها

(سميحة- خديجة- أم لخير- أيمن- بثينة- حميدة)

والى كل أخوالي وصديقاتي

(مباركة - نور).

عطار لبني

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL

CHAPITRE I : INTRODUCTION AUX PLASMONS-POLARITIONS DE SURFACE

I.1 INTRODUCTION :	3
I.2 Historique de la résonance des plasmons de surface :	3
I.3 Plasmonique	3
I.3.1. Plasmons de volume :	4
I.3.2. Plasmons de surface :	4
I.4 Le phénomène de résonance Plasmonique de surface :	5
I.4.1. Plasmons à l'interface métal / diélectrique	5
I.4.2. Propriétés des plasmons de surface	8
I. 4.3. Couplage photons-plasmons de surface	11
I. 5. Application des plasmons de surface et modes de plasmon de surface	13
I.5.1. Guide d'onde Plasmonique :	13
I.5.2. Les plasmons et la transmission extraordinaire	13
I.6. conclusion :	15

CHAPITRE II : MISE EN ŒUVRE DES CAPTEURS SPR

II.1 Introduction :	17
II.2 Composants plasmonique :	17
II.3 Guide plasmonique :	17
II.3.1. Composant passifs fill metalique :	17
II.3.2. Guides rubains :	18
II.3.3. Quelques autres guides plasmoniques :	19
II.4 Capteur SPR a fibre optique :	19
II.4.1. Définitions :	19
II.4.2 Avantages des capteurs à fibre optique :	20
II.4.3 Architectures des CFO	20

II.5 Capteurs `a SPR : principe de fonctionnement.....	25
II.6 Realisation de captures SPR :.....	28
II.6.a Sensibilité et rapport signal sur bruit du capteur SPR `a fibre optique.....	28
II.7. conclusion.....	36

CHAPITRE III : RESULTAT ET INTERPRETATION

1. Introduction :.....	37
2. Outil de simulation et méthode :.....	38
2.2La méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) :.....	38
2.3. Présentation du logiciel Rsoft CAD :.....	40
2.4Implémentation FDTD sous FullWAVE :.....	40
2.5Les étapes de simulation d'un guide d'onde :.....	40
2.6.Modélisation du guide d'onde MIM :.....	45
3. Structures et méthode de simulation :.....	46
3.1 Structure de forme T	47
3.1.3.3emeststructure :.....	50
3.2.courbes des différent indice dans cette structure :	51
3.3. Sensibilité de la 1erstructure :.....	52
3.4. Structure de forme double T :.....	53
3.5.structure à trois cavités de forme double T :	54
3.6.courbes des différent indice dans cette structure :	55
3.7.sensibilité de la 2emeststructure.....	56
4. Conclusion :	57

Conclusion Général

Bibiliographie

Listes des tableaux

Tableau I-1: Solutions des équations de Maxwell, modes TE et TM.	7
Tableau I-2 : Relation de dispersion pour les modes TE et TM.	8
TABLE II.1 – Sensibilité du capteur à fibre optique avec une couche de silver pour 3 différents 3 indices de réfraction	30
TABLE II.2 – Sensibilité et SNR du capteur SPR avec une couche d'argent pour 3 indices de réfraction Différentes	33
Tableau II-3 : Sensibilité et SNR du capteur a fibre optique avec une couche bimétallique (Ag/Au) (24/15nm) pour 3 indices de réfraction différentes.	35
TABLE III- 1 – Les valeurs des différents paramètres pour l'argent	46
TABLE III- 2 – La sensibilité obtenue grâce à cette structure.	52
TABLE III- 3 – La sensibilité dans cette structure du capture de forme double T.	56

Listes des figures

Figure I.1 : Oscillations électroniques a l'interface métal / diélectrique.....	4
Figure I-2: Orientation du plan a l'interface diélectrique / métal. β Représente le vecteur de propagation du plasmon le long de l'interface.	5
Figure I-3: Extension spatiale d'un plasmon de surface dans les directions z (a) et x p(b). ...	9
Figure I-4: Relation de dispersion des plasmons de surface.....	10
Figure I-5 Montages expérimentaux permettant d'exciter des ondes de surface avec un prisme.	11
Figure I-6 Relation de dispersion des plasmons de surface pour un système Prisme/métal ..	12
Figure I.7 Relation de dispersion des plasmons de surface pour un système prisme/métal/réseau.....	13
FIGURE II.1 – (a,b) Un séparateur de faisceau pour les plasmons de surface se propageant sur des rubans en or épais de 40 nm.	18
FIGURE II.2 – CFO dite aussi biconique ou la zone de détection se situe au milieu de la fibre optique.....	22
FIGURE II.3 – Illustration d'un CFO heterocore forme par le soudage de trois fibres optiques de meme diam`etre de gaine mais de diametres de coeur differents	22
FIGURE II.4 – Illustration d'un CFO ayant sa zone sensible polie sur un seul cote de la fibre optique qui est fixee dans un bloc de silice.	23
FIGURE II.5 – Différents clivages et/ou gravures d'extrémité de fibres utilisées comme CFO.	24
FIGURE II.6 – Capteur `a fibre optique dans la zone sensible est une pointe conique.....	24
FIGURE II.7 –Principe du capteur SPR.	25
FIGURE II.8– principe de fonctionnement d'un biocapteur	27
FIGURE II.9 – Principe de fonctionnement d'un ´equipement SPR conventionnel	27
FIGURE II.10 – différentes ´etapes de preparation des fibres capteur.....	28
FIGURE II.11 – Réponse du capteur SPR en interrogation spectrale.	29
FIGURE II.12 – Variation de la longueur d'onde de r´esonance en fonction de l'indice du milieu extérieur (analyte) : (ligne continue) courbe obtenue `a partir des points simules ; (point) valeurs expérimentales.....	30

FIGURE II.13 – Variation de la transmission obtenue en effectuant la différence entre la courbe pour. Ce graphe nous permet de déterminer la longueur d'onde pour laquelle la variation de L'indice correspond à une variation maximale de la transmission.....	30
FIGURE II.14 – Variation (T) en fonction de la longueur d'onde pour 3 différents indices `a partir de la réponse simulée (ligne continue) et de la réponse expérimentale (ligne discontinue) a) 1,3668, b) 1,380, c) 1,4018.	31
FIGURE II.15 – Variation (T) en fonction de l'indice de réfraction du milieu extérieur (analyte) pour une longueur d'onde de travail ($\lambda_{trav} = 582nm$).....	31
FIGURE II.16 – Réponse spectrale du capteur avec une couche d'argent de 52 nm d'épaisseur.(a) $n_s = 1$; 3395; (b) $n_s = 1$; 3430; (c) $n_s = 1$; 3561; (d) $n_s = 1$; 3620; (e) $n_s = 1$; 3872et(d) $n_s = 1$; 3922	32
Figure II-17 : Comparaison entre la réponse expérimentale (ligne continue) et la réponse numérique (ligne discontinue) d'un capteur SPR à fibre optique avec une couche bimétallique (Ag/Au) pour 4 indices différents du milieu extérieur : a)1,3335, b) 1,3472, c) 1,3553 et d) 1,3678.....	34
Figure II-18 : Comparaison entre la réponse expérimentale (ligne continue) et la réponse numérique (ligne discontinue) d'un capteur SPR à fibre optique avec une couche bimétallique (Ag/Au) pour 4 indices différents du milieu extérieur : a)1,3335, b) 1,3472, c) 1,3553 et d) 1,3678.....	34
Figure III-1 : La fenêtre RSoft CAD, affichant la barre de menus en haut, les barres d'outils supérieure et gauche et la ligne d'état en bas.	41
Figure III-2: La boîte de dialogue de démarrage qui apparaît chaque fois qu'un nouveau circuit est créé et demande des informations de base sur le circuit à modéliser.	42
Figure III-3 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit	42
Figure III-4 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant dans la structure	43
Figure III-5 : la structure de forme T.....	43
Figure III-6 :L'éditeur du Tableau de symboles	44
Figure III-7 : La boîte de dialogue Calculer le profil d'index.....	44
Figure III-8 : La fenêtre de paramètres de simulation Full WAVE.....	45
Figure III-9 – la structure de forme T pour un cavité.	47
Figure III-10 – la courbe de la figure 1 pour d'écalé "L"	48
Figure III-11– la structure de MIM en forme de deux T on symétriquement avec guide	49
Figure III-12– la courbe de la figure11.....	49
Figure III-13– la structure de MIM en forme de T on parallèle avec guide et la distance "x" entre deux "T"	50
Figure III-14– la courbe de la figure13.....	51
Figure III-15– les courbes des différent indice dans cette structure	52
Figure III-16– la structure de MIM en forme double T.....	53
Figure III-17 – courbe de la figure16	53
Figure III-18– structure à trois cavités de forme double T.....	54
Figure III-19 – la courbe de la structure à trois cavités de forme double T.....	54
Figure III-20 – les courbes des différent indice "n".	55

Liste des Abréviations :

MIM : métal - isolant - métal

RPS : la résonance des plasmons de surface

TE : transverse électrique

TM : transverse magnétique

CFO : Capteur à Fibre Optique

RIU : l'unité de l'Indice de Réfraction, ou Réfractive Index Unit en anglais

ADN : L'acide désoxyribonucléique

RU : unité de résonance

LOD : la limite de détection ou limite of détection en anglais

SNR : Signal-Noise Ratio

FDTD : la méthode du domaine de temps de différence finie

PML : Perfectly Matched Layer

RI : l'indice de refraction

INTRODUCTION

GENERAL

INTRODUCTION GENERAL

Introduction générale :

L'évolution très rapide des technologies engendre des contributions importantes dans divers domaines de compétences tels qu'en chimie, biochimie, biologie, environnement, matériaux, mécanique, médecine, physique et autres. Le développement d'instruments très avancés est devenu un enjeu majeur pour répondre aux besoins et aux exigences qui sont de plus en plus difficiles : une meilleure maîtrise du temps, une réponse extrêmement rapide, des composantes miniatures, une surveillance dans des milieux difficiles d'accès, une analyse et exécution en temps réel etc. Il existe aujourd'hui différents types de capteurs fondés sur des principes de détection très variés. Il y a une vingtaine d'années, les premiers capteurs à résonance de plasmons de surface encore connus sous les initiales SPR pour Surface Plasmon Résonance.[1]

En 1902, Wood, en observant le spectre d'une source continue de lumière blanche et en utilisant un réseau de diffraction en réflexion, Wood remarque de fines bandes sombres dans le spectre diffracté. Des analyses théoriques entreprises par Fano en 1941, ont abouti à la conclusion suivante : ces anomalies étaient associées aux ondes de surface (plasmons de surface) supportées par le réseau. C'est en 1968 qu'Otto montre que ces ondes de surface peuvent être excitées en utilisant la réflexion totale atténuée. Au courant de la même année, Kretschmann et Raether obtiennent les mêmes résultats à partir d'une configuration différente que celle de la méthode de réflexion totale atténuée. Suite à ces travaux, l'intérêt porté à l'étude des plasmons de surfaces a considérablement augmenté, en particulier pour caractériser les films minces et pour l'étudier le processus se déroulant sur des interfaces métalliques.[2] Ainsi, la grande longueur de propagation de ces ondes de surface (plusieurs longueurs d'ondes) induit une cohérence du champ confine sur l'interface [3]. et d'un autre côté, la forte densité d'énergie qu'elle porte (ces ondes de surfaces) est aussi une conséquence très intéressante de l'existence de ces ondes de surface sur certains matériaux [4].

Les propriétés électromagnétiques remarquables des nanostructures métalliques ont permis l'émergence ces dernières années de différents domaines de recherche et de développements technologiques, tous basés sur le phénomène de plasmon de surface. Ce dernier exploite la résonance, sous l'effet d'une onde électromagnétique, de l'oscillation collective des électrons de conduction du métal confinés à l'échelle nanométrique, qui peut être préparatif ou localisé. Les plasmons -polariton- de surface sont des ondes électromagnétiques se propageant à l'interface d'un métal et d'un diélectrique, résultant de l'interaction entre des photons et les électrons libres du métal. Les propriétés de confinement de la lumière dans des régions de taille

INTRODUCTION GENERAL

sub-longueur d'onde expliquent l'intéressement des dispositifs plasmoniques pour miniaturiser les connexions dans les composants d'optique intégrée. Cependant, les études précédentes ont mis en évidence deux limitations majeures : l'absorption du métal (pertes non radiatives) et le couplage des plasmons de surface à l'espace libre (pertes radiatives)[5].

Aujourd'hui, l'intérêt pour les plasmons de surface n'est plus à démontrer, en particulier signalons le succès de la résonance des plasmons de surface (RPS) qui permet de mesurer des variations d'indice de réfraction et d'épaisseurs de couches organiques avec une grande précision, d'où la conception des capteurs biologiques capables de détecter les interactions entre enzymes et substrat, antigènes /anticorps[6].

Le présent manuscrit est structuré en trois chapitres répartis comme suit.

Le premier chapitre est un chapitre introductif à la physique des polaritons de surface et c'est la base dans notre travail nous avons un rappel sur des notions générales sur les plasmoniques et ses différents types. Nous étudions les conditions d'existence des ondes de surface sur une interface plane séparant le vide d'un matériau quelconque.

Dans le chapitre deux, dans un premier temps, on donnera un aperçu sur les phénomènes des plasmons de surface et les guides d'ondes à fibres optiques et on présentera le principe des capteurs à fibre optique (CFO) et leurs caractéristiques avantageuses.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties. La première partie commence par une étude des différentes méthodes utiles pour la modélisation des plasmoniques et notamment la FDTD « Finite Difference Time Domain » puis nous décrivons ses avantages, ensuite nous présenterons un aperçu sur le logiciel "Rsoft CAD" nous précisons de ses outils .

dans La deuxième partie Nous allons proposer une structure en tandem métal-isolant-métal (MIM) composée d'un résonateur en forme de T et d'un guide d'onde de polariton plasmonique de surface (SPP). Le capteur ainsi construit grâce à cette structure de dimensions nanométrique, présente une sensibilité élevée et pourrait avoir des applications potentielles en génie biologique et biomédical.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Introduction aux plasmons-polaritons de surface

I.INTRODUCTION:

Ce premier chapitre introductif est consacré à une approche théorique est fondé sur l'étude des plasmons de surface qui apparaissent à l'interface entre deux milieux, dont l'un est généralement un métal (d'abord on parlera d'une interface plane). Comme nous le verrons ils représentent des ondes particulières, Ces ondes peuvent se propager parallèlement à l'interface, et l'amplitude du champ électromagnétique associé décroît exponentiellement en s'éloignant perpendiculairement de l'interface. Pour cette raison, ces ondes ainsi confinées sont souvent appelées ondes de surface. Ceci nous amènera à définir dans ce chapitre la profondeur de pénétration ou l'extension spatiale de ces ondes, « zone d'influence », particulièrement importante lors de l'étude des capteurs.

Nous discuterons aussi des caractéristiques que doit posséder le métal pour être un bon candidat dans les applications développées au cours de cette thèse. Nous pourrions ainsi justifier pourquoi et l'argent a été retenu pour les applications dans lesquelles le couplage plasmon de surface – lumière (domaine visible-proche infrarouge) est recherché. Pour aller plus loin sur l'origine de ces ondes de surface, nous développerons le problème électromagnétique de la propagation d'une onde à l'interface entre un milieu diélectrique et un milieu métallique parfait. Nous en déduisons la relation de dispersion qui relie la fréquence d'apparition du plasmon avec les caractéristiques spatiales du champ électromagnétique. Nous dériverons ensuite la Relation de dispersion des plasmons de surface ainsi que la Relation de couplage plasmon . Enfin, nous terminerons ce chapitre par un très bref tour d'horizon des applications impliquant les plasmons de surface.

I.2 Historique de la résonance des plasmons de surface :

La résonance des plasmons de surface est une technique utilisée en chimie analytique depuis le début des années 1990 avec l'apparition du premier instrument commercial fabriqué par Pharmacia Biosensor AB© (Suède). Cependant, la découverte du phénomène date du début des années 1900 lorsque Wood fit l'observation d'une diffraction inhabituelle de la lumière polarisée sur des réseaux de diffraction¹⁻². Ne pouvant expliquer le phénomène, il le décrit comme une anomalie. Par la suite, au début des années 1950, Pines et Bohm³⁻⁵ posèrent l'hypothèse comme quoi l'absorption de lumière serait due à l'excitation des électrons dans la bande de conduction du film métallique. Ces électrons oscillent à la surface du film métallique et sont ce qu'on appelle plasmon de surface. Plus tard, en 1968, Otto⁶ et Kretschmann⁷ montrèrent que les plasmons de surface pouvaient être excités en utilisant une géométrie de réflexion totale interne (ATR). Le premier instrument commercial basé sur le principe de la SPR fut vendu par Biacore en 1990 et fonctionnait à l'aide d'un prisme, d'un laser et d'une barre de diodes. Plusieurs modèles apparurent par la suite (Biacore 1000, 2000, 3000, X) et permirent à la résonance des plasmons de surface de devenir une technique fréquemment utilisée et établie dans le domaine de la recherche^[7].

I.3 Plasmonique :

Plasmonique est le nom donné (en 2000) à une discipline permettant d'exploiter l'interaction résonante obtenue dans certaines conditions entre le rayonnement électromagnétique (la lumière

en particulier) et les électrons libres à l'interface entre un métal et un matériau diélectrique (par exemple, l'air ou le verre). Cette interaction génère des ondes de densité électronique appelées plasmons ou plasmons de surface [8].

Le plasmon peut être décrit par une excitation collective d'électrons qui vont se comporter comme une seule particule. Il est possible de distinguer 2 sortes de plasmons :

I.3.1. Plasmons de volume :

On peut montrer que la densité de charge liée au gaz d'électrons dans le métal peut se mettre à osciller dans tout le volume du métal. La fréquence propre de ce phénomène est la fréquence plasma, définie par :

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (1-1)$$

Où n_e est la densité de charge, e la charge élémentaire d'un électron, m_e est la masse effective des électrons, et ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide. On associe alors à cette oscillation un quanta, $\hbar\omega_p$, que l'on appelle « plasmon de volume ».

I.3.2. Plasmons de surface :

La résolution des équations de l'électromagnétisme pour une onde incidente à une interface entre un métal et un diélectrique aboutit à une solution prévoyant l'existence de modes propres guidés, qui se traduisent par la présence d'ondes de surface, ou « plasmons de surface ». Elles résultent de l'oscillation quantifiée des électrons à la surface du métal. C'est un phénomène de résonance dont la fréquence peut aller de 0 à $\omega_p/2$.

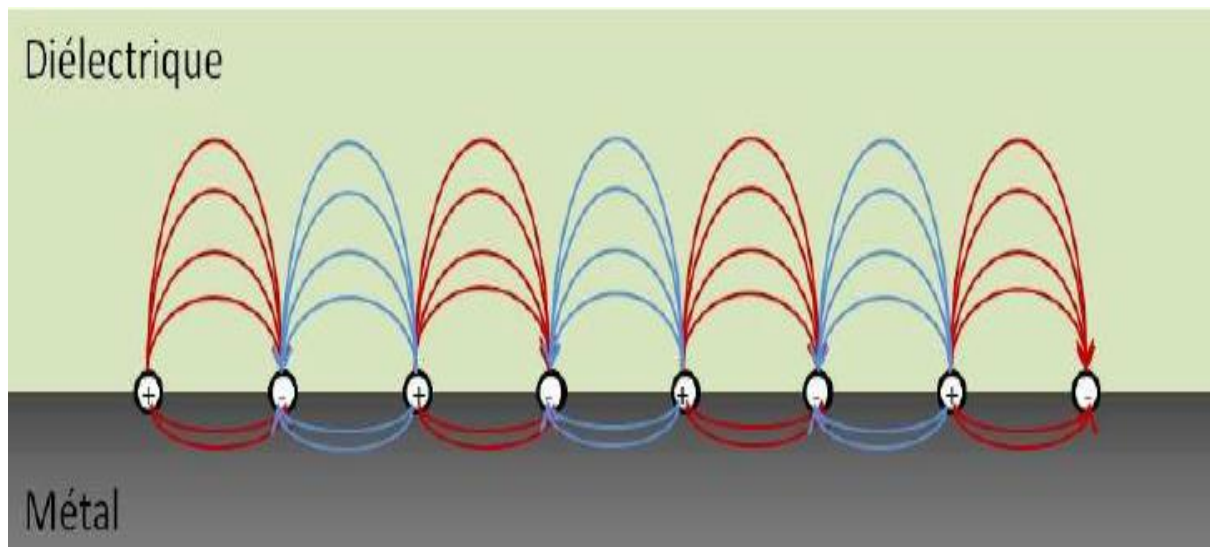


Figure I.1 : Oscillations électroniques à l'interface métal / diélectrique

Ces plasmons de surface sont de 2 natures différentes :

- Les plasmons de surface localisés, qui ne se propagent pas et restent confinés à l'interface du métal et du diélectrique, au voisinage de nanostructures. On les retrouve notamment à la surface de nanoparticules métalliques.

- Les plasmons de surface délocalisent, qui représentent des ondes électroniques se propageant le long de l'interface.

I.4 Le phénomène de résonance Plasmonique de surface :

Nous avons défini dans le paragraphe précédent les plasmons de surface comme des modes propres se propageant à l'interface entre un métal et un diélectrique. Cette notion de mode propre traduit en fait un phénomène de résonance, comme dans beaucoup d'autres domaines de la physique ondulatoire. La résonance est un phénomène que l'on observe pour un système soumis à une excitation extérieure. Pour une fréquence bien spécifique de l'excitation, la réponse du système va augmenter de façon significative. Ceci se traduit généralement par une augmentation de l'amplitude des oscillations d'une grandeur physique du système (par exemple l'élongation d'un ressort auquel est rattachée une masse et dont l'autre extrémité est soumise à une force périodique). La fréquence pour laquelle l'amplitude de ces oscillations est maximale s'appelle la fréquence propre du système. Nous nous proposons dans cette section de caractériser la résonance Plasmonique, et les techniques d'excitation de ces plasmons.

I.4.1. Plasmons à l'interface métal / diélectrique

L'étude de la résonance Plasmonique commence par la résolution des équations de Maxwell pour une onde électromagnétique à l'interface entre un milieu diélectrique et un milieu métallique. Par la suite les grandeurs relatives au diélectrique auront un indice d et celles liées au métal un indice m (Figure 1-3).

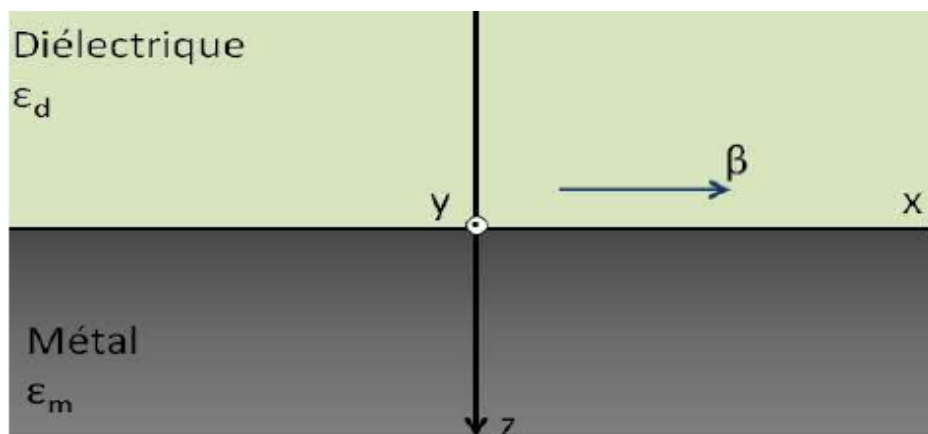


Figure I-2: Orientation du plan à l'interface diélectrique / métal. β représente le vecteur de propagation du plasmon le long de l'interface.

Dans la suite du mémoire, les milieux seront considérés comme linéaires, homogènes et isotropes. On suppose également qu'ils ne canalisent pas les champs magnétiques, c'est-à-dire que leur perméabilité magnétique relative est prise égale à l'unité, $\mu_r=1$.

Chapitre 1 Introduction aux plasmons- polaritions de surface

La solution que l'on cherche à construire est donc une onde électromagnétique se propageant dans la direction x , de vecteur d'onde β . La symétrie du problème permet de lever la dépendance en y des grandeurs du problème. Les champs peuvent alors s'écrire de la façon suivante :

$$\mathbf{E} = \mathbf{e}(z)e^{j(\beta x - \omega t)}$$

(1-2)

$$\mathbf{H} = \mathbf{h}(z)e^{j(\beta x - \omega t)}$$

Où \mathbf{e} et \mathbf{h} correspondent à la distribution des champs électrique \mathbf{E} et magnétique \mathbf{H} dans le plan (yOz) . Ces derniers ne dépendent que de z , à cause de la symétrie du problème.

Ces champs sont régis par les équations de Maxwell :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0$$

(1-3)

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

Où les champs $\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{B}$ et \mathbf{H} sont respectivement appelés vecteurs champ électrique (V/m), déplacement électrique (C/m), induction magnétique (Tesla) et champ magnétique (A/m). Dans un milieu de perméabilité diélectrique relative ϵ_i (pour $doum$), ils sont reliés par les relations suivantes :

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_i \mathbf{E} ; \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1-4)$$

On distingue alors 2 cas particuliers, en fonction de la polarisation du champ électrique dans le plan (yOz) : une première solution où le champ électrique est perpendiculaire au plan (xOz) , une seconde où il est parallèle celui-ci. On parle alors respectivement de polarisation $set p2$, ou encore de modes transverse électrique (TE) ou transverse magnétique (TM). Dans le cas TE, le champ électrique est donc orienté selon y , et dans le cas TM, c'est respectivement le champ magnétique.

En combinant les équations de Maxwell pour obtenir l'équation de propagation des ondes, on substitue les expressions pour les champs \mathbf{E} et \mathbf{H} et on obtient dans chaque milieu, selon le mode TE ou TM :

$$\text{Mode TE} \rightarrow \frac{\partial^2 e_y^i}{\partial t^2} + (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_i - \beta^2) e_y^i = 0$$

(1-5)

$$\text{Mode TM} \rightarrow \frac{\partial^2 h_y^i}{\partial t^2} + (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_i - \beta^2) h_y^i = 0$$

En introduisant pour chaque milieu une constante η_i , telle que $\eta_i = (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_i - \beta^2)^{1/2}$, alors on peut écrire pour chaque mode les solutions suivantes, regroupées dans le tableau 1-1 :

Tableau I-1: Solutions des équations de Maxwell, modes TE et TM.

Mode TE	Mode TM
$e_y^i = A_i e^{j\eta_i z} + B_i e^{-j\eta_i z}$	$h_y^i = C_i e^{j\eta_i z} + D_i e^{-j\eta_i z}$
$h_x^i = -\frac{\eta_i}{\mu_0 \omega} (A_i e^{j\eta_i z} - B_i e^{-j\eta_i z})$	$e_x^i = \frac{\eta_i}{\varepsilon_0 \varepsilon_i \omega} (C_i e^{j\eta_i z} - D_i e^{-j\eta_i z})$
$h_z^i = \frac{\beta}{\mu_0 \omega} (A_i e^{j\eta_i z} + B_i e^{-j\eta_i z})$	$e_z^i = -\frac{\beta}{\varepsilon_0 \varepsilon_i \omega} (C_i e^{j\eta_i z} + D_i e^{-j\eta_i z})$

La relation de dispersion du plasmon de surface s'obtient alors en considérant les conditions aux limites du problème et aux conditions de continuité des champs à l'interface entre le diélectrique et le métal. Comme les champs ne peuvent augmenter exponentiellement dans la direction z, alors certaines constantes dans les relations précédentes sont nulles ($A_m=B_d=C_m=D_d=0$).

Les conditions de continuité à l'interface métal/diélectrique imposent la continuité des champs tangentiels électriques et magnétiques, quelle que soit la polarisation du champ électrique. On obtient alors dans chaque cas TE ou TM, un système d'équations dont les solutions ne peuvent être non triviales uniquement si le déterminant du système est nul, ce qui fait alors apparaître la relation de dispersion dans chaque mode :

Tableau I-2 : Relation de dispersion pour les modes TE et TM.

Mode TE	Mode TM
$\eta_d + \eta_i = 0$	$\frac{\eta_d}{\varepsilon_d} + \frac{\eta_m}{\varepsilon_m} = 0$

Dans le mode TE, la relation de dispersion ne fait pas apparaître de modes guides, seulement des modes évanescents non propagatifs, car β est imaginaire. Pour le cas TM par contre, il existe un mode guide dont la constante de propagation de l'onde de surface associée est donnée par :

$$\beta_{sp}(\omega) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m(\omega)}{\varepsilon_d + \varepsilon_m(\omega)}} \quad (1-6)$$

I.4.2. Propriétés des plasmons de surface

Cette section s'intéresse aux principales propriétés optiques des plasmons de surface, leurs extensions spatiales, ainsi qu'une étude plus détaillée de la relation de dispersion.

A.Extension spatiale des plasmons de surface :

La figure 1-4 montre l'extension spatiale d'un plasmon de surface, et la décroissance exponentielle du plasmon dans les directions parallèle et perpendiculaire à l'interfacemétal/diélectrique.

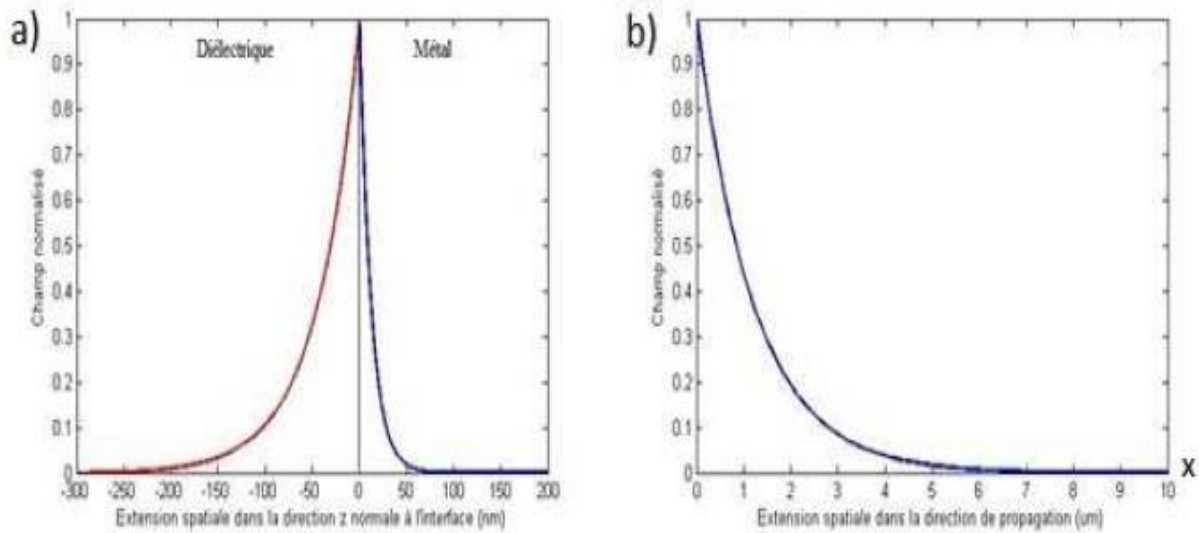


Figure I-3: Extension spatiale d'un plasmon de surface dans les directions z (a) et x p(b).

Les courbes sur la figure 1-4 sont tracées pour une longueur d'onde de 633nm, le diélectrique est du verre BK7, et le métal utilisé est de l'or, dont les caractéristiques optiques ont été montrées précédemment. A partir de ces décroissances exponentielles du champ, on définit généralement deux longueurs caractéristiques du plasmon :

- La longueur de propagation L_{sp} du plasmon, suivant l'axe x, est la longueur au bout de laquelle l'énergie du plasmon décroît d'un facteur $1/e$, soit

$$L_{sp} = \left(2\text{Im}(\beta_{sp})\right)^{-1}$$

- La longueur de pénétration du plasmon $L_{p,i}$, propre à chaque milieu, dans la direction normale à l'interface, et qui est définie de la même façon que L_{sp} par $L_{p,i} = L_{sp} = \left(2\text{Im}(\eta_i)\right)^{-1}$.

Cette dernière grandeur aura son importance dans la suite, puisqu'elle donne une idée de la longueur sur laquelle les plasmons de surface sont sensibles aux propriétés optiques des milieux, et elle offre ainsi un moyen de quantifier la capacité de biocapteurs à sonder le milieu environnant, et jusqu'à quelle distance le capteur peut être sensible. Cette dernière information permet donc de différencier les analytes détectables en fonction de leur grandeur physique. Il est intéressant de noter que l'extension spatiale de l'onde générée par le plasmon de surface est plus importante dans le diélectrique, ce qui le rendra plus sensible aux propriétés optiques de ce diélectrique.

B.Relation de dispersion :

La relation de dispersion des plasmons de surface apporte un certain nombre d'informations sur leurs conditions d'existence, et notamment comment faire pour les exciter. On peut tracer cette relation dans le plan (k, ω) comme le montre la figure 1-5 :

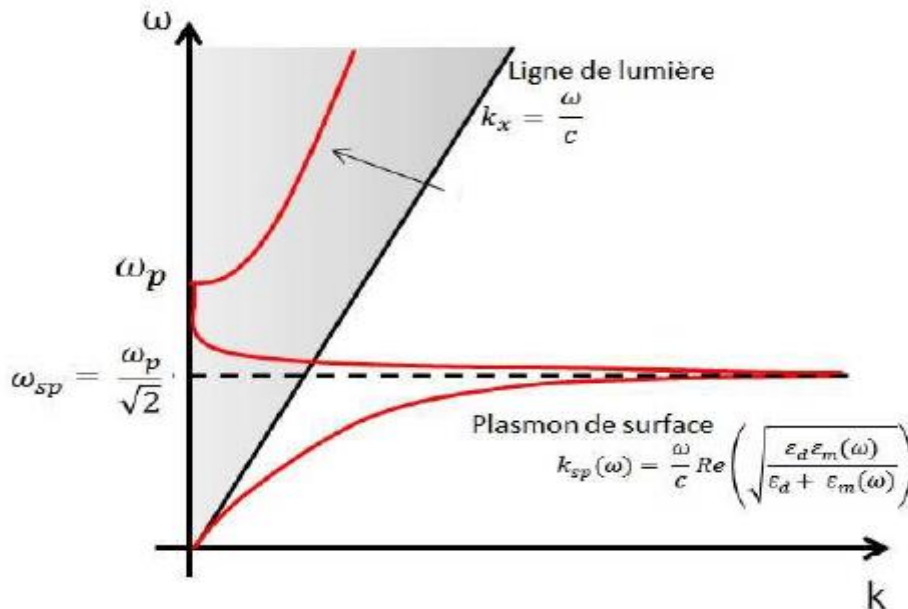


Figure I-4: Relation de dispersion des plasmons de surface.

La courbe peut se diviser en 3 parties distinctes : une première partie pour des fréquences inférieures à Γ , le terme d'amortissement dans le modèle de Drude pour la constante diélectrique, inversement proportionnel au temps de relaxation des électrons dans le métal, qui correspond à une onde de surface, mais sans être un plasmon de surface, on la réfère souvent comme une onde de surface de Sommerfeld [9]. Une seconde partie pour des fréquences entre Γ et ω_p , où l'on voit apparaître une onde évanescente présente à l'interface, puisque la courbe est en dehors du «cône de lumière», défini par la courbe de dispersion d'une onde plane se déplaçant dans le diélectrique (ici le vide) parallèlement à l'interface. Cette partie correspond aux plasmons de surface. La figure présentée tient compte des pertes ohmiques dans le métal, ce qui donne ce retour brusque de la courbe pour des fréquences supérieures à ω_{sp} . Si le métal était un conducteur parfait, alors la courbe de dispersion aurait une asymptote horizontale en ω_{sp} , mais les pertes dans le métal font apparaître ce «backbending» de la courbe. Il est intéressant de remarquer que ce backbending peut ne pas apparaître si l'on cherche une relation de dispersion avec une fréquence complexe mais un vecteur d'onde k réel. Le choix de solution dépend de l'application cherchée, notre étude se prête à une résolution de la relation de dispersion avec k complexe et fréquence réelle [10]. Enfin pour des fréquences supérieures à ω_p , on voit apparaître une onde propagative, correspondant à un minimum de réflectivité du métal, c'est finalement la position de l'angle de Brewster de l'interface métal /diélectrique, dans le plan (k, ω) . Dans la suite du manuscrit, en particulier lors de l'explication du couplage photon-plasmon, nous nous

limiterons à une relation de dispersion sans backbending, uniquement la courbe de dispersion du plasmon de surface.

La courbe de dispersion des plasmons de surface se trouve ainsi toujours en dehors du «cône de lumière». Comme il n'y a pas d'intersection entre les 2 courbes de dispersion, les plasmons de surface ne peuvent pas être excités par une simple onde plane progressive arrivant sur le métal. Il faut donc implémenter différents moyens afin de coupler une onde incidente au plasmon de surface, c'est le rôle des systèmes de couplage [11].

I. 4.3. Couplage photons-plasmons de surface

Le principe du système de couplage pour l'excitation des plasmons de surface repose sur la modification du moment de l'onde incidente. Plus précisément il faut augmenter le vecteur d'onde tangentiel de cette onde pour arriver au couplage. On peut distinguer 2 moyens d'arriver résultat. [12]

1. Couplage par prisme :

- Méthode (ATR): La méthode dite ATR (Attenuated Total Reflexion) est la plus employée pour exciter les plasmons de surface. Elle fut mise en pratique pour la première fois par A. Otto puis par E. Kretschmann qui utilisent un prisme comme coupleur (figure 1.6) [13, 6].



b) configuration de Kretschmann (a) configuration d'Otto

Figure I-5 Montages expérimentaux permettant d'exciter des ondes de surface avec un prisme.

Si le faisceau incident ne se propage plus dans le vide, mais dans un milieu d'indice n et s'il arrive sous un angle d'incidence θ , alors la composante tangentielle du vecteur d'onde des photons est augmentée et vaut :

$$k_x = \sqrt{\epsilon_p} \frac{\omega}{c} \sin \theta \quad (1-7)$$

Pour un angle spécifique θ , la condition de couplage est obtenue par l'équation:

$$k_x = k_{sp} \rightarrow \sqrt{\epsilon_p} \frac{\omega}{c} \sin \theta \quad (1-8)$$

Ce couplage est représenté sur la figure 1.7. Dans les deux configurations précédentes, le principe est de coupler la lumière incidente avec les plasmons de surface. Rappelons que ces plasmons sont des oscillations quantifiées et collectives d'électrons libres à l'interface d'un métal et d'un diélectrique. Ce couplage peut être provoqué par réflexion totale d'une onde optique injectée sur l'interface opposée. L'onde évanescente pénétrant la couche métallique permet d'exciter un plasmon de surface à l'interface métal/diélectrique extérieur.

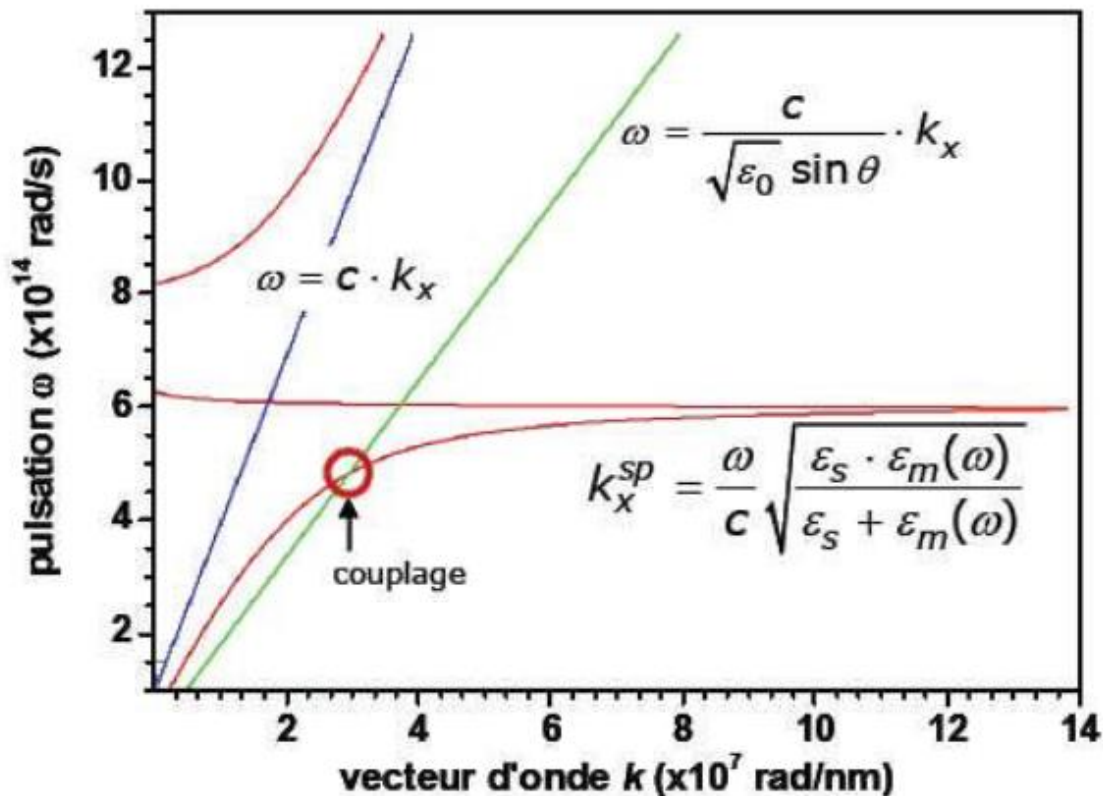


Figure I-6 Relation de dispersion des plasmons de surface pour un système Prisme/métal

2. Couplage par un réseau :

Si l'interface métal/diélectrique est périodiquement déformée d'un pas de a , l'onde optique incidente est diffractée sous différents angles suivant les caractéristiques du réseau de diffraction. Lorsqu'un photon arrive sur ce type de surface, il y aura un « allongement » de la composante (K_x) du vecteur d'onde de la lumière d'une quantité ($\pm \Delta K_x$) tel que :

$$\sqrt{\epsilon_p} \frac{\omega}{c} \sin \theta = k_{sp}(\omega) \pm n \frac{2\pi}{a} = k_{sp}(\omega) \pm \Delta k_x \quad (1-9)$$

Avec n un entier relatif. Cette expression se généralise en posant $\Delta k x$, comme le terme qui traduit les perturbations associées au réseau ou à la rugosité de surface par rapport à la surface plane. Dans ce cas, le couplage de plasmon de surface peut se traduire graphiquement en décalant la courbe de dispersion de plasmons de surface d'une quantité $\pm \Delta k x$ (figure 1.8).

On peut donc ramener la relation de dispersion des PS dans le cône de lumière, ce qui permet de coupler les plasmons de surface avec une onde électromagnétique grâce au réseau.

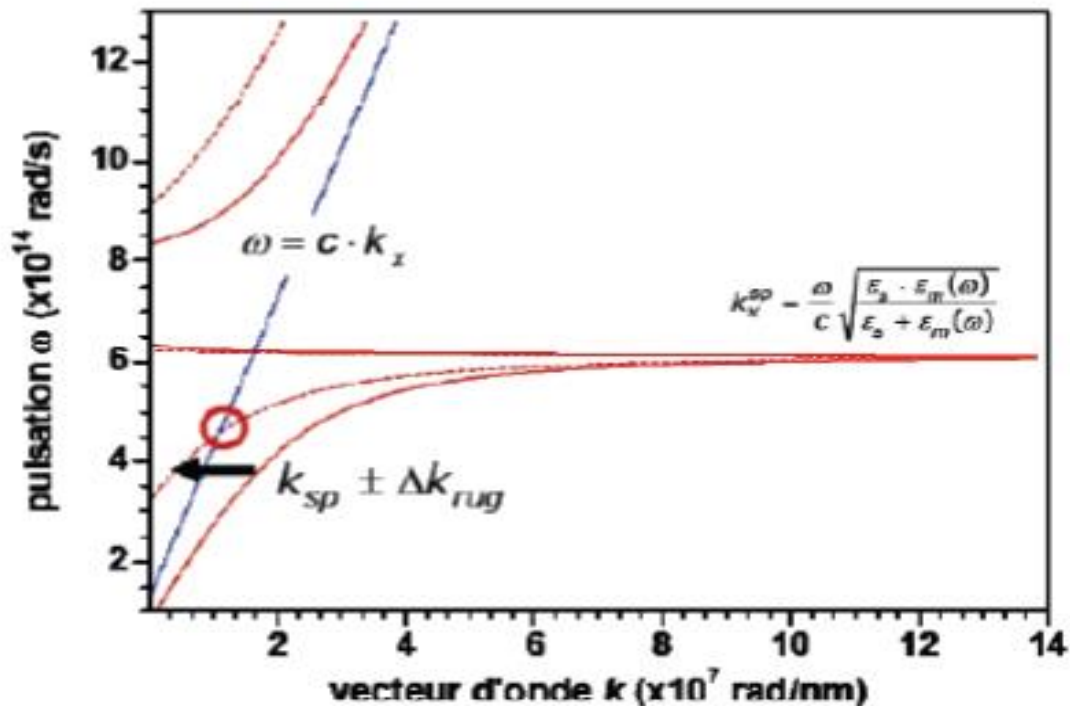


Figure I.7 Relation de dispersion des plasmons de surface pour un système prisme/métal/réseau [7].

I. 5. Application des plasmons de surface et modes de plasmon de surface :

I.5.1. Guide d'onde Plasmonique :

La propagation des plasmons sur une interface peut être gérée en modifiant localement la surface, via une rugosité ou un réseau de nano éléments. Par ce fait, il est possible de créer des éléments d'optiques classiques tels que des lentilles ou des miroirs plasmoniques. Nous verrons un confinement particulier du plasmon sur une bande métallique de très faible épaisseur (on peut comparer cela à une « fibre optique » plasmonique) qui permet de guider les plasmons sur des distances importantes.

I.5.2. Les plasmons et la transmission extraordinaire

La transmission extraordinaire. Avec cet effet, la plasmonique gagne ses lettres de noblesse et une reconnaissance de la part d'un public moins averti. Jusqu'ici les applications restent cantonnées à des sujets assez difficiles d'accès. Parmi les nombreuses publications sur la

transmission extraordinaire, il faut d'abord pouvoir distinguer deux sujets : la transmission extraordinaire à travers une couche métallique plane perforée de trous de dimensions inférieures à la longueur d'onde incidente, et la transmission à travers une couche métallique fine continue. Tandis que la transmission extraordinaire à travers une couche métallique perforée est au centre de l'attention scientifique et des développements, la transmission à travers une couche métallique continue (ondulée) reste un sujet peu exploré. Cela est en partie dû au fait que cette dernière fût comprise et expliquée assez tôt tandis que la seconde fût découverte plus tardivement et suscita une vive émulation quant à la compréhension du phénomène [14]. Nous noterons ici que l'attention s'est portée sur le concept certainement le moins transposable à l'industrie, pour le moment, une couche métallique perforée restant une structure difficile à réaliser à grande échelle (contrôle de l'épaisseur de métal, « perçage » des trous ou des fentes). Au contraire la couche de métal continue présentant une ondulation de surface où une structure apte à coupler des modes de plasmon constitue un objectif atteignable [15].

I.6. conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons décrit le phénomène de plasmons, leur condition de résonance, avons montré que ces plasmons sont des ondes de surface, solutions des équations de Maxwell, qui se propagent parallèlement à l'interface et dont l'amplitude du champ électromagnétique, Nous avons alors déduit la relation de dispersion qui relie la fréquence d'apparition du plasmon, Nous avons alors discuté les conditions de couplage plasmon de surface – onde lumineuse polarisée p ; nous avons discuté les modes de couplages les plus usuels, en particulier le couplage par prisme ou fibre optique (mode ATR).

Enfin, nous avons clôturé le chapitre par un tour d'horizon des applications impliquant les plasmons de surface.

CHAPITRE 2

Mise en œuvre des capteurs SPR

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

II.1 Introduction :

A près avoir présenté le phénomène des plasmons de surface et développé la physique qui ouvre des applications dans le domaine de détection, ce chapitre donne, dans un premier temps, un aperçu sur les fibres optiques et présente le principe des Capteurs à Fibre Optique (CFO) et leurs caractéristiques avantageuses. Ensuite, nous abordons en détail la fabrication des CFO particuliers fondés sur le principe de la résonance de plasmon de surface (SPR). Ces dispositifs particuliers, de la famille des CFO en général, sont caractérisés par le dépôt d'une couche métallique ultramince d'argent ou d'or, afin faciliter la création de plasmon de surface. Ensuite, nous détaillerons les différentes étapes de fabrication d'une fibre capteur en commençant par la gravure de la future zone sensible, sa métallisation et la caractérisation du dépôt effectué. Nous continuerons par la réalisation et l'étude du greffage sur la zone métallisée d'une couche de molécules organiques qui servira de protection et/ou de fonctionnalisation. Cette série de traitements se fait avant la caractérisation optique des fibres en vue d'application comme capteurs de molécules par SPR.

II.2 Composants plasmonique :

Un plasmon-polariton est un mode résultant du couplage d'une onde électromagnétique avec l'oscillation collective d'un plasma (gaz de charges libres) qui se manifeste comme une onde de polarisation à travers le plasma. Dans notre cas, le plasma est constitué des électrons de conduction d'un métal. Lorsque les oscillations électriques restent confinées à la surface du métal, le mode est appelé plasmon-polariton de surface. De tels modes, ne mettant en jeu que des densités de charges de polarisation, peuvent être supportés par des structures métalliques de dimensions nanométriques (films très minces ou nanoparticules) ce qui les rend pertinents dans de nombreuses applications des nanotechnologies. [16]

II.3 Guide plasmonique :

Les guides d'onde plasmoniques induits par un ruban diélectrique (DLSPWs pour "DielectricLoaded Surface PlasmonPolaritonWaveguides") permettent de transmettre à une échelle sub-longueur d'onde, des signaux électriques et plasmoniques (ondes optiques à l'interface entre un métal et un diélectrique) dans la même circuiterie. De plus, l'utilisation d'un ruban de polymère comme diélectrique permet de fonctionnaliser ces DLSPWs.

Cette configuration est par conséquent d'un grand intérêt pour des applications en photonique intégrée. Néanmoins, les DLSPWs souffrent de pertes importantes en raison de la dissipation dans le métal. Nous abordons le problème en montrant qu'il est possible de compenser les pertes en utilisant une configuration analogue à celle d'un amplificateur optique. [17]

II.3.1. Composant passifs fill métallique :

La première proposition de guide plasmonique date de 1997. Il s'agit d'un nano fil métallique qui peut supporter des modes plasmons extrêmement confinés [18]. Les premières démonstrations expérimentales ont suivi rapidement [19]. L'intérêt d'une telle configuration est que les structures sont très petites puisqu'il n'y a pas de diamètre de coupure. Par contre, seul des métaux d'excellente cristallinité assurent de bonnes propriétés de guidage. [20] Cela impose des

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

dépôts par voie chimique et limite les géométries accessibles, surtout au niveau de la réalisation de circuits [21].

II.3.2. Guides rubains :

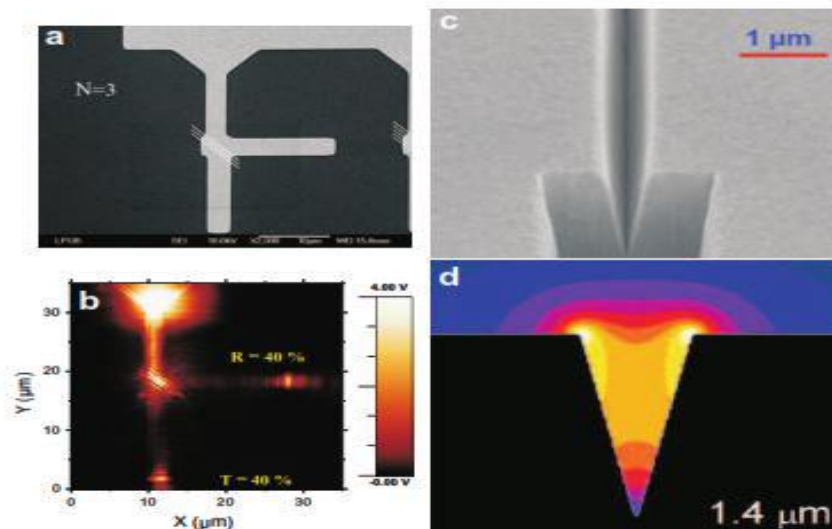


FIGURE II.1 – (a,b) Un séparateur de faisceau pour les plasmons de surface se propageant sur des rubans en or épais de 40 nm.

(a) microscopie électronique, (b) microscopie optique de champ proche, longueur d'onde dans le vide 800 nm. (c) Image (S. I. Bozhevolnyi)

Effectuée au microscope électronique à balayage d'un guide en "V" et (d) simulation de l'intensité du champ électrique le long du guide, longueur d'onde télécom.

Les guides rubans métalliques ont été très largement étudiés car ils sont facilement réalisables par des méthodes de lithographie (figure 1) [22] Leur forme ressemble à des guides de sections rectangulaires [23] Cependant, ils sont beaucoup plus minces que ces derniers : environ 50 nm d'épaisseur pour une largeur de quelques micromètres alors que les guides d'onde diélectriques ont une hauteur et largeur commensurable avec la longueur d'onde. En outre, ils soutiennent des modes interprétés comme résultant du confinement latéral du plasmon-polariton de surface, ce qui diffère très nettement des modes contenus par des guides diélectriques interprétés comme résultant du confinement des modes électromagnétiques de volume du diélectrique

Lorsque le superstrat et le substrat d'un guide ruban métallique sont constitués de matériaux diélectriques de même indice de réfraction, la longueur de propagation des plasmon de surface croît considérablement : on parle alors de plasmon-polariton de surface longue-portée (LRSPP pour "Long-Range Surface Plasmon Polariton"). Les modes de surface associés aux interfaces superstrat-métal et métal-substrat sont alors couplés. Selon les principes décrits initialement par R. Fuchs et K. L. Kliewer [24] dans le cas des phonon-polaritons de surface, les modes longue-portées décroissent moins vite dans le superstrat que dans l'air [25] Cette configuration permet une mise en œuvre relativement aisée des propriétés de guidage du plasmon. De plus, ces structures pourraient s'intégrer facilement à un circuit électronique et à faible coût. Le désavantage de ces guides est l'existence d'une largeur de coupure, [26] ce qui impose des

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

dimensions latérales pour le guide de quelques microns pour la longueur d'onde de référence $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. Malgré cela, la configuration étudiée dans cette thèse dérive directement de ces guides rubans [27] car la valeur relativement élevée de la largeur de coupure est associée à un confinement strict sur la largeur du métal. Différents composants passifs ont pu être réalisés à partir de cette configuration : guide droit ou courbé [29] miroir éventuellement semi-réfléchissant [29], coupleur directionnel [27] cavité plasmonique[30].

II.3.3. Quelques autres guides plasmoniques :

Plusieurs autres configurations ont été proposées et expérimentées. En particulier les guides en "V" qui supportent des plasmon-polaritons de canal (CPP pour "Channel PlasmonPolariton") (figure 1 (c) et (d)) assurent un fort confinement du mode et avec lesquels de nombreux composants passifs ont été réalisés (coupleurs, interféromètres de Mach Zehnder, résonateurs...). De tels guides compacts ouvrent la voie vers un nouveau type de circuiterie optique intégrée résolument futuriste puisqu'elle serait gravée dans les connecteurs électriques des puces électroniques.

Les guides métalliques coaxiaux sont une autre configuration qui présente des diamètres de coupure faibles. La figure 1 reproduit une récente proposition de transposer la loi de Moore à la photonique intégrée. Il est intéressant de constater que, avec les guides des plasmon-polaritons de canal, la plasmonique constitue une avancée appréciable pour l'intégration de composants passifs [17].

II.4 Capteur SPR a fibre optique :

II.4.1. Définitions :

Un Capteur à Fibre Optique (CFO) est un dispositif comprenant au moins une fibre optique qui permet de recueillir des informations représentatives de grandeurs physiques observées. Cette

Observation se fait par l'intermédiaire d'ondes lumineuses circulant dans la ou les fibres. Depuis de nombreuses années, sous le vocable « capteur à fibre optique », est englobée une très grande diversité de capteurs dans lesquels la fibre joue des rôles très différents.

Si la fibre est l'élément sensible lui-même, le capteur est alors dit intrinsèque. Si la fibre joue le rôle de simple support pour le transport de l'information recueillie par une cellule sensible, le capteur est alors extrinsèque. Parfois, elle est uniquement un composant du capteur (modulateur, retardateur...)

Une contradiction entoure la notion de CFO et concerne « l'immunité » et la « sensibilité » des fibres vis à vis de l'environnement. Ce paradoxe, mis en exergue au début des années 1980 confronte l'idée suivante : d'une part les fibres optiques, en majeure partie développées pour les télécommunications, présentent l'avantage sur les câbles métalliques d'être insensibles aux perturbations environnantes ; d'autre part, les mots même de « capteurs à fibres » laissent entrevoir le fait que les fibres puissent être sensibles comme capteur. Depuis quelques années, les deux domaines tendent à se rapprocher : les réseaux de capteurs font appel aux deux techniques ; un grand nombre de capteurs à fibres « sensibles » sont interconnectés sur des bus ou des réseaux par d'autres fibres « insensibles ». Ainsi, les CFO fondés sur le principe de

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

résonance plasmon de surface (SPR) répondent parfaitement à cette évolution, avec une zone sensible donc intrinsèques et une zone non traitée dite extrinsèque qui assure le transport de l'information de la source au spectromètre.

Le champ d'application des CFO est en expansion et couvre désormais presque tout l'ensemble de la mesure des grandeurs physique.[30.31]

II.4.2 Avantages des capteurs à fibre optique :

Depuis 1980, l'utilisation des fibres optiques dans le domaine de la détection et des mesures est très répandue mais elle reste toutefois bien secondaire à l'utilisation des fibres dans les télécommunications. Ce développement néanmoins très important, les CFO le doivent aux nombreux avantages qu'elles procurent. En particulier, nous pouvons citer, la possibilité de détection in situ, les faibles pertes sur les signaux transportés (peu d'atténuation), le tout pour un prix souvent réduit et un faible coût de maintenance. Citons encore :

la possibilité de faire des mesures à distance en utilisant la fibre comme capteur et porteur du signal ; cet avantage est particulièrement intéressant pour la détection de polluants dans des environnements à hauts risques (substances toxiques ou bien températures élevées).

Une facilité du multiplexage, ce qui permet des mesures simultanées sur plusieurs points d'échantillonnage.

La possibilité de transmettre plusieurs longueurs d'ondes, provenant de signaux différents, dans une même fibre et dans la même direction de propagation. Ceci donne la possibilité de contrôler plusieurs substances avec le même capteur.

La miniaturisation du capteur.

La flexibilité géométrique, permettant l'accès à des endroits difficiles pour d'autres capteurs usuels.

Le caractère inerte de la silice et de la lumière, les rendant moins dangereux dans les environnements explosifs que les capteurs utilisant des signaux électriques.

La quasi-immunité des fibres optiques vis à vis des interférences électromagnétiques.

Ajoutons que dans des systèmes de CFO, l'absence de pièces mécaniques en mouvement élimine les phénomènes d'usure, ce qui offre à ce type de capteur une excellente potentialité de survie. En revanche, les CFO pour la détection d'espèces chimiques et biologiques sont généralement sensibles à des paramètres indésirables pour la détection. Un exemple est la non spécificité de ces capteurs, c'est à dire leur sensibilité à plusieurs espèces chimiques en même temps, ce qui nécessite alors des étapes de fonctionnalisation des zones sensibles. [32]

II.4.3 Architectures des CFO

De manière générale, l'architecture d'un CFO comporte les sous ensembles suivants :

- Un émetteur de lumière : Les sources possibles sont les lampes halogènes, les lasers, les Diodes électroluminescentes (DEL), les diodes lasers (DL)... Chacune de ces sources

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

possède des caractéristiques différentes (puissance, cohérence, fiabilité, dimensions, prix...)

- Une fibre optique : Celle-ci peut être multimodes ou monomode, à saut ou à gradient d'indice, elle est le plus souvent en silice.
- Un transducteur : Une des caractéristiques physiques de la lumière traversant le transducteur (intensité, polarisation, longueur d'onde...) sera modifiée par le signal environnant à mesure. Dans ce travail la zone sensible de la fibre constitue elle-même cet élément.
- Un récepteur de la lumière : Ce sont des photomultiplicateurs, des photodiodes, des CCD.
- Le bruit associé aux détecteurs et leurs équipements électroniques, limite la capacité de détection.

Il faut ajouter que la réponse du détecteur varie souvent en fonction de la longueur d'onde.

Une chaîne de traitement du signal : Elle peut comporter des étages d'amplification, des circuits de filtrage, un démodulateur extrayant l'information liée au paramètre recherché et souvent un logiciel gérant l'expérimentation et l'exploitation.[30]

II.4.d Configurations des capteurs SPR à base de fibres optiques :

Dans la littérature nous avons recensé au moins 6 types de configurations expérimentales pour l'étude et le développement des capteurs SPR à fibre optique. Ces montages ont été développés pour les analyses dans des milieux liquides ou gazeux. Ces études sont basées sur l'emploi de fibres multimodes et monomodes. Typiquement, ces CFO sont réalisés à partir de fibres optiques dont le cœur a été dénudé sur une longueur limitée (~15 mm) puis revêtu par une ou des couches métalliques (argent ou or en général).

Si la zone métallisée dite « sensible » se situe au milieu de la fibre, on parlera alors de capteur en transmission ou “in-line transmission-based” CFO à SPR. La Figure II.3 présente en particulier le dispositif expérimental proposé par Abdelghani et al. . Pour ce type de configuration, la lumière issue d'un laser ou d'une lampe halogène est injectée à une extrémité de la fibre et recueillie à l'autre extrémité par une photodiode ou un spectromètre. Selon que l'on injecte une lumière monochromatique ou une lumière polychromatique, le mode d'« interrogation » ne sera pas le même. Dans le premier cas, il faudra maîtriser l'angle d'injection du faisceau laser dans la fibre tel qu'il est décrit sur la Figure II.4. Il s'agit alors de mesurer la puissance lumineuse transmise en fonction de l'angle d'injection. Cette technique demande un ensemble de composants d'interrogation et de rotation qui compliquent le système et le rendent relativement encombrant. Dans le second cas, il sera nécessaire de disposer d'un spectromètre afin d'effectuer une analyse en énergie (longueur d'onde). Cette méthode consiste à mesurer les variations du minimum de transmission de la lumière dans la fibre en fonction de la longueur d'onde. Ce type d'analyse (source blanche et analyse spectrale) permet de contourner divers inconvénients liés au contrôle difficile de la polarisation et de l'analyse angulaire classique. D'autres méthodes ont été explorées comme l'étude de la modulation de phase et de polarisation. Pour les CFO, les méthodes les plus exploitées restent néanmoins l'interrogation angulaire ou spectrale.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

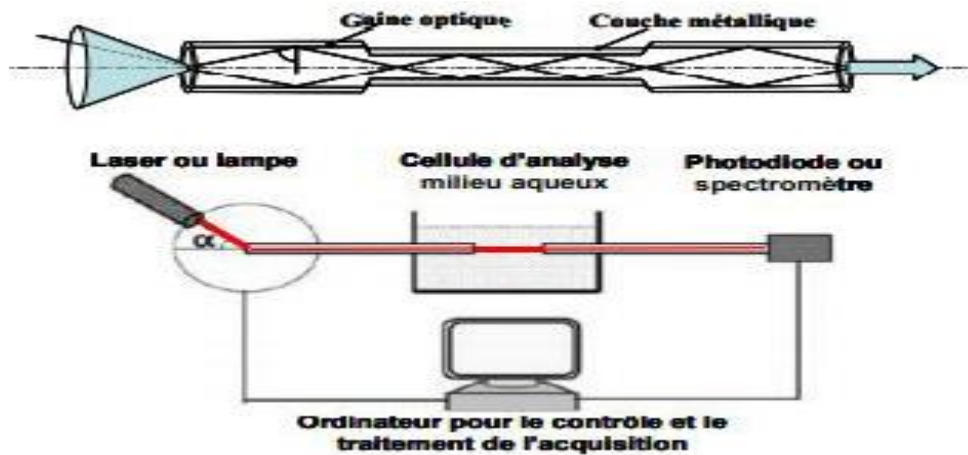


FIGURE II.2 – CFO dite aussi biconique ou la zone de détection se situe au milieu de la fibre optique.

Une autre configuration fondée sur la même idée existe dans la littérature. Il s'agit en particulier de l'utilisation de fibres formées par soudage de trois fibres de diamètres de cœur différents (Figure II.3). Cette configuration est appelée en anglais « heterocorestructured » CFO. Ici, on cherche délibérément à transmettre la lumière incidente du cœur vers la gaine optique, et c'est sur cette dernière que le dépôt métallique est réalisé. La lumière est ensuite réintroduite dans la fibre multimode et guidée jusqu'au système de détection. Cette géométrie a l'avantage d'être relativement simple à réaliser car elle ne nécessite pas le dénudage de la fibre. Elle permet de plus de réaliser des longueurs reproductibles de la zone sensible avec des jonctions nettes. Le principe de détection de cette configuration reste néanmoins le même, à savoir le SPR.

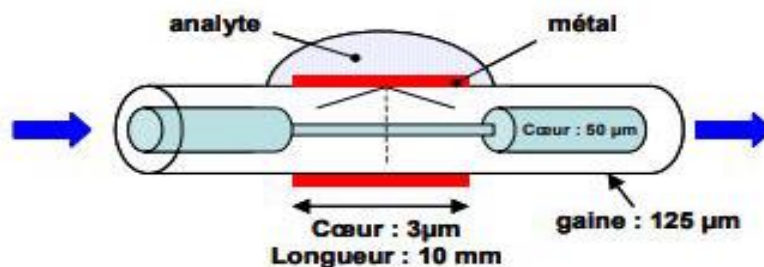


FIGURE II.3 – Illustration d'un CFO heterocore formé par le soudage de trois fibres optiques de même diamètre de gaine mais de diamètres de cœur différents.

Une dernière configuration en transmission décrite dans la littérature consiste à utiliser des fibres optiques courbées et fixées dans un bloc de silice comme nous le montre la Figure II.4. Dans cette configuration la gaine de la fibre est enlevée par polissage sur un seul côté. D'après Slavik et al., en interrogation spectrale, cette configuration de fibre permet d'atteindre des limites de détection de 5×10^{-7} RIU ce qui est excellent (RIU étant l'Unité de l'Indice de Réfraction, ou Refractive Index Unit en anglais). Signalons que pour ce type de capteur, le contrôle de la polarisation est indispensable du fait du caractère asymétrique du capteur.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

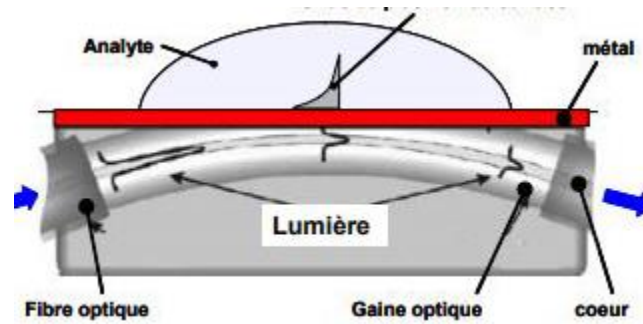


FIGURE II.4 – Illustration d'un CFO ayant sa zone sensible polie sur un seul cote de la fibre optique qui est fixee dans un bloc de silice.

Enfin, nous avons également recensé des montages qui utilisent des fibres dont la face d'entrée est clivée avec un angle de 45° . D'après les auteurs, cet angle permettrait une meilleure insertion de la lumière et permettrait en conséquence de travailler sur une gamme d'indice de réfraction plus large

Dans ce qui précède nous avons parlé des CFO en transmission (in-line transmission based) ; Nous allons maintenant reporter des travaux réalisés sur des CFO parnt en réflexion, sont appelés en anglais "terminatedreflection-based" CFO à SPR. Le point commun des différentes configurations que nous allons lister, est que la lumière est injectée dans la fibre et qu'un miroir disposé sur la face de sortie réfléchit le signal (Figure II.5). L'avantage évident de ces configurations est qu'elles permettent une miniaturisation de la sonde puisque la partie sensible est réduite du fait du double passage de la lumière sur cette zone. Nous avons recensé des travaux effectués sur des sondes de géométries effilées ou clivées comme représentées sur la Figure II.5 . La géométrie « gravure droite » (Figure II.5.A) est la plus couramment utilisée. Récemment, des résultats sur des fibres dont les extrémités comportent quatre faces polies (tetra-taperedfiberopticsensors) ont été publiés (Figure II.6.D) ; ce type de capteur a été développé pour ajuster les longueurs d'onde de résonance, mais aussi et surtout pour réaliser avec le même montage, deux études d'indice simultanément ; ceci est possible en contrôlant les longueurs d'onde de résonance sur deux zones clivées (les deuxautres zones étant considérées comme des miroirs). Cette modification de la géométrie paraît intéressante pour régler, en fonction des applications, la gamme de longueur d'onde de résonance sondée sans ajouter des couches diélectriques supplémentaires.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

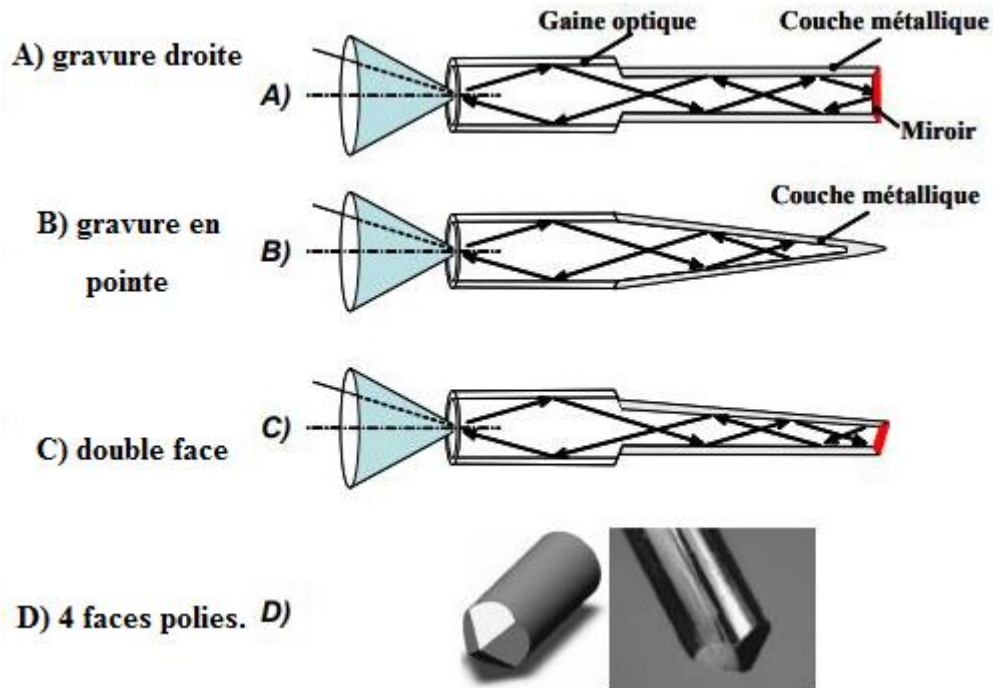


FIGURE II.5 – Différents clivages et/ou gravures d'extrémité de fibres utilisées comme CFO.

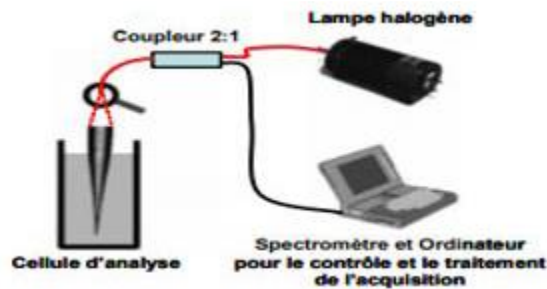


FIGURE II.6 – Capteur à fibre optique dans la zone sensible est une pointe conique

Dans le même ordre d'idée, des travaux ont également été effectués, notamment avec les fibres « double face » (Dual-Channel FOS), pour mesurer une auto-référence de l'indice de réfraction. Il s'agit ici de deux signaux indépendants mais qui proviennent de deux zones sensibles séparées d'une même fibre optique.

Citons enfin le développement de capteur SPR à fibre optique utilisant des pointes coniques gravées chimiquement en extrémité (Figure II.5.B et II.6). La fabrication de ce type de CFO est fondée sur la technologie des sondes de microscopes optiques en champ proche, ou SNOM Cette géométrie de pointe est particulièrement attractive et des essais sont en cours actuellement au laboratoire (Figure 6).

Les applications des capteurs dont la zone sensible est en extrémité de fibre optique sont très prometteuses mais la construction de ces CFO en réflexion (terminated-reflection-based systems) demeure relativement lourde. Aujourd'hui, les CFO en transmission (biconique) sont considérés

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

les plus efficaces et les plus simples de réalisation. De ce fait, c'est la géométrie que nous avons choisie dans ce travail et que nous allons développer dans la suite de ce chapitre.[32]

II.5 Capteurs `a SPR : principe de fonctionnement :

II.5 .a Le capteur SPR conventionnel :

Les capteurs de molécules sont devenus aujourd'hui indispensables dans de nombreux domaines allant de la recherche scientifique (fondamentale et appliquée) à l'observation des processus de production industrielle ou le contrôle de l'environnement mais aussi et surtout dans le secteur des sciences de la vie (biologie, biochimie, médecine, agro-alimentaire et écologie).

Les capteurs à résonance des plasmons de surface sont intensivement utilisés pour leur grande sensibilité, leur réponse rapide en temps réel et leur grande précision. Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre qu'une conséquence énergétique de la résonance des plasmons de surface (SPR) est visible sur le faisceau lumineux réfléchi, qui présentera une chute d'intensité à l'angle de résonance si la détection se fait par interrogation angulaire, ou bien à la longueur d'onde de résonance si elle se fait par modulation de la longueur d'onde de la lumière incidente (figure -7). Il existe donc deux méthodes de détection d'après la condition de couplage (de résonance) données par l'équation :[33]

$$\sqrt{\varepsilon\rho} \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon m(\omega) * \varepsilon_s}{\varepsilon m(\omega) + \varepsilon_s}} \quad (\text{II.1})$$

- 1- l'interrogation angulaire (θ) qui consiste à suivre la position angulaire du minimum de réflectivité SPR à une longueur d'onde λ fixe et
- 2- l'interrogation spectrale qui consiste à suivre la position spectrale (λ) du minimum de réflectivité SPR à un angle d'incidence θ fixe.

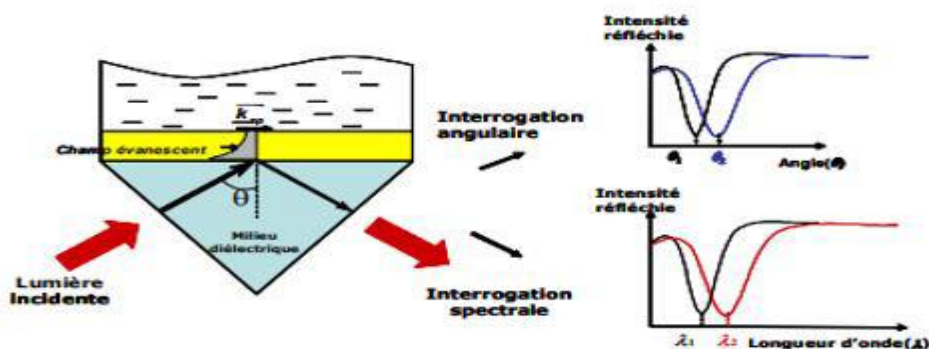


FIGURE II.7 –Principe du capteur SPR.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

Deux méthodes sont utilisées pour traquer la résonance des plasmons : l'interrogation angulaire qui consiste à faire varier θ pour une longueur d'onde fixée, ou l'interrogation spectrale qui consiste à faire varier la longueur d'onde pour un angle θ fixé. Une variation de l'environnement (indice) se traduira par un décalage des pics de résonance

Différentes configurations de capteur SPR ont été développées : à partir de guide d'onde optique, de réseaux ou de prisme (configuration de Raether-Kretschman) qui reste le coupleur le plus usuel. Durant la dernière décennie, on voit apparaître l'utilisation de fibres optiques comme coupleur sous différentes formes. Les capteurs à fibre optique ont un mérite, c'est celui d'avoir ouvert des domaines d'applications industrielles pour la mesure dans des endroits inaccessibles. L'utilisation des fibres optiques présente en plus des qualités générales des capteurs optiques, des avantages très attractifs sur lesquels nous reviendrons dans la suite du chapitre (immunités aux champs électromagnétiques, légèreté, faible encombrement et petite taille).[34]

II.5 .b Les biocapteurs :

Un capteur physique devient un « bio-capteur » en déposant un récepteur chimique ou biologique à sa surface. Un biocapteur est donc un dispositif qui utilise les réactions moléculaires pour détecter une cible à analyser. Il associe physiquement l'élément de reconnaissance (récepteur) à un transducteur qui traduit la réaction entre le récepteur et sa cible en un signal physique interprétable

Il existe plusieurs types de biocapteurs. Ils se distinguent principalement par le mode de transduction (optique, électrochimique, mécanique ou thermique) ou par la nature de récepteur (chimique ou biologique)]. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à l'un de ces modes de transduction : la résonance des plasmons de surface ou SPR. La SPR permet de détecter et quantifier des interactions moléculaires. De plus, il offre la possibilité de suivre les interactions en temps réel. La SPR peut être appliquée à toutes les applications moléculaires sans marquage des molécules et indépendamment de la nature de récepteur

Les nombreuses possibilités ouvertes dans ce domaine et le besoin de plus en plus important pour développer des appareils robustes et fiables permettant la compréhension des phénomènes biomoléculaires ont donné naissance à des entreprises spécialisées dans la vente d'appareils SPR, telle que la compagnie BIAcore International créée en 1990. La configuration des instruments conventionnels tels que le BIAcore et le principe de fonctionnement sont illustrés dans la figure I

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

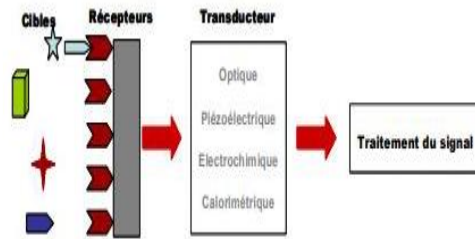


FIGURE II.8– principe de fonctionnement d'un biocapteur

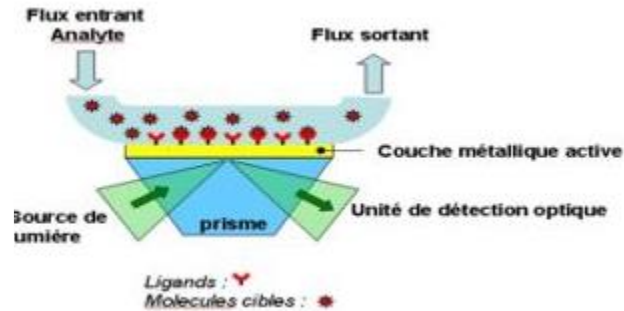


FIGURE II.9 – Principe de fonctionnement d'un équipement SPR conventionnel

Ce type d'appareil trouve différentes applications industrielles, en particulier dans l'agroalimentaire, l'immunogénicité, la protéomique et la découverte de médicaments. Plus précisément, la technologie SPR permet de détecter les interactions suivantes :

- protéine/protéine
- ADN/ADN
- protéine/ADN
- lipide/protéine
- systèmes hybrides des molécules.

Le principe de fonctionnement peut se résumer ainsi : le ligand (récepteur) est immobilisé sur l'interface du biocapteur (prisme) pour capturer les cibles appelées ici analytes qui sont injectées sur cette interface par un flux continu à l'aide d'un système microfluidique. Le phénomène de résonance des plasmons de surface est alors détecté grâce à l'interaction entre le faisceau lumineux et la surface d'or. Le signal détecté traduit l'interaction ligand/analyte à l'interface du biocapteur. Les changements de masse (d'indice de réfraction) induits par l'association ou la dissociation des complexes provoquent une perturbation locale de l'indice du milieu diélectrique et influent sur la position de l'angle de résonance. L'enregistrement du déplacement de l'angle de résonance en fonction du temps permet de suivre l'association et la dissociation entre l'analyte et le ligand. Le signal SPR est exprimé en unité de résonance (RU) et tracé en fonction du temps sous la forme d'un sinogramme. À titre d'exemple, dans la technologie BIAcore, une variation de 1000 RU correspond à une déviation de l'angle de résonance de 0,1 degré et à une

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

fixation de 1ng de protéine par mm² de surface. Une analyse mathématique des données enregistrées permet de quantifier le nombre de molécules greffées et de déterminer les paramètres cinétiques et l'affinité à l'équilibre de l'interaction ligand-analyte.[6]

II.6 Realisation de captures SPR :

Afin d'utiliser une fibre optique comme transducteur du CFO à SPR, celle-ci doit être soumise à une série de traitements préalables essentiels pour pouvoir générer les conditions de résonance plasmon de surface. Notre choix s'étant porté sur une configuration de fibre dite biconique, les différentes étapes de préparation peuvent être résumées ainsi (Figure II-10) : une fibre multimodale est dénudée de ses gaines mécanique et optique (Figure II.10, étape 1) puis la zone ainsi créée est recouverte d'une couche métallique, siège de résonances plasmons permettant la détection de substances environnantes (Figure II.10, étape 2). Finalement, une couche organique de protection ou de fonctionnalisation vient recouvrir le « manteau » métallique (Figure II.10, étape 3) [32]

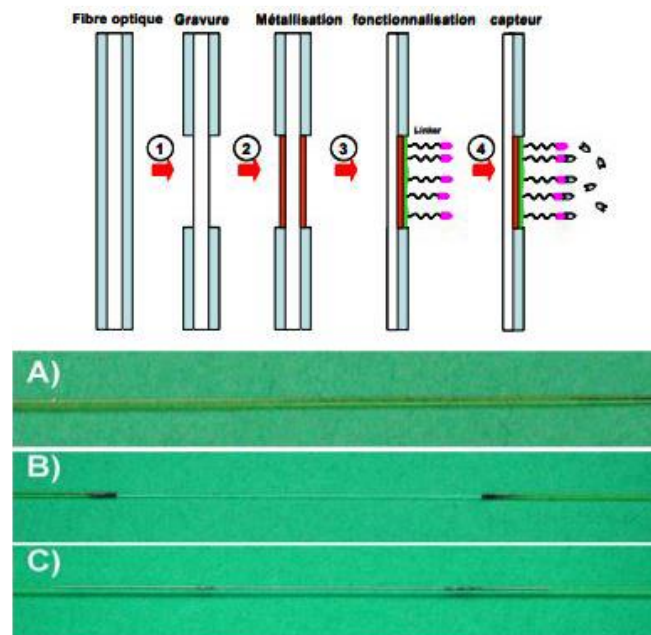


FIGURE II.10 – différentes étapes de préparation des fibres capteur.

Photo A) fibre optique non dénudée ; Photo B) fibre optique dont la gaine mécanique a été enlevée ; Photo C) fibre optique métallisée après gravure chimique de la gaine optique.

II.6.a Sensibilité et rapport signal sur bruit du capteur SPR à fibre optique :

Notre capteur SPR à fibre optique fonctionne en interrogation spectrale : pour chaque position en longueur d'onde du pic de résonance des plasmons de surface correspondent un indice de réfraction (ns) de l'analyte (milieu environnant). En effet, lorsque nous faisons varier l'indice de

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

réfraction du milieu environnant de δn_s ($n_s \rightarrow n_s + \delta n_s$), le pic de résonance est décalé par une variation $\delta \lambda_{res}$ ($\lambda_{res} \rightarrow \lambda_{res} + \delta \lambda_{res}$) de la longueur d'onde de

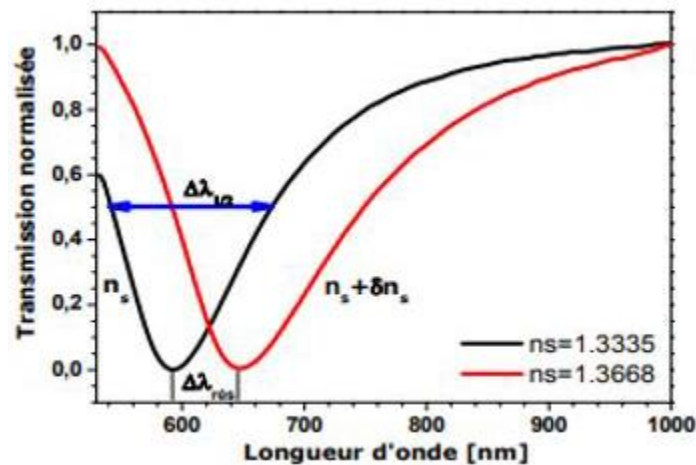


FIGURE II.11 – Réponse du capteur SPR en interrogation spectrale.

Dans cette section, nous nous sommes intéressés à évaluer deux paramètres qui définissent la performance du capteur SPR : la sensibilité S et la limite de détection LOD (limit of detection) via le rapport signal sur bruit SNR (Signal-Noise Ratio). Nous présentons une comparaison entre les valeurs obtenues pour ces deux paramètres selon différentes configurations de capteurs SPR. Signalons que pour un meilleur fonctionnement du capteur, les deux paramètres S et SNR doivent avoir les plus grandes valeurs possibles

II.6.b Sensibilité :

Un capteur est dit sensible s'il est capable de détecter les variations minimales de la grandeur mesurée (indice, épaisseur, concentration...). En particulier, le calcul de la variation de la longueur d'onde de résonance par rapport à l'indice de réfraction du milieu diélectrique permettra de définir une première sensibilité notée par $S\lambda_n$:[40]

$$s\lambda_n = \frac{\delta \lambda_{res}}{\delta n_s} \quad (II.2)$$

$$(nm=RIU)$$

À partir de cette définition, et de la figure III-34 qui présente la variation de la longueur d'onde de résonance en fonction de l'indice de réfraction de l'analyte (n_s), nous avons présenté dans le tableau III-2 les valeurs de la sensibilité calculées à partir des mesures expérimentales et des courbes obtenues par la simulation. Ces valeurs comprises entre $1,6 \times 10^3$ et 3×10^3 nm /RIU présentent un bon accord entre les données expérimentales et les valeurs simulées

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

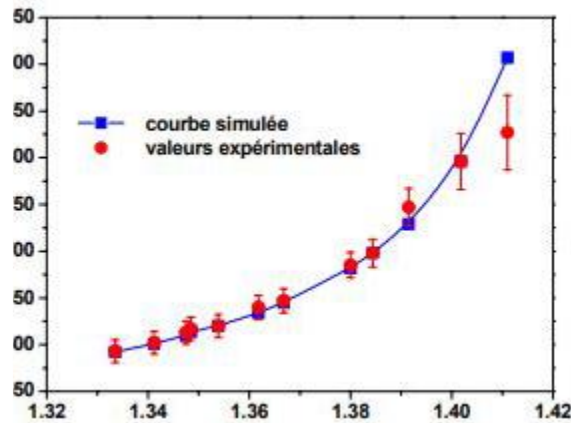


FIGURE II.12 – Variation de la longueur d’onde de r’résonance en fonction de l’indice du milieu extérieur (analyte) : (ligne continue) courbe obtenue `a partir des points simules ; (point) valeurs expérimentales

Indices (RIU)	Δn_s (RIU)	λ -Tmax (nm)			$S\lambda_n$ (nm/RIU)
		Expt,	Theo	Expt.	Theo
1,3335		594	592		
1,3668	0,0333	647	645	$1,593 \times 10^3$	$1,592 \times 10^3$
1,380	0,0465	698	692	$2,236 \times 10^3$	$2,15 \times 10^3$
1,4018	0,0683	798	796	$2,987 \times 10^3$	$2,987 \times 10^3$

TABLE II.1 – Sensibilité du capteur `a fibre optique avec une couche de silver pour 3 differents 3 indices de réfraction

Par ailleurs, il est possible de calculer la variation de la transmission (δT) par rapport à la variation de l’indice de réfraction du milieu extérieur (δn_s) à une longueur d’onde fixe, qui correspond à la longueur d’onde pour laquelle la dérivée $\delta T / \delta \lambda$ est maximale (voir figure III-33). La détermination de la dérivée de la transmission par rapport à l’indice de réfraction implique la définition d’une deuxième sensibilité notée ST_n : [41]

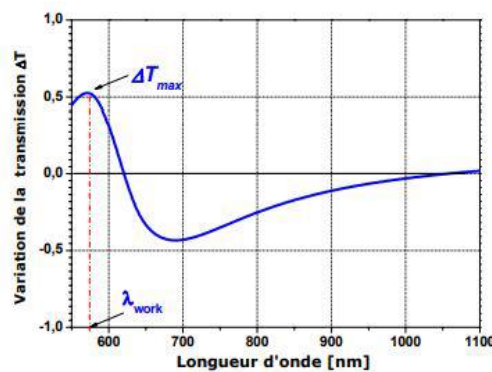


FIGURE II.13 – Variation de la transmission obtenue en effectuant la différence entre la courbe pour. Ce graphe nous permet de déterminer la longueur d’onde pour laquelle la variation de L’indice correspond à une variation maximale de la transmission.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

La figure II-14 montre la soustraction des courbes enregistrées avec trois indices différents (1,3668, 1,380 et 1,4018) de la courbe enregistrée avec l'eau (1,3335) en fonction de la longueur d'onde. Cette figure illustre les deux extrema pour chaque indice.

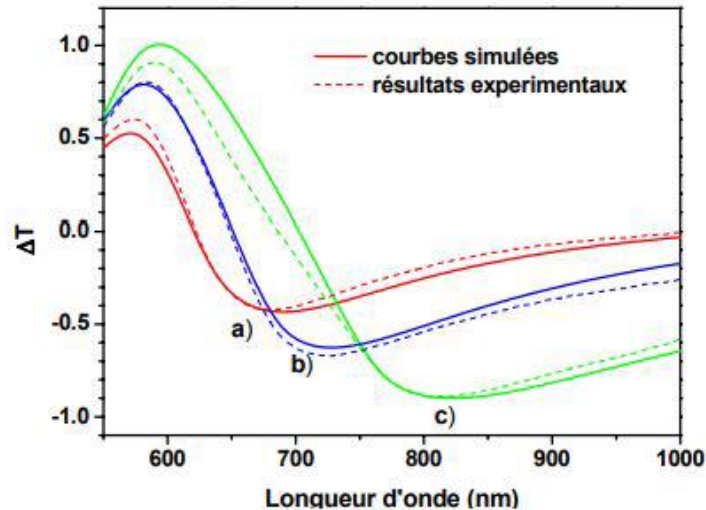


FIGURE II.14 – Variation (ΔT) en fonction de la longueur d'onde pour 3 différents indices à partir de la reponsesimulee (ligne continue) et de la reponseexperimentale (ligne discontinue) a) 1,3668, b) 1,380, c) 1,4018.

Dans ce cas, la meilleure condition de travail correspond à la longueur d'onde où la variation de la puissance est la plus élevée. Ce qui justifie notre choix de 582 nm comme longueur d'onde de travail. Nous pouvons noter que pour cette valeur de longueur d'onde, le maximum de la variation ΔT varie de façon monotone avec l'indice de réfraction. Tandis que pour les autres extrema ($> 680\text{nm}$), nous remarquons que le maugmente de 1,3668 à 1,4018. Dans ce cas, il devient plus difficile de choisir la longueur d'onde du travail unique. inimum de ΔT passe rapidement de 689 à 820 nm lorsque l'indice de réfraction.

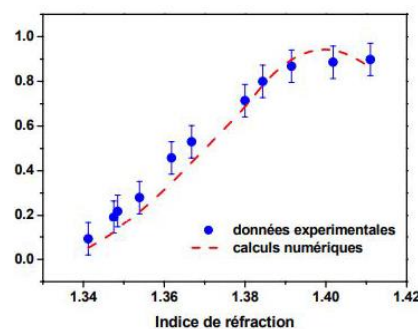


FIGURE II.15 – Variation (ΔT) en fonction de l'indice de refraction du milieu exterieur (analyte) pour une longueur d'onde de travail ($\lambda_{\text{trav}} = 582\text{nm}$)

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

La figure II-15 présente un bon accord entre les valeurs théoriques et expérimentales de ΔT en fonction de l'indice de réfraction à une longueur d'onde de travail $\lambda_{\text{trav}} = 582$ nm. Ceci nous permet de calculer une sensibilité ST_n (pente de la courbe) voisine de 17,8

II.6.b .1 signal sur bruit :

La limite de détection est le second paramètre de performance qu'il est important d'étudier pour caractériser un capteur SPR. La limite de détection ou résolution est la variation minimale du paramètre mesuré (l'indice de réfraction n_s ou la transmission T pour nous) que l'on sera capable de résoudre. Elle dépendra donc de la résolution spectrale qui est calculée ou estimée à partir des différents facteurs, (i) la résolution instrumentale liée aux équipements utilisés pour la mesure du signal (spectromètre, réponse de la CCD,...), (ii) la forme intrinsèque du signal mesuré. En effet, notre capacité à séparer deux informations distinctes dépendra de l'amplitude du pic d'absorption, de sa forme et de sa largeur. En particulier, des grandes largeurs à mi-hauteur des bandes d'absorption obtenues avec des fibres à grande ouverture numérique, ne permettront pas d'observer avec une grande précision une faible variation de la longueur d'onde de transmission minimale. [6.36]

II.6.b .2 fibre optique avec une couche d'argent :

Les capteurs réalisés avec un dépôt d'or sont plus stables dans le temps que ceux métallisés avec un dépôt d'argent. Ce dernier métal se dégrade très rapidement en milieu aqueux. Par contre, les pics de résonance obtenus avec l'argent sont moins larges que ceux avec l'or. Ceci rend la détection SPR plus précise avec l'argent. Le comportement des courbes de résonance est montré sur la figure III-39 qui présente les réponses expérimentales du capteur SPR à fibre optique pour une couche d'argent d'épaisseur $52 (\pm 2)$ nm. Les autres caractéristiques de la fibre sont les mêmes que celles utilisées avec les fibres métallisées avec l'or. Les courbes présentées sur cette figure correspondent aux indices suivants : (a) 1,3395, (b) 1,3430, (c) 1,3561, (d) 1,3620, (e) 1,3872 et (f) 1,3922. [6]

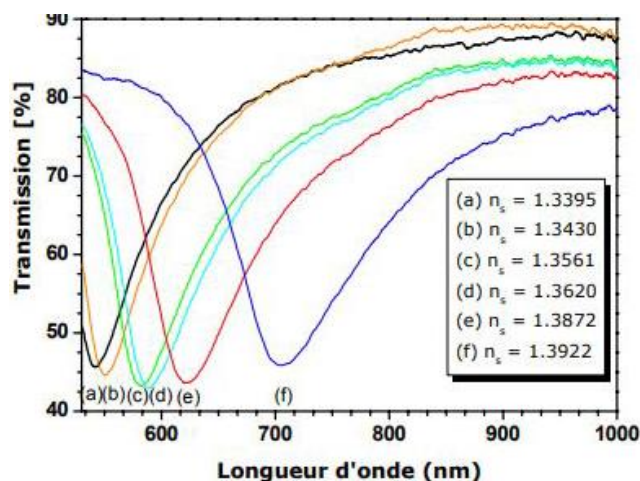


FIGURE II.16 – Réponse spectrale du capteur avec une couche d'argent de 52 nm d'épaisseur. (a) $n_s = 1,3395$; (b) $n_s = 1,3430$; (c) $n_s = 1,3561$; (d) $n_s = 1,3620$; (e) $n_s = 1,3872$ et (f) $n_s = 1,3922$

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

A partir de ces résultats expérimentaux, nous pouvons constater que le capteur SPR réalisé avec une couche d'argent a une gamme de fonctionnement comprise entre 1,3561 et 1,40 en raison de notre système de mesure, et plus précisément du spectromètre, qui n'a pas été prévu pour mesurer des signaux de longueur d'onde inférieure à 530 nm. Les valeurs de la sensibilité et du SNR pour un capteur réalisé avec une couche d'argent sont reportées dans le tableau III-4. Ces valeurs calculées à partir des courbes expérimentales nous indiquent que l'argent est très sensible à la variation de l'indice de réfraction dans sa gamme de fonctionnement. Il présente ainsi une meilleure précision pour la mesure de la longueur d'onde de résonance. Le SNR d'un capteur fabriqué avec une couche d'argent sera donc plus élevé que celui obtenu avec une couche d'or (pour $\Delta n_s=0,03$, nous avons obtenu un SNR de 0,404 avec l'or et un SNR de 1,921 avec l'argent).

Indices (RIU)	Δn_s (RIU)	$\lambda-T_{max}$ (nm)	SNR	$S_{\lambda n}$ (nm/RIU)
		Exp.	Exp.	Exp.
1:3561		540		
1:3620	0,0059	588	0,093	$1,106 \times 10^3$
1:3872	0,0311	633	0,627	$2,286 \times 10^3$
1:3922	0,0361	705	1,921	$3,407 \times 10^3$

TABLE II.2 – Sensibilité et SNR du capteur SPR avec une couche d'argent pour 3 indices de réfraction différentes

II.6.b .3 Capteur SPR par dépôt d'une couche bimétallique (argent/or) :

Une nouvelle structure de la couche métallique a été le sujet de différentes études dans le but de coupler les avantages de deux métaux]. Cette structure de la couche métallique est alors une combinaison de deux couches argent/or (appelée couche bimétallique) où l'or joue le rôle de couche protectrice de l'argent. Il est théoriquement prouvé que l'intensité du champ électrique de l'onde évanescente à l'interface métal/diélectrique obtenue avec un dépôt d'une couche bimétallique argent/or est 3 fois plus forte que celle obtenue avec une simple couche d'or[37]. Une augmentation d'intensité du champ évanescent (via la couche d'argent) implique une pénétration plus prononcée dans le milieu sensible et augmente ainsi la zone de détection. Sharma et Gupta[35] ont présenté une analyse théorique et numérique sur la performance d'un capteur fibre optique avec une telle couche bimétallique. Ils ont notamment montré l'effet de différents paramètres de la fibre capteur sur la sensibilité et le rapport signal de bruit (SNR). De plus, des mesures expérimentales ont été réalisées par Alieva et Konopsky sur une couche d'argent protégé par une couche d'or. Yuan and al. [38] ont montré par des travaux expérimentaux qu'un système ATR à double couches (Ag /Au) est plus sensible qu'un système avec une seule couche d'argent et plus précis qu'un autre fabriqué avec une simple couche d'or. Dans le même contexte, Zynio et al. [39] ont montré l'avantage d'utiliser une couche bimétallique argent/or pour la détection en temps réel des interactions moléculaires par un biocapteur SPR. Pour profiter de la sensibilité de l'or et sa stabilité dans le temps ainsi que de la valeur plus élevée du SNR obtenue avec l'argent, nous avons déposé une couche bimétallique Argent/Or sur la zone dénudée d'une fibre optique. Les caractéristiques de la fibre multimodale utilisée sont les suivantes : une longueur totale de 30 cm, un diamètre de 400 μm , un indice du coeur de 1,457 et une zone dénudée et métallisée de 20 mm. Les épaisseurs des deux couches

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

déposées ont été évaluées par profilométrie. Nous avons obtenu une épaisseur de $24 \pm 5\text{nm}$ pour la couche d'argent et de $15 \pm 5\text{nm}$ pour celle d'or.

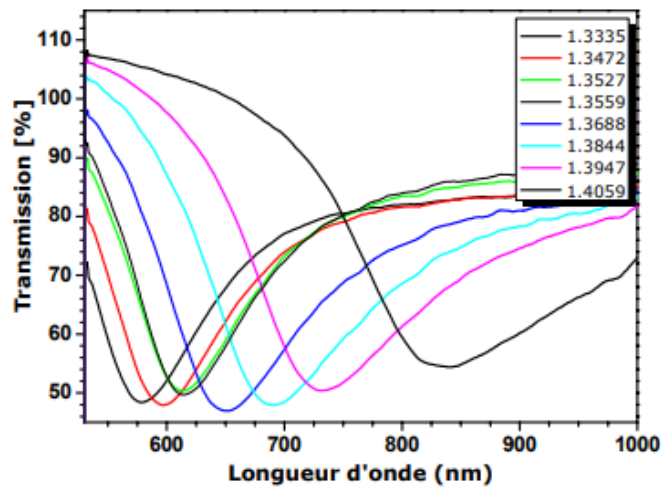


Figure II-17 : Comparaison entre la réponse expérimentale (ligne continue) et la réponse numérique (ligne discontinue) d'un capteur SPR à fibre optique avec une couche bimétallique (Ag/Au) pour 4 indices différents du milieu extérieur : a)1,3335, b) 1,3472, c) 1,3553 et d) 1,3678.

La figure II-17 présente la réponse spectrale du capteur avec cette couche bimétallique (Ag/Au) pour différents indices n_s . Ce type de capteur a une gamme de fonctionnement identique à celle de l'or (1,33-1,41) mais nous remarquons, conformément à ce que nous attendions, que les pics de résonance sont moins larges que ceux obtenus avec une seule couche d'or. Par exemple, la largeur à mi-hauteur du pic de résonance ($\delta\lambda/2$) obtenue dans l'eau ($n_s=1,3335$) est égale à 130 nm pour l'or alors que pour notre bicouche (Ag/Au) elle ne vaut que 105nm. Globalement, les courbes mesurées sont en bon accord avec les simulations numériques obtenues avec une couche bimétallique argent/or (figure III-41). Les écarts au niveau de la largeur des pics peuvent être attribués à l'incertitude sur les épaisseurs des deux couches métalliques

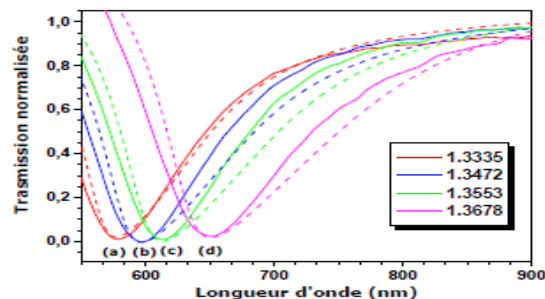


Figure II-18 : Comparaison entre la réponse expérimentale (ligne continue) et la réponse numérique (ligne discontinue) d'un capteur SPR à fibre optique avec une couche bimétallique (Ag/Au) pour 4 indices différents du milieu extérieur : a)1,3335, b) 1,3472, c) 1,3553 et d) 1,3678.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

Les valeurs de la sensibilité et du SNR obtenues avec ce type de capteur sont présentées dans le tableau II-3. Ces valeurs montrent que le capteur avec la couche bimétallique (argent/or) est aussi sensible à la variation de l'indice du milieu extérieur (n_s) qu'un autre capteur avec une simple couche d'or. Si nous comparons maintenant les valeurs du SNR pour les deux capteurs, nous trouvons que ces valeurs sont plus grandes par rapport à celles obtenues dans le cas d'un capteur avec une seule couche d'or. Par exemple, pour $\Delta n_s = 0,03$ nous avons obtenu $SNR = 0,404$ avec l'or et $SNR = 0,685$ avec la bicouche (argent/or). L'intérêt de la couche d'argent sous la couche d'or est d'une part d'augmenter le SNR du capteur, et d'autre part d'assurer une bonne adhésion de la bicouche métallique sur le cœur de la fibre optique (en silice). En effet, il est connu que l'or adhère difficilement sur les surfaces formées d'oxydes (verre et quartz). Enfin, rappelons que la couche d'or est nécessaire car elle va protéger l'argent de l'oxydation.

<i>Indices</i> (RIU)	Δn_s (RIU)	$\lambda - T_{max}$ (nm)	SNR	$S_{\lambda n}$ (nm/RIU)
		Expt.	Expt.	Expt.
1,3335		578		
1,3668	0,0333	648	0,685	$2,162 \times 10^3$
1,3844	0,0509	707	1,060	$2,200 \times 10^3$
1,4059	0,0724	796	2,38	$3,453 \times 10^3$

Tableau II-3 : Sensibilité et SNR du capteur a fibre optique avec une couche bimétallique (Ag/Au) (24/15nm) pour 3 indices de réfraction différentes.

chapitre 2 : Mise en œuvre des capteurs SPR

II.7. conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons validé notre modèle numérique développé dans le chapitre précédent, en le confrontant aux résultats expérimentaux acquis dans des conditions de fonctionnement réelles d'un capteur SPR à fibre optique.

CHAPITRE 3

Résultats et interprétation

Chapitre 3: Résultat et interprétation

1. Introduction :

Les polaritons plasmoniques de surface (SPP) sont des ondes électromagnétiques de surface résultant du couplage du rayonnement incident et des oscillations électroniques collectives aux interfaces métal-diélectrique [52]. Des domaines les plus récents exploitant les propriétés des SPP les recherches photonique et 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 (les guides d'ondes MIM) ces filtres optiques permettent de séparer un canal optique du signal combiné sans électronique basés sur des SPP tels que les filtres, les démodulateurs, les commutateurs et les séparateurs ont été et élaborés expérimentalement après leurs simulations numériques. Le but de tout ce travail est d'améliorer la sensibilité à l'aide du programme RSoft, basé sur le chemin des différences finies dans le domaine.

2. Outil de simulation et méthode :

2.1 Méthodes de modélisation:

La modélisation électromagnétique des propriétés des guides plasmonique nécessite généralement un fort investissement en programmation et en analyse numérique. Les principales techniques de calcul utilisées pour les plasmons sont les méthodes des matrices de transfert, les théories de la diffraction par les réseaux et les différences finies dans le domaine temporel (FiniteDifference Time Domain, FDTD). Le calcul de structures finies est basé sur une méthode de PerfectlyMatched Layer (PML). Nous présenterons les méthodes PML et FDTD.[17]

2.2 La méthode FDTD (FiniteDifference Time Domain) :

La méthode numérique des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), a été proposée pour la première fois par Yee en 1966 et amélioré plus tard par les autres y compris Allen Taflové [42] . Elle est devenue rapidement un moyen incontournable de modélisation. On peut citer comme domaines d'utilisation celui des effets des téléphones portables sur le corps humain, la conception des antennes, les circuits imprimés et la connectique[43]. Elle est utilisée généralement pour la résolution d'équations aux dérivées partielles (Poisson, Laplace, Maxwell...). Elle est basée sur une approximation qui permet de remplacer l'équation différentielle par une approximation des différences finies. L'approximation d'une dérivée partielle spatiale est obtenue par une combinaison linéaire des valeurs de la fonction en certains points proches du point d'évaluation de la dérivée partielle à évaluer.

Cette méthode d'approximation (approximation par différences finies) est basée sur le développement en série de Taylor d'une fonction.[44]

La méthode FDTD peut simuler le comportement d'une onde électromagnétique dans tout type de milieu (diélectrique, métal, plasma,...), tout en tenant compte des formes géométriques les plus complexes des objets pouvant constituer le système.[45]

Chapitre 3: Résultat et interprétation

2.2. a. principes de base de la méthode FDTD :

La méthode FDTD est basé sur la discrétisation des équations de Maxwell (1.3) et (1.4) .Nous considérerons dans la suite un milieu homogène, isotrope, non dispersif, sans sources et transparent (permittivité et perméabilité magnétique relatives purement réelles). Dans un repère cartésien correspondant aux directions principales (OX, OY, OZ) du milieu, les équations différentielles sont définies dans le domaine temporel par:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right] \quad (2.1.a)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right] \quad (2.1.b)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right] \quad (2.1.c)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right] \quad (2.1.d)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] \quad (2.1.e)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right] \quad (2.1.f) [46]$$

2.2. b. Les Avantages de FDTD :

La méthode FDTD présente un grand nombre d'avantages :

Tout d'abord, c'est une méthode simple : elle met en jeu, en effet, des concepts et des outils de résolutions élémentaires (équations de Maxwell, différences finies).

Ensuite, elle permet l'obtention en une seule simulation des informations temporelles et spectrales sur une structure. Elle apporte aussi des éléments de compréhension sur l'établissement du champ électromagnétique dans la structure en offrant la possibilité d'obtenir la distribution du champ à différents temps.

Enfin, cette méthode permet l'évaluation en fonction de temps de nombreuses autres grandeurs comme le vecteur de Poynting ou l'énergie électromagnétique stockée. En revanche, elle peut requérir des moyens de calcul et des mémoires informatiques importants, dépendant de la taille de l'espace de travail. Pour diminuer les temps d'exécution, les espaces de travail doivent être choisis assez réduits. [47]

L'inconvénient majeur de cette méthode, qui tend cependant à s'estomper avec les évolutions des capacités informatiques réside dans la grande taille des matrices à calculer, ce qui demande beaucoup d'espace mémoire dans les calculateurs [48]

Chapitre 3: Résultat et interprétation

2.3. Présentation du logiciel Rsoft CAD :

2.3. a. Environnement de CAD :

RSoft CAD est le programme principal de RSoftPhotonics Suite, et agit comme un programme de contrôle pour les modules de simulation de dispositifs passifs de RSoftBeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et DiffractMOD. Il permet de définir l'entrée la plus importante requise par ces modules de simulation: les propriétés du matériau 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 du dispositif. Durant notre travail on exploite seulement le module FullWAVE.[49]

2.3. b. Présentation de Full Wave :

Le moteur de simulation FullWAVE fait partie de RSoftPhotonic Suite et est basé sur la technique bien connue du domaine temporel à différence finie (FDTD). Il calcule le champ électromagnétique en fonction du temps et de l'espace dans une structure d'index donnée en réponse à une excitation électromagnétique donnée. FullWAVE est idéal pour étudier la propagation de la lumière dans une grande variété de structures photoniques.

FullWAVE est entièrement intégré à l'environnement RSoft CAD qui permet à l'utilisateur de définir les propriétés du matériau et la géométrie structurelle d'un dispositif photonique. FullWAVE peut modéliser avec précision des matériaux diélectriques et magnétiques, ainsi que des matériaux anisotropes, dispersifs et non linéaires. Il peut également utiliser un cluster de calcul pour réaliser des simulations à la fois plus grandes et plus rapides.[50]

2.4 Implémentation FDTD sous FullWAVE :

FullWAVE simule le comportement d'une onde électromagnétique pour une structure donnée en fonction du temps, dans un domaine fini sur une grille spatiale. Il est important de définir correctement ce domaine et cette grille pour garantir des résultats de simulation précis. Afin d'implémenter FDTD sous FullWAVE, des paramètres physiques et numériques sont nécessaires.[51]

2.5 Les étapes de simulation d'un guide d'onde :

2.5.a Présentation de la fenêtre CAD :

La fenêtre de programme de Rsoft CAD comporte une barre de menus en haut de la fenêtre, une barre d'outils avec des icônes juste en dessous, une autre barre d'outils le long du bord gauche de la fenêtre et une ligne d'état en bas de la fenêtre. Ces menus et icônes CAO permettent des opérations d'édition standard ainsi que d'autres fonctions courantes.[49]

Chapitre 3: Résultat et interprétation

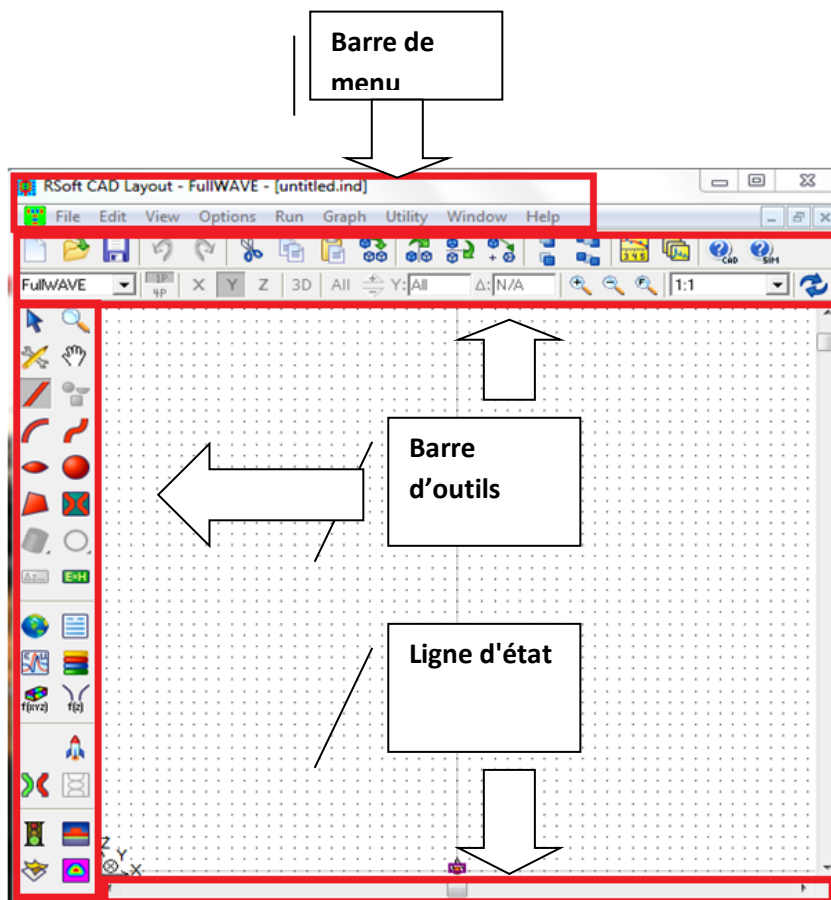


Figure III-1 : La fenêtre RSoft CAD, affichant la barre de menus en haut, les barres d'outils supérieure et gauche et la ligne d'état en bas.

2.5.b. Créer un nouveau circuit :

Pour créer un nouveau circuit, cliquez sur l'icône Nouveau circuit dans la barre d'outils supérieure (l'icône la plus à gauche dans la barre d'outils supérieure).

Sinon, choisissez Fichier / Nouveau dans le menu. La boîte de dialogue de démarrage apparaît comme illustré à la Figure. 2 Ce dialogue demande informations de base sur le circuit à modéliser et le module de simulation à utiliser

Il faut choisir le module de simulation parmi les six modules existants dans le logiciel RSoftbandSOLVE, FullWave, BeamPROP/BPM ou GratingMOD, et choisir le module dimensions (2D ou 3D). Après l'introduction des informations dans la fenêtre de démarrage on va cliquer sur OK pour obtenir la fenêtre de la figure 3.[49]

Chapitre 3: Résultat et interprétation

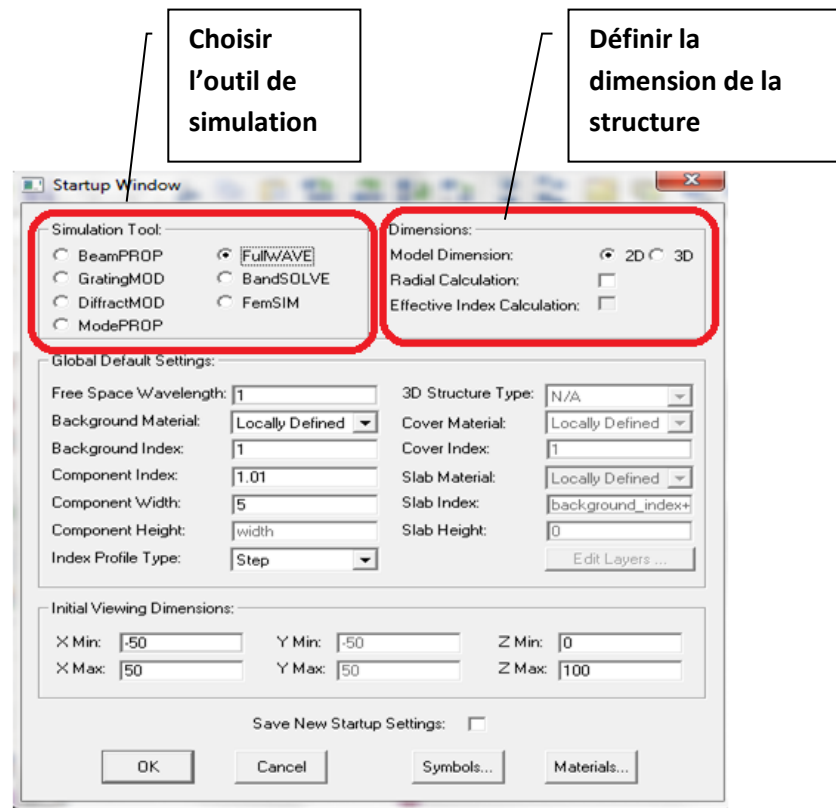


Figure III-2 : La boîte de dialogue de démarrage qui apparaît chaque fois qu'un nouveau circuit est créé et demande des informations de base sur le circuit à modéliser.

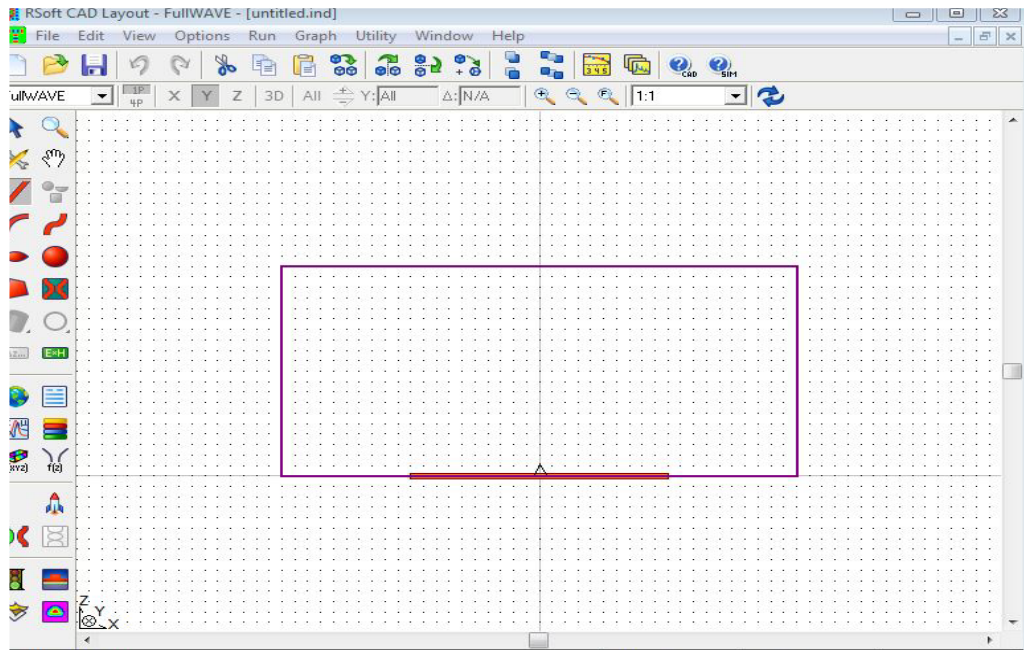


Figure III-3 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant ou nouveau circuit

Chapitre 3: Résultat et interprétation

2.5. c. Création de la structure dans le CAD Rsoft :

Pour créer une structure plasmonique dans l'interface de CAD, la manière la plus facile est d'employer un des multiples utilités de disposition qui sont incluse avec Full WAVE dans la Barres des outils figure 1.

Cliquez sur n'importe quelle forme dans la barre d'outils et appuyez au milieu de la page du programme. La figure apparait sur la page, Puis cliquez sur le bouton droit de la souris pour afficher la fenêtre d'informations figure 4

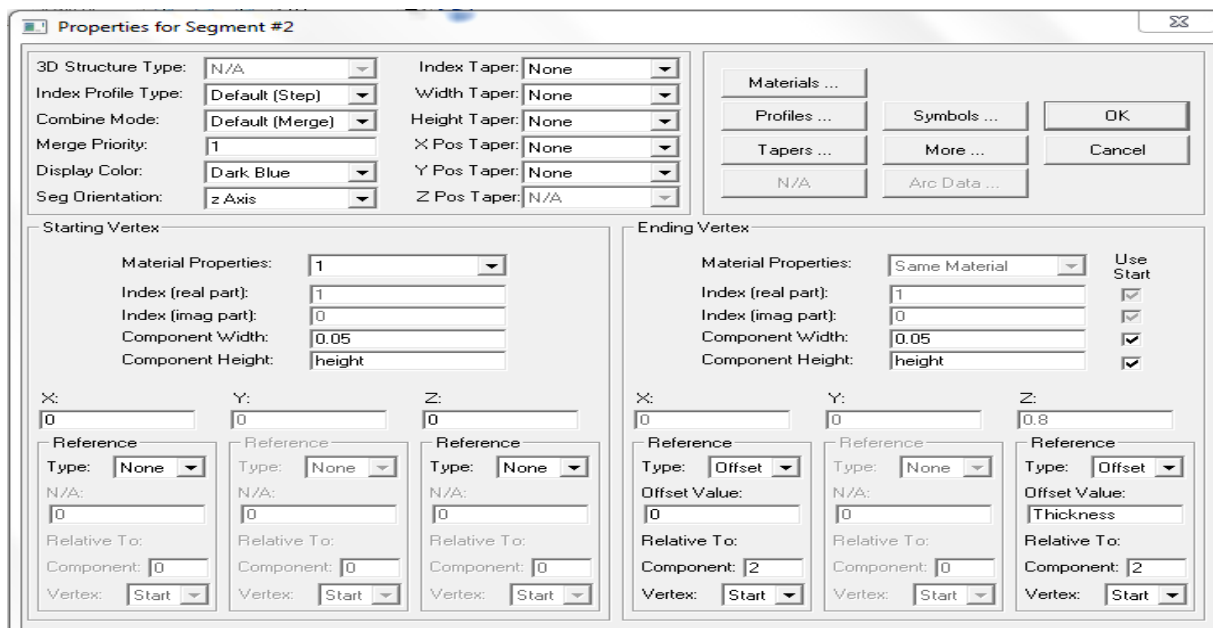


Figure III- 4 : Nouvelle fenêtre pour réaliser un nouveau composant dans la structure

Après l'introduction des différentes données (mergePriority ,MaterialProperties , dimensions OX-OZ ... etc.).On clique sur le bouton OK pour obtenir la structure qui apparait sur dans la figure 5.

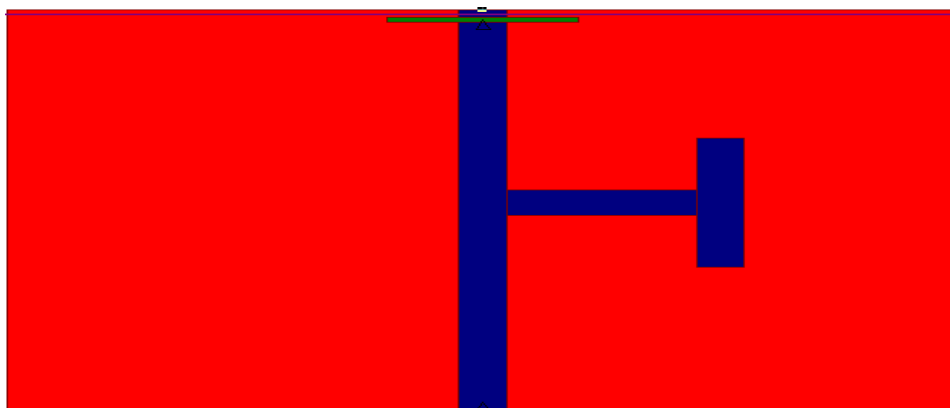


Figure III-5 : la structure de forme T

Chapitre 3: Résultat et interprétation

2.5. d. Définition des variables :

Cliquer sur L'icône de (Edit symboles) dans la fenêtre de CAD figure1. Ceci ouvrira (symbole Table Editor) comme montré dans la figure 6 Pour placer les divers paramètres de la structure, et définir plusieurs variables tels que la période, le rayon, l'indice de réfraction.

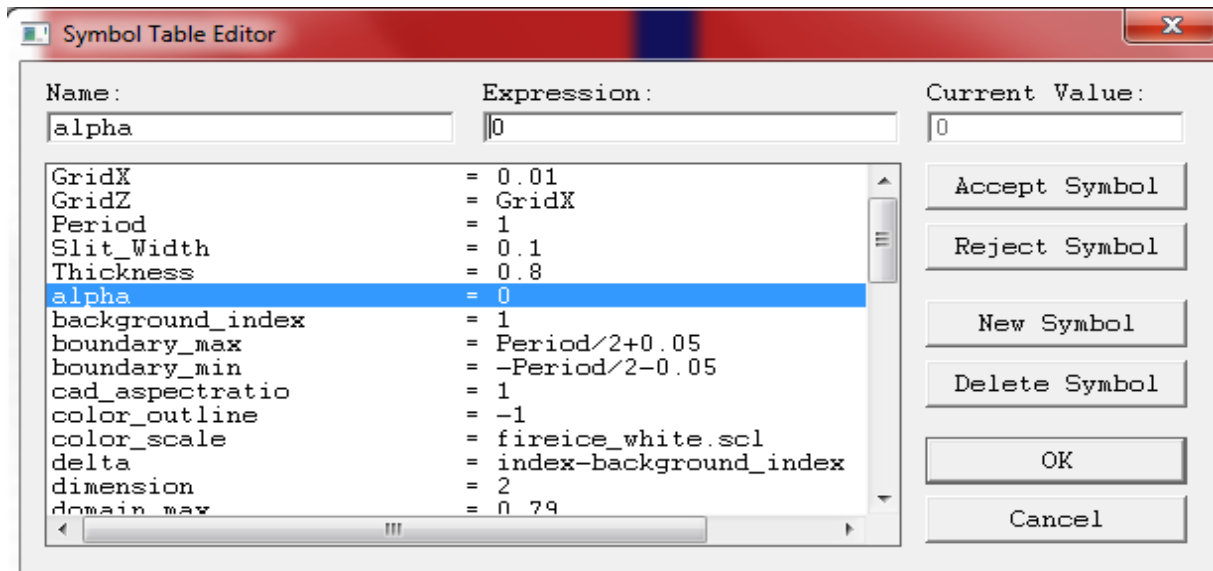


Figure III-6 :L'éditeur du Tableau de symboles

2.5. e. Vérifier la structure :

Il est très utile de calculer la distribution d'index afin de vérifier la disposition. Ceci est accompli via le Compute Icône de profil d'index dans la barre d'outils. Pour vérifier notre structure, nous avons simulé le profil de l'indice de réfraction dans le plan XZ (figure7).

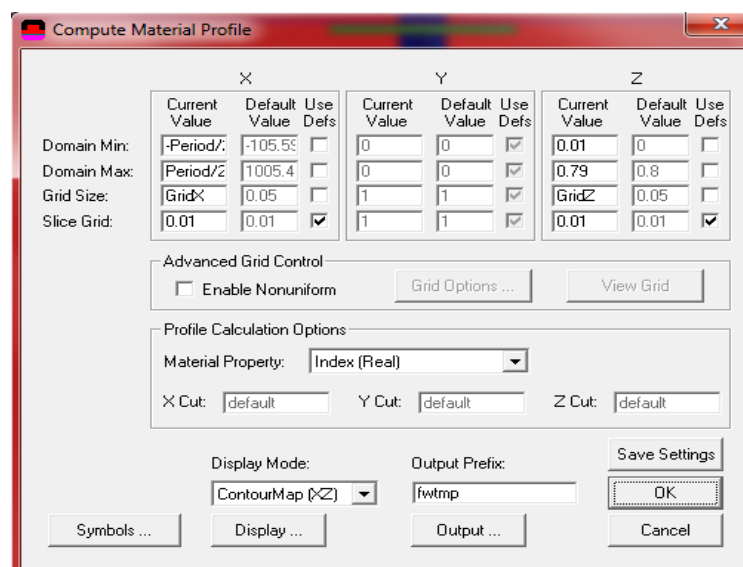


Figure III-7 : La boîte de dialogue Calculer le profil d'index

Chapitre 3: Résultat et interprétation

2.5. f. Réglages des paramètres de simulation :

Lorsque la structure est bien définie on doit effectuer la simulation à l'aide de l'outil de simulation Full Wave pour calculer la transmission à la sortie du guide, Avant de simuler, on doit définir le champ, on clique sur le bouton Perform Simulation. Où l'utilisateur peut indiquer des paramètres de simulation avant de l'effectuer On va choisir Pulsed et nombre d'itérations (Stop time) et le nom de fichier figure8.

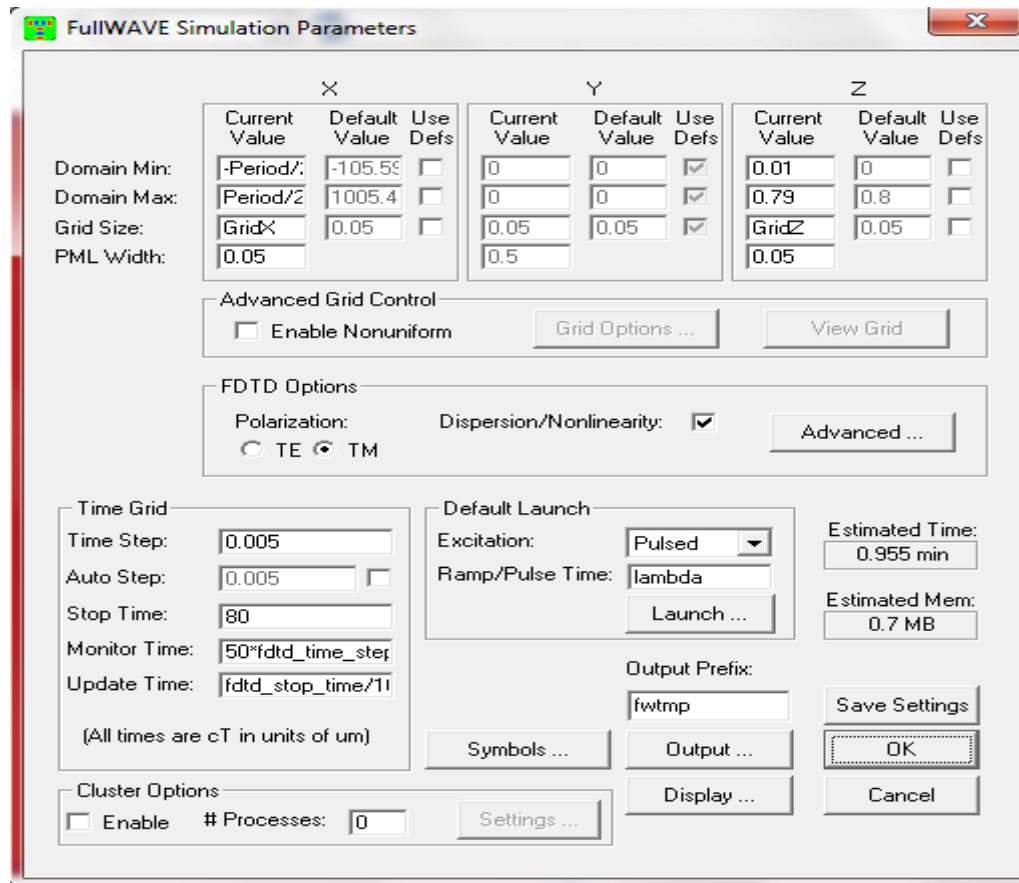


Figure III-8 : La fenêtre de paramètres de simulation Full WAVE

2.5. g. Lecture des résultats :

Afin de regarder ou imprimer les résultats de simulation, on clique sur l'icône de Win PLOT dans la barre des outils supérieure de la fenêtre de CAD figure1, et on choisit le graphe désiré à partir du dialogue qui est présenté.

2.6. Modélisation du guide d'onde MIM :

Une structure de guide d'ondes MIM est montrée sur la figure 9. Le guide d'ondes plasmonique MIM peut propager le mode SPP à l'échelle des sous-longueurs d'ondes avec une dissipation relativement faible et une grande distance de propagation. Chacune des interfaces métal – diélectrique du guide d'onde prend en charge un mode SPP qui se propage dans la direction x. On pourrait s'attendre à ce que, lorsque l'espace entre les deux interfaces soit comparable aux

Chapitre 3: Résultat et interprétation

longueurs de désintégration des SPP dans le diélectrique, les modes de SPP soient couplés les uns aux autres [52]. Le métal est de l'argent et le diélectrique dans le noyau de la structure est supposé être de l'air avec un indice de réfraction $n = 1$.

Dans ce chapitre, nous allons proposer un nouveau type de capture qui consiste en un guide d'onde de bus MIM couplé à des cavités en forme de T. Pour la simulation du fonctionnement du capteur, la méthode FDTD.

3. Structures et méthode de simulation :

La figure 9 montre la structure du capteur plasmonique conçu qui consiste en un guide d'onde MIM couplé latéralement à un résonateur en forme de T. Les paramètres de capteur w et H sont respectivement la largeur du guide d'onde MIM, la hauteur du résonateur. La constante diélectrique de l'argent dépendant de la fréquence est exprimée par le modèle de Lorentz – Drude :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\mathcal{T}_0} - \frac{f_1\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega/\mathcal{T}_b} \quad (1)$$

où ω_p est la fréquence de plasmon du métal, τ_0 est $\sqrt{-1}$ le temps de relaxation, ω est la fréquence d'intérêt, i désigne le nombre complexe ($i^2 = -1$), et la contribution des transitions entre bandes à une fréquence infinie (c'est-à-dire la contribution statique) est ε_{∞} . Le nouveau terme de Lorentz inclut le temps \mathcal{T}_b d'amortissement de l'oscillateur de Lorentz, la largeur de résonance de Lorentz ω_0 et un facteur de pondération f_1 . Les valeurs des différents paramètres pour l'argent sont données dans le Tableau 1.

TABLE III- 1 – Les valeurs des différents paramètres pour l'argent

Parameters	Values
ε_{∞}	3.7187
ω_p (rad/s)	$1.396 * 10^{16}$
ω_0 (rad/s)	$6.496 * 10^{15}$
\mathcal{T}_0 (s ⁻¹)	$3.29 * 10^{-14}$
\mathcal{T}_b (s ⁻¹)	$1.697 * 10^{-16}$
f_1	0.4242

La méthode FDTD implantée dans le module fullwave de RSoft est utilisée pour étudier les propriétés de transmission de cette structure, avec les conditions aux limites absorbantes de couche parfaitement adaptée (PML) dans les directions x et z du domaine de simulation. La lumière incidente pour l'excitation du mode SPP possède une polarisation TM (le champ magnétique est parallèle à l'axe des y). Dans les simulations numériques et les analyses

Chapitre 3: Résultat et interprétation

suivantes, les tailles de grille dans les directions x et z sont prises $x = z = 5 \text{ nm}$ et $t = x / 2c$, ce qui assure la convergence numérique de la méthode. La source de puissance est placée au point Port 1 et la réception est définie au point Port 2 pour détecter la puissance transmise. Par conséquent, le facteur de transmission de puissance est $T = A$. La méthode des équations différentielles auxiliaires (ADE) est utilisée pour modéliser des matériaux dispersifs dans FDTD dans le domaine temporel, reliant la polarisation et la densité de flux électrique. Dans les calculs et les résultats qui suivront, seul le mode TM constitué des composants E_x , E_z et H est pris en compte en raison de son excitation évidente du plasmon sur les surfaces métalliques.[53].

3.1 Structure de forme T

3.1.a. 1^{er} structure de forme T :

Initialement, nous dépendons de cette structure en forme de T, qui est illustrée plus en détail à la figure 9.

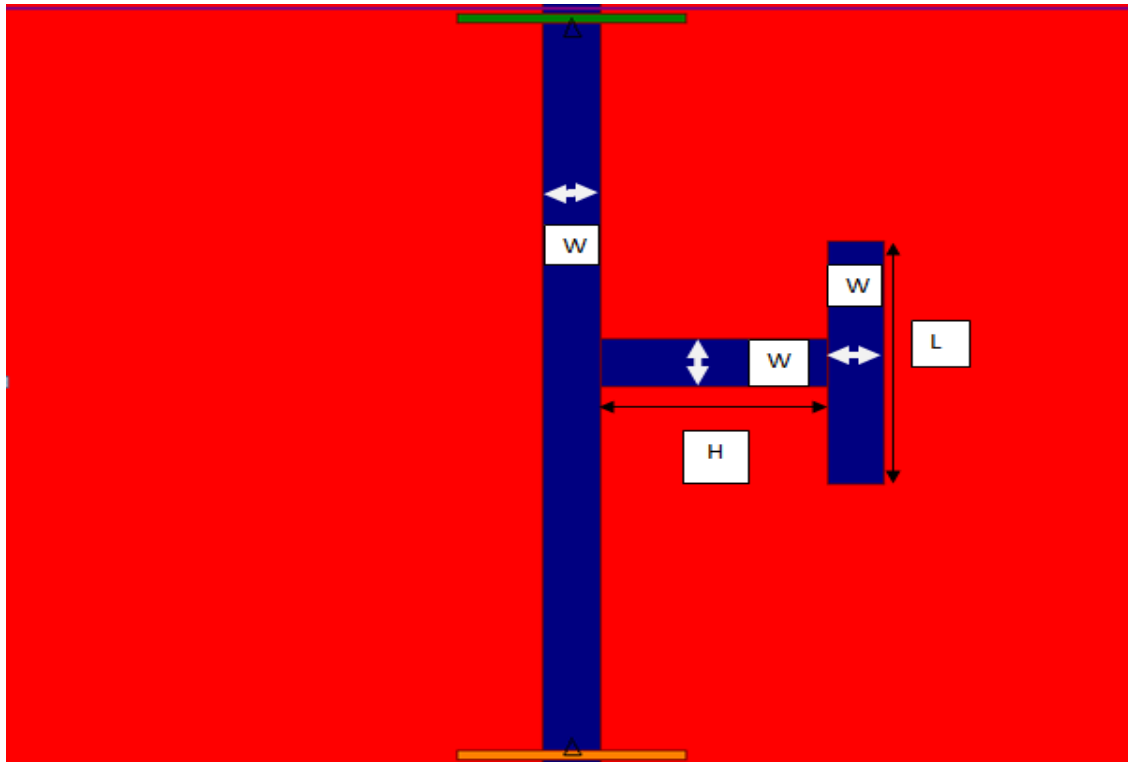


Figure III-9 – la structure de forme T pour un alésage.

La structure représentée sur la figure 9 est une structure en forme de T pour un alésage,

au début, nous avons placé un alésage de forme T à côté du guide d'onde .c.-à-d. la distance de couplage entre la cavité et le guide est nulle . Les dimensions de cette structure sont: $H = 200 \text{ nm}$, $L = 250 \text{ nm}$, $W = 50 \text{ nm}$, nous avons fixé la longueur H , et décalé L à gauche et à droite pour, Les résultats sont présentés dans les courbes (figure 10).

Chapitre 3: Résultat et interprétation

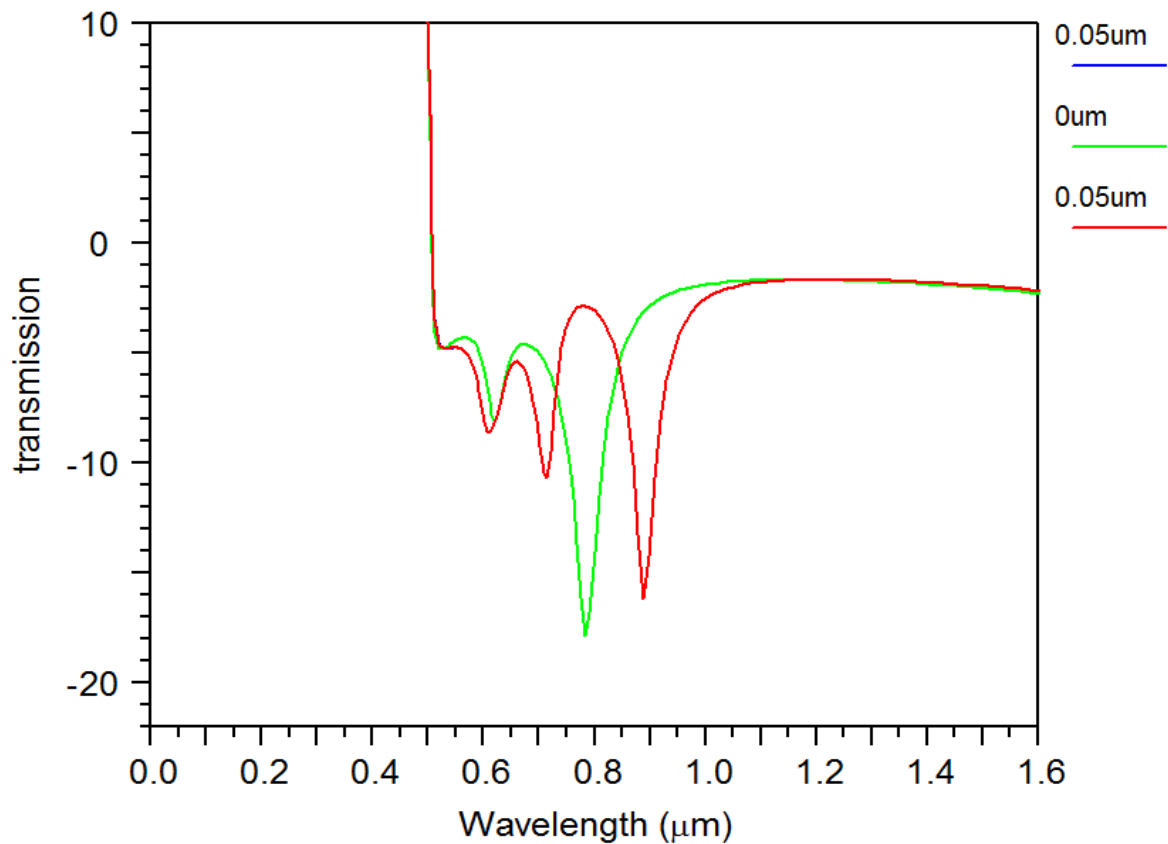


figure III- 10 – la courbe de la figure 1 pour d´écalé "L" .

Dans cette figure on constate que la meilleure transmission est obtenue pour un décalage de nul ($L=0\mu m$), car j'ai une correspondance à ($0,05\mu m$).

3.1.2.2 emestruure de forme deux T symétriquement :

Afin d'améliorer la transmission et la sensibilité du capteur proposé, nous avons ajoutée une autre Cavité de la forme " T " à la structure précédente. On a gardé la distance obtenue précédemment et la nouvelle structure est devenue symétrique par rapport au guide d'onde

Chapitre 3: Résultat et interprétation

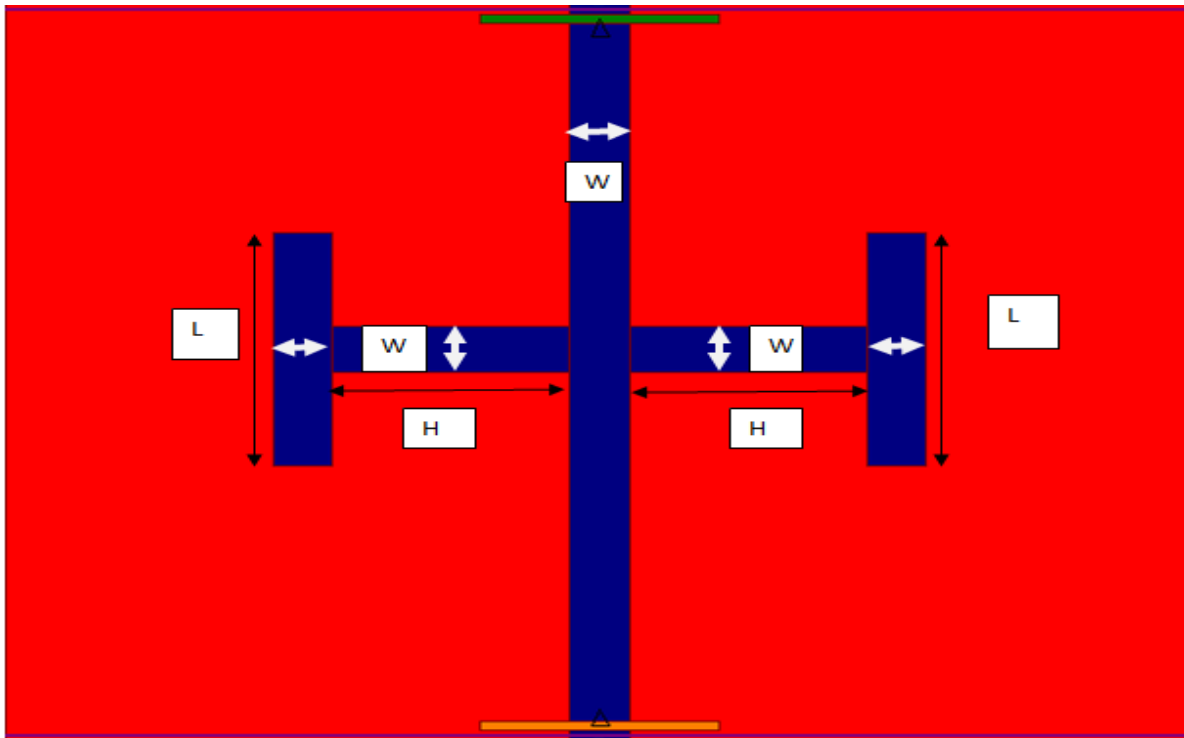


figure III-11– la structure de MIM en forme de deux T on symétriquement avec guide .
Après la simulation La Résultat est présenté sur la figure suivant (figure 12):

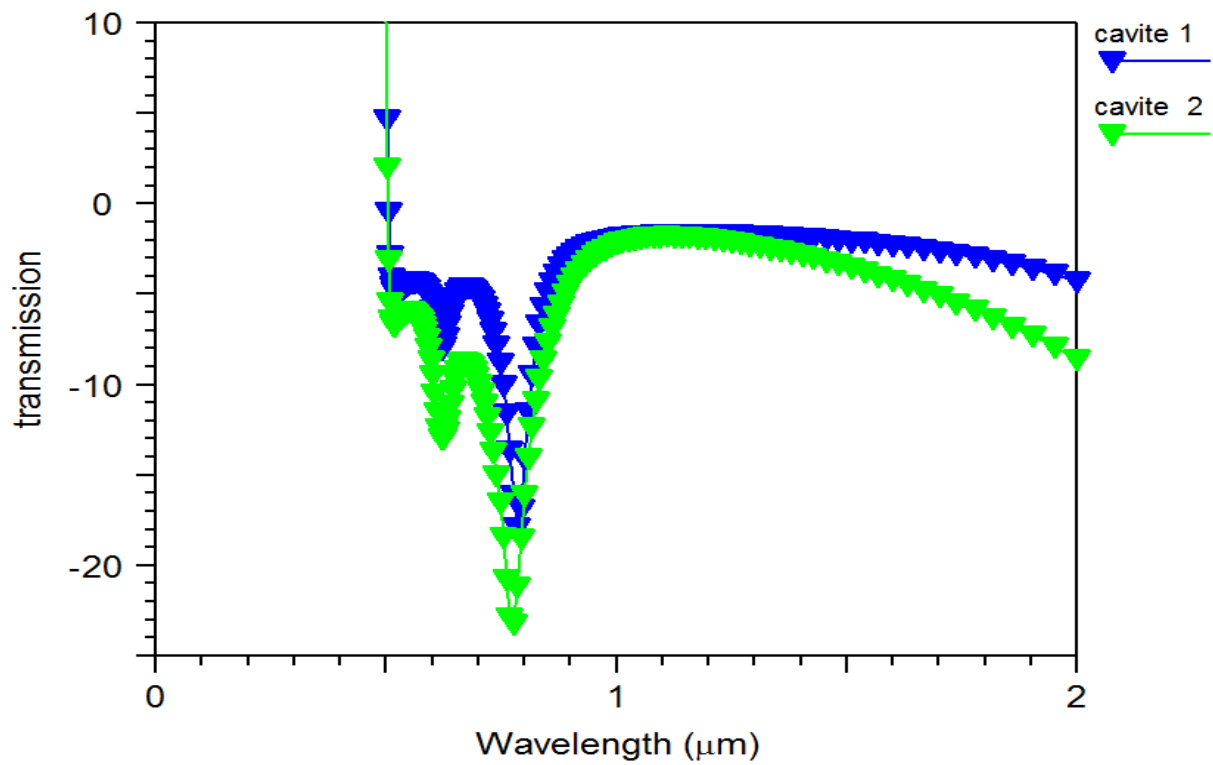


figure III-12– la courbe de la figure11

Chapitre 3: Résultat et interprétation

la figure 12 montre deux courbes :

- La courbe en bleue correspond à la structure à une seule cavité.
- La courbe vert correspond à la structure munis de deux cavités.

Ces courbes montrent que la transmission se trouve amélioré quand le deuxième cavité est ajoutée symétriquement par rapport au guide d'onde.

Nous constatons également un changement de la valeur de la longueur d'onde de résonance pour la deuxième structure. Cette dernière nous a permis d'avoir de meilleur transmission et sensibilité.

3.1.3.3 emestruature :

Dans la figure 13, nous avons déplacé la deuxième cavité de x distances contrairement à la première cavité que nous avons gardée fixe.

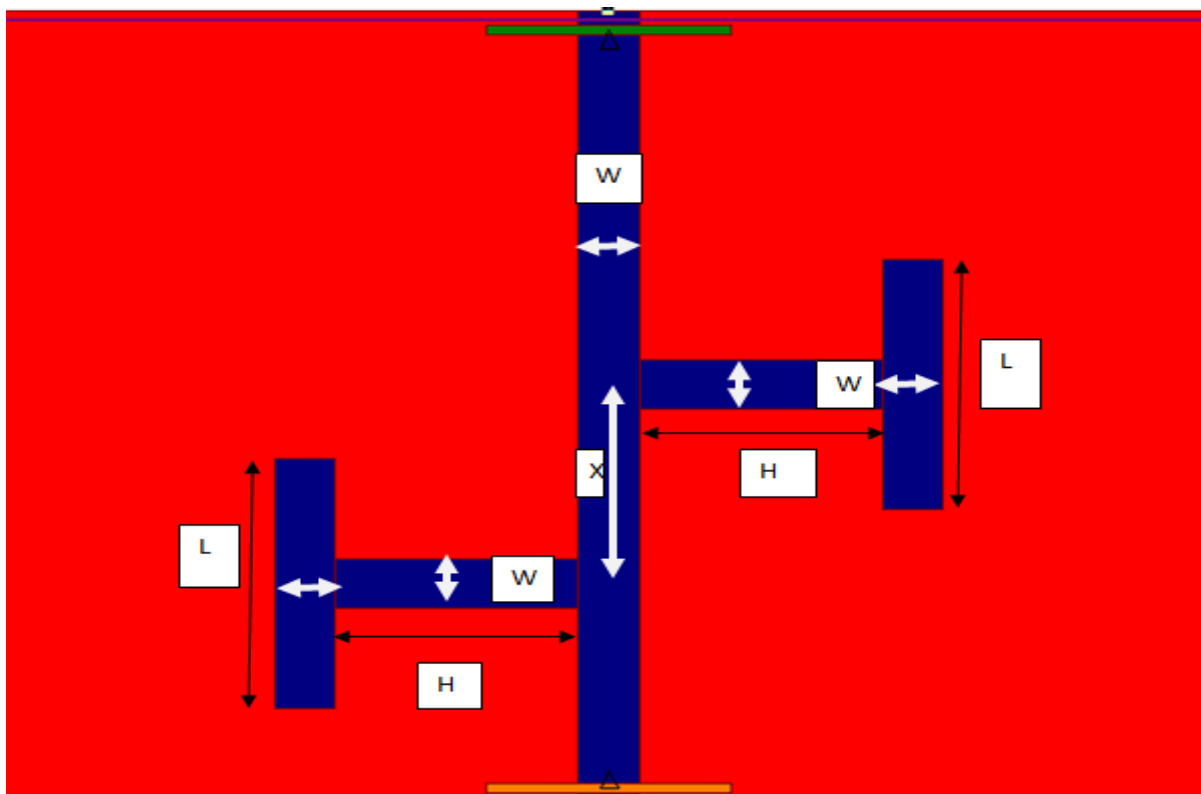


figure III- 13– la structure de MIM en forme de T on parallèle avec guide et la distance "x" entre deux "T" .

Chapitre 3: Résultat et interprétation

Les résultats sont illustrés dans les courbes de la figure suivant :

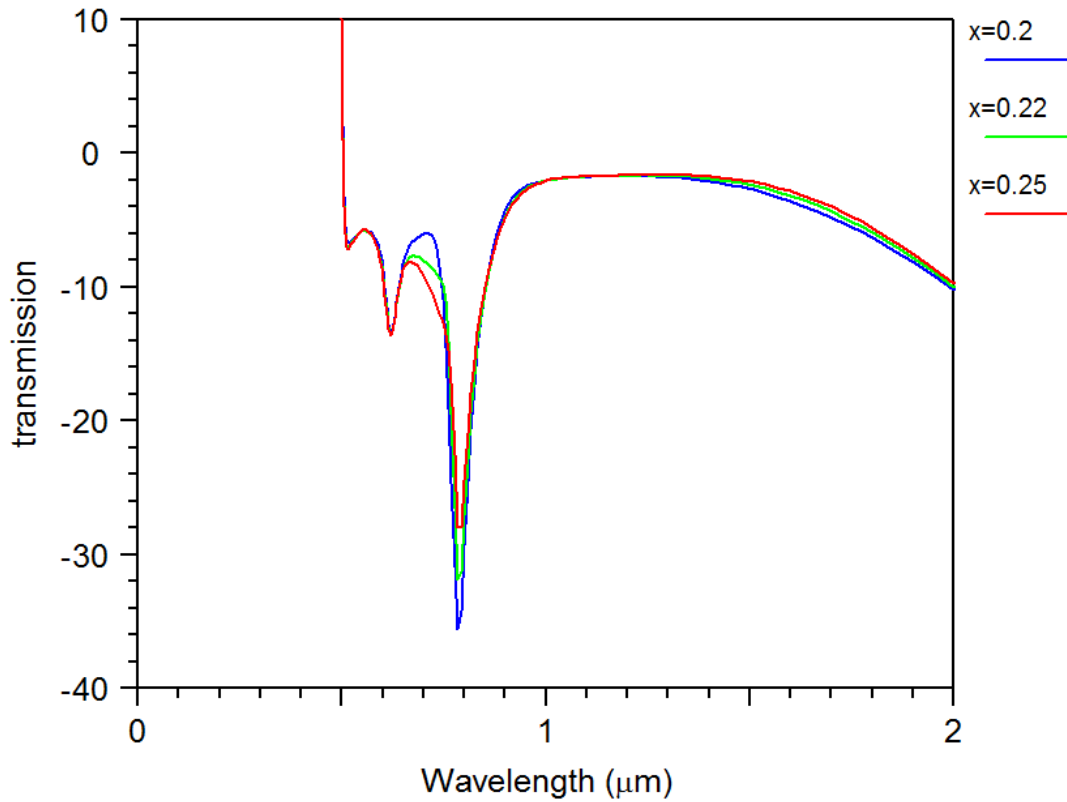


figure III-14– la courbe de la figure13.

Ces résultats montrent que la meilleure valeur de la transmission est obtenue pour une distance x de $0.2 \mu\text{m}$.

3.2.courbes des différent indice dans cette structure :

En utilisant les valeurs optimisées de L et x obtenues précédemment, nous avons dans cette partie changés les valeurs de l'indice de réfraction n de 1 à 1.5 par pas de 0.1. La figure 15 donne les résultats obtenus. La transmission obtenue est de -37 db et la longueur d'onde de résonance changent de $0.1 \mu\text{m}$ pour chaque valeur de n .

Chapitre 3: Résultat et interprétation

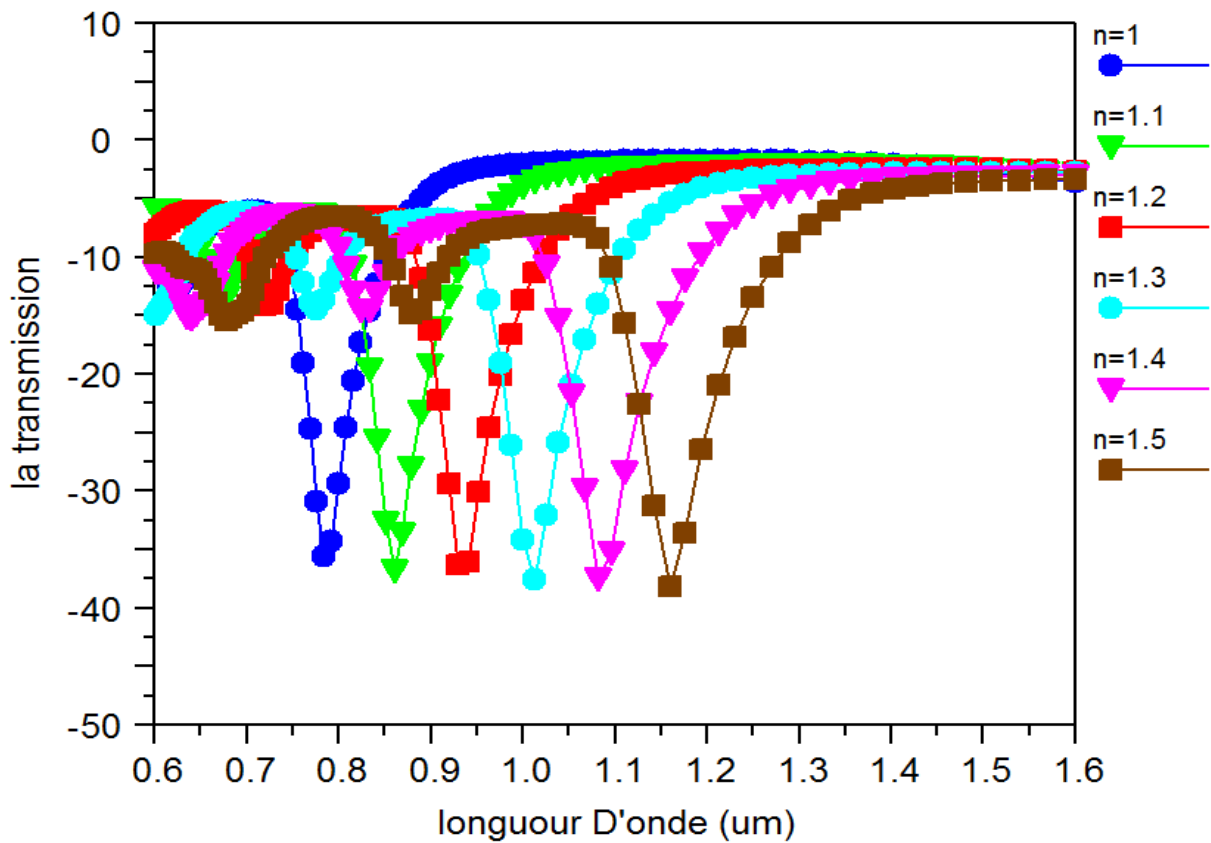


figure III- 15– les courbes des différent indice dans cette structure .

3.3. Sensibilité de la 1erstructure :

TABLE III- 2 – La sensibilité obtenue grâce à cette structure.

L'indice N pour structure 01	longueur d'onde (μm)	Sensibilité $S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta N}$
1	0.78	$S_1 = 800$
1.1	0.86	$S_2 = 700$
1.2	0.93	$S_3 = 700$
1.3	1.01	$S_4 = 700$
1.4	1.08	$S_5 = 800$
1.5	1.16	

Grace à cette structure on a pu avoir une sensibilité maximale de l'ordre de 800 nm/RIU.

Chapitre 3: Résultat et interprétation

3.4. Structure de forme double T :

Afin d'améliorer la transmission et la sensibilité du capteur, nous avons ajouté une cavité à l'autre forme en T de la structure précédente pour devenir la structure en T double, comme indiqué sur la figure 16.

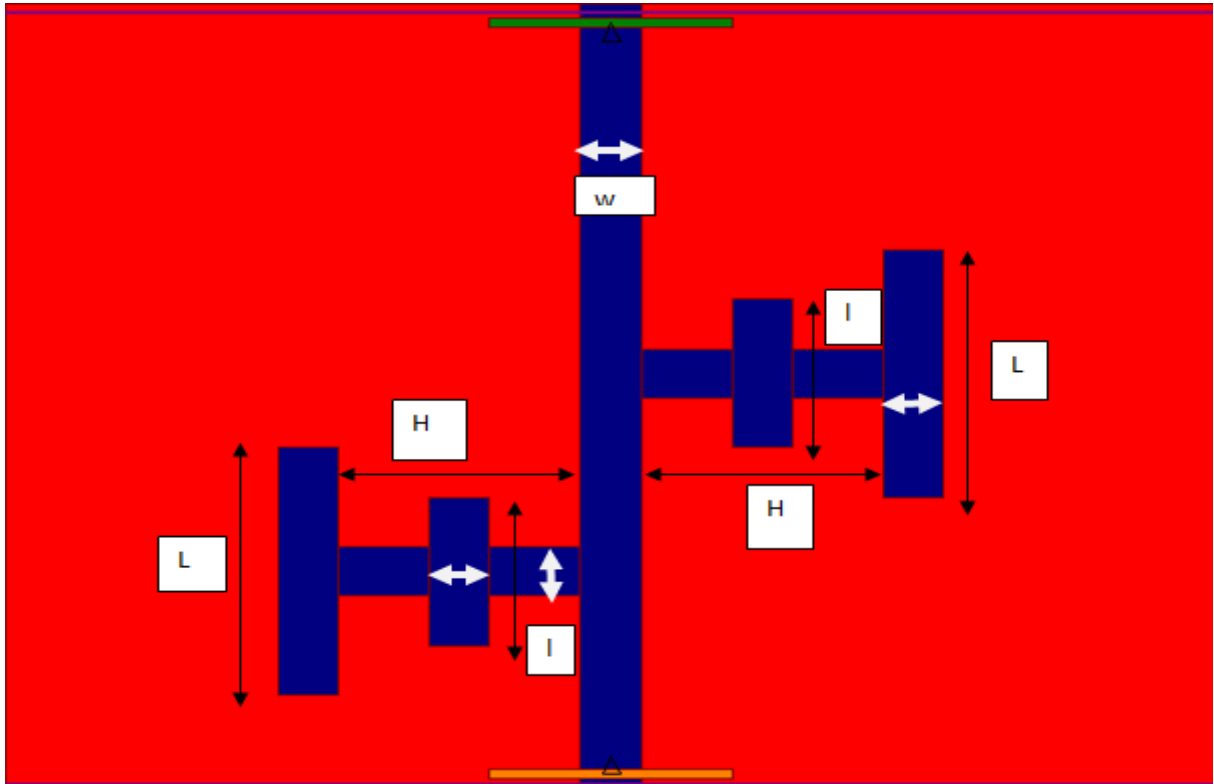


Figure III- 16– la structure de MIM en forme double T

Les résultats sont illustrés dans les courbes de la figure suivant :

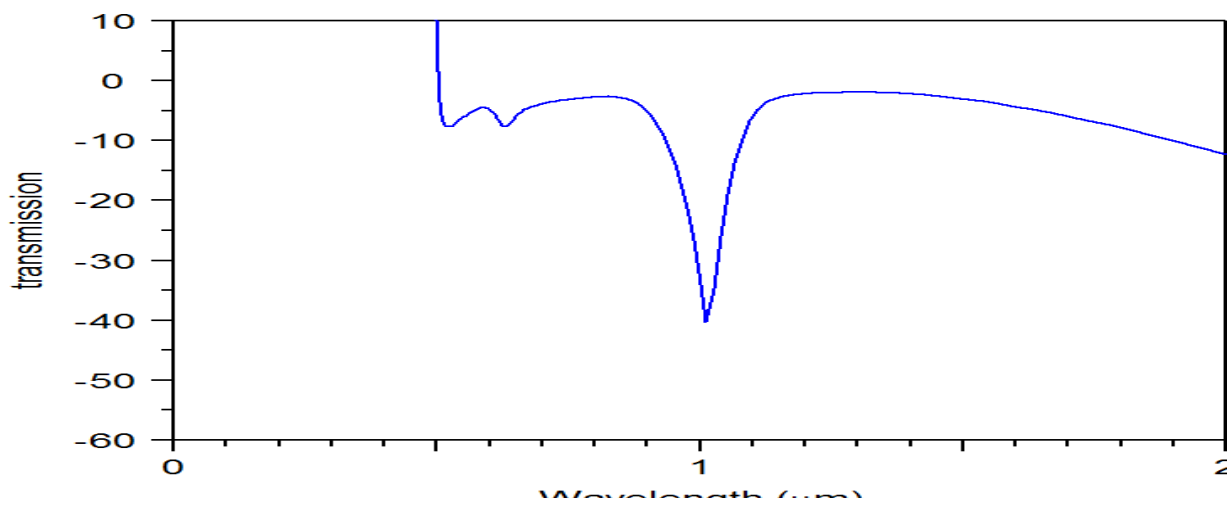


Figure III-17 – courbe de la figure16

Chapitre 3: Résultat et interprétation

3.5. structure à trois cavités de forme double T :

À la structure précédente représentée sur la figure 16, nous avons ajouté une cavité similaire aux deux cavités précédentes en plus d'être parallèle à la deuxième cavité, nous obtenons la structure sur la figure 18.

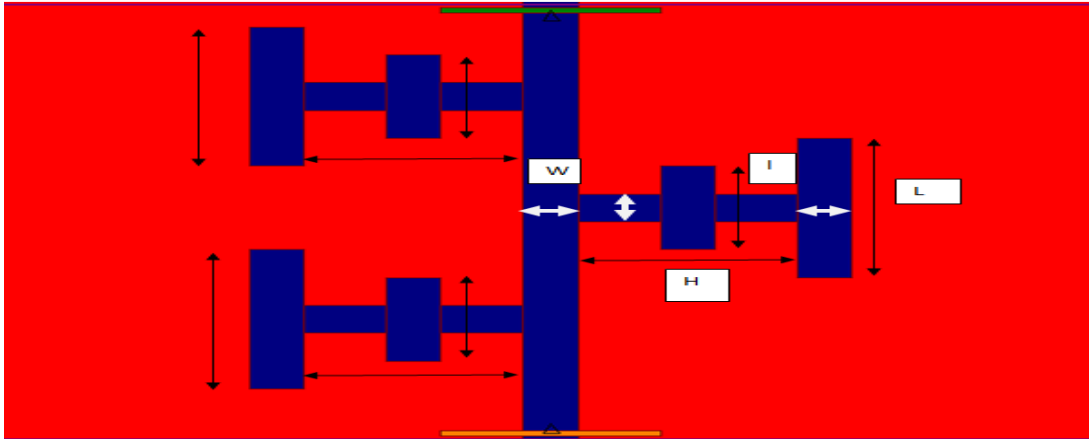


Figure III-18– structure à trois cavités de forme double T

Les résultats de simulation correspondants à cette nouvelle structure sont montrés en figure 19.

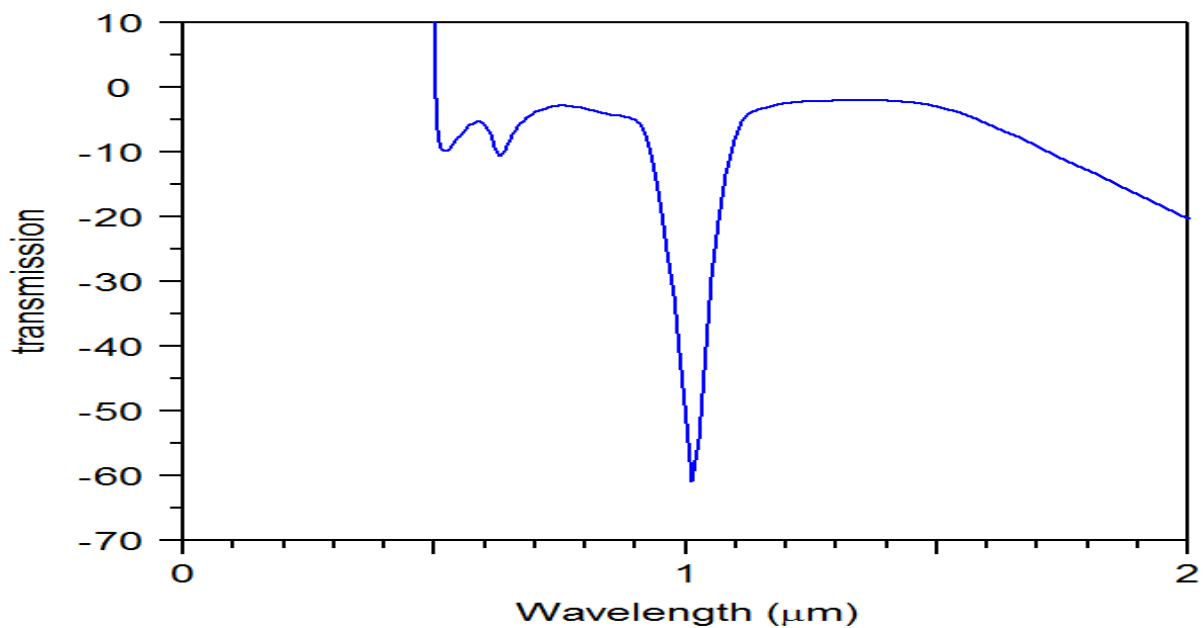


figure III-19 – la courbe de la structure à trois cavités de forme double T

3.6.courbes des différent indice dans cette structure :

La figure 20 montre les spectres de la réponse pour la structure représentée sur la figure 18 en fonction D'indice de réfraction. Cette figure montre que la valeur de transmission est toujours à

Chapitre 3: Résultat et interprétation

l'intérieur -63 dB, ce qui est bien. De plus, chaque fois que nous changeons l'indice de réfraction (RI) de $0,1\mu\text{m}$.

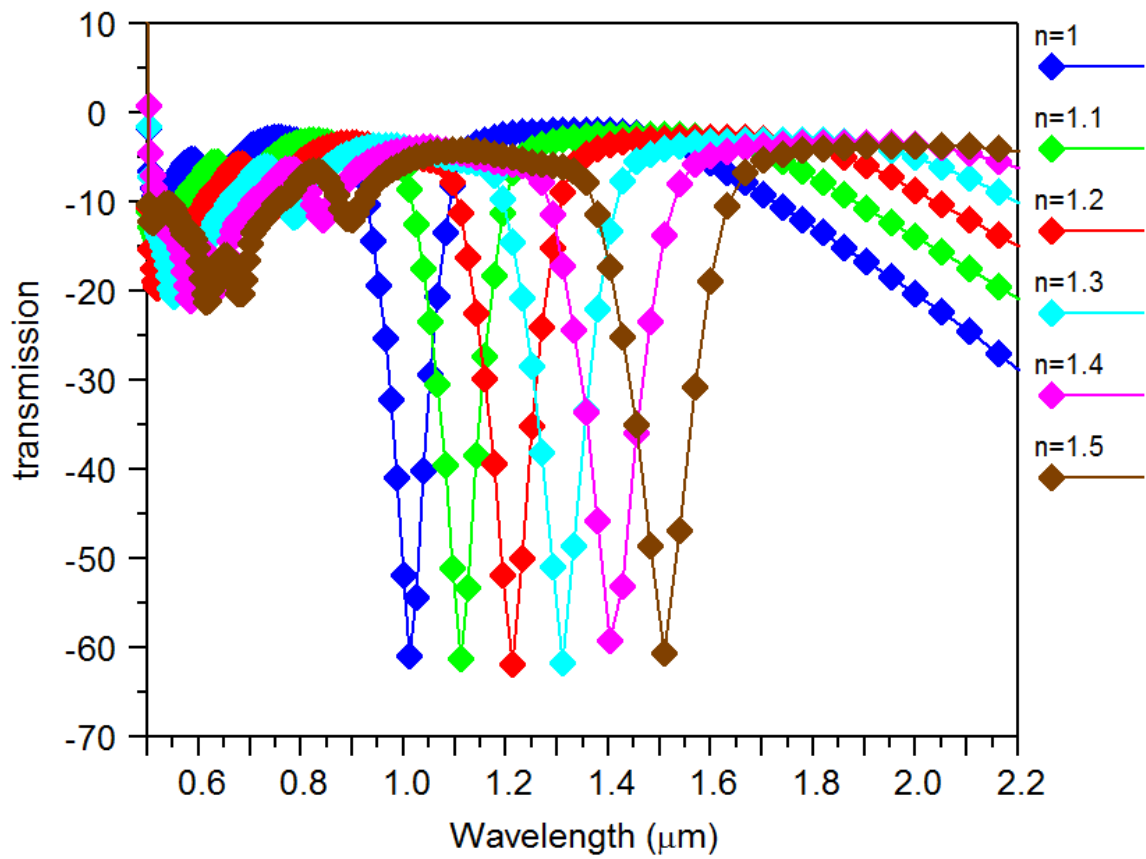


Figure III-20 – les courbes des différent indice "n".

Chapitre 3: Résultat et interprétation

3.7.sensibilité de la 2emestructure

Le tableau (3) suivant donne les sensibilités du capteur obtenues. La sensibilité maximale obtenue grâce à cette structure est de 1100 nm/RIU. Cette valeur se trouve largement amélioré par rapport à la celle fournie par la première structure et qui été de 800nm/RIU. Grace à ces résultats on peut dire que la deuxième structure est bien meilleure que le premier en termes de transmission et

TABLE III- 3 – La sensibilité dans cette structure du capture de forme double T.

L'indice N pour structure 02	longueur d'onde (μm)	Sensibilité $S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta N}$
1	1.01	$S_1 = 1000$
1.1	1.11	
1.2	1.21	
1.3	1.31	
1.4	1.40	
1.5	1.51	$S_5 = 1100$

Chapitre 3: Résultat et interprétation

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de base de la méthode FDTD. Nous avons également introduit le simulateur RSoft, cette technique est une méthode bien adaptée pour modéliser les structures plasma.

Ensuite, nous avons étudié le couplage de la cavité de direction pour améliorer la qualité de transmission et essayé d'obtenir une bonne sensibilité qui atteignait le niveau de 800 nm / URI, lorsque le châssis était en forme de lettre T, et améliorée à 1100 nm / URI sous forme de double T, en supposant la résolution de la longueur d'onde. 0,1 nm Le capteur peut être appliqué à une détection biologique de haute précision En raison de sa grande précision. Notre étude indique que les structures proposées sont très sensibles au changement d'indice de réfraction.

CONCLUSION GENERAL

conclusion Général :

L'objectif de ce travail est d'étudier et de concevoir des capteurs optiques basés sur le principe de la résonance plasmonique de surface (SPR), en utilisant le programme RSoft. Cet objectif a été atteint, et après les études présentées tout au long de ce manuscrit, nous pouvons garder les conclusions suivantes.

Le fonctionnement de ces capteurs dépend principalement du couplage d'une onde optique. Cet appariement dépend des propriétés optiques du milieu en contact avec le transducteur (région sensible à la fibre optique); La maîtrise de la lumière injectée et transmise par les fibres forme une signature de l'indice de ce milieu détecté au contact des fibres

Dans ces notes, nous introduisons d'abord les concepts théoriques de base Sur les plasmons de surface, en particulier, leurs principaux domaines d'application. Nous avons montré plus tard l'importance de concevoir des capteurs à fibre optique utilisant Phénomène de résonance des plasmons de surface pour détecter les particules Chimique et biochimique en temps réel.

L'application des biocapteurs RI(à indice de réfraction) nécessite un paramètre Tels que: température, humidité, composition chimique, détection d'ADN, Protéines, cellules et bactéries. SPR dispose d'une large gamme de détection, Cela le rend applicable dans une large plage dynamique pour les mesures infrarouges allant de l'air aux liquides très visqueux tels que les huiles ou les polymères. Chapitre III Dédié à la simulation de différentes topologies de capteurs plasmoniques, en utilisant Modules Fullwave pour l'émulation RSoft. Examiner ce capteur et la simulation obtenue Le FDTD-2D montre clairement la transmission maximale qui est de -55 à -65dB

Les améliorations que nous avons apportées à l'architecture que nous avons suggérées ont eu lieu Il est servi en plusieurs étapes. La première étape s'est concentrée sur l'amélioration A partir de l'alésage du capteur, nous avons d'abord proposé deux premières structures sur la figure "T" et le second est en binaire T. Dans la première image, nous avons déplacé la longueur vers L la droite et la gauche, et nous l'avons obtenu grâce à Processus de transmission 18. Ensuite, afin d'améliorer la transmission et la sensibilité À partir du capteur, nous avons ajouté un autre alésage en "T" avec les mêmes dimensions Le premier est symétrique par rapport au guide d'ondes. Puis la transmission est passée à Plus de 24. Une autre étape dans l'amélioration de la structure consiste à fixer la cavité T Nous avons déplacé l'autre socket x distance, donc nous avons obtenu de meilleurs résultats Pour la transmission ce dernier est estimé à 40 et la sensibilité de la commande 800 nm / RIU.

CONCLUSION GENERAL

Maintenant, pour améliorer la sensibilité et le facteur de qualité de notre capteur, Grâce à ces nouvelles structures, nous proposons une autre structure pour la forme binaire De meilleurs résultats sont obtenus en termes de transmission et de sensibilité. c'est Par conséquent, le châssis optimisé offre une meilleure sensibilité et une meilleure transmission entre -55 et -65 pour changer l'indicateur n de 0,1. La sensibilité de ce biocapteur a atteint un niveau Valeur 1100 nm / RIU.

En bref, il existe un nouveau capteur SPP basé sur un guide d'onde T et un guide d'onde MIM J'ai été signalé. Des simulations que nous avons réalisées sur différentes structures de Ce capteur démontre que sa sensibilité peut atteindre un ordre de 1000 nm / RIU, en supposant La précision de la longueur d'onde est de 0,01 nm. Ce capteur peut être appliqué à Détection biologique haute résolution en raison de sa haute sensibilité et de ses limites révéler.

Bibliographie

- [1] MOKHBI WAHIBA ,« étude des plasmons de surface dans une fibre optique attaqué chimiquement », mémoire de magister ,université de Ferhat Abbas Sétif .
- [2] A. Hessel and A.A. Oliner. A new theory of wood's anomalies on optical gratings. *Applied Optics*, 10 (1965).
- [3] Henkel, C., K. Joulain, R. Carminati, et J.-J. Greffet. Spatial coherence of thermal near fields. (2000).
- [4] Shchegrov, A.V., K. Joulain, R. Carminati, et J.-J. Greffet. Near-Field Spectral Effects due to Electromagnetic Surface Excitations. (2000).
- [5] Cyrille Billaudeau, Stéphane Collin, Fabrice Pardo, Nathalie Bardou et Jean-Luc Pelouard, Contrôle de l'émission et de l'absorption de lumière dans les guides plasmoniques nanostructures.
- [6] Kanso. Malek, 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 micro fluide (2008).
- [7] Wood, R. W., XLII. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum. *Philos. Mag. Series 6* **1902**, 4 (21), 396-402.
- [8] Rycenga, M.; Cobley, C. M.; Zeng, J.; Li, W.; Moran, C. H.; Zhang, Q.; Qin, D.; Xia, Y., Controlling the synthesis and assembly of silver nanostructures for plasmonic applications. *Chemical Reviews*, 111 (6), 3669-3712 (2011).
- [9] A. Banos, *Dipole radiation in the presence of a conducting half-space*. Oxford; New York: Pergamon Press, 1966.
- [10] A. Archambault, T. V. Teperik, F. Marquier, and J. J. Greffet, "Surface plasmon Fourier optics," *Physical Review B*, vol. 79, p. 195414, 2009.
- [11] P. Berini, "Plasmon-polariton modes guided by a metal film of finite width bounded by different dielectrics," *Opt. Express*, vol. 7, pp. 329-335, 2000.
- [12] E. Kretschmann et H. Raether, *Zeitschrift Naturforsch* 23a, 2135(1968).
- [13] D.G. Myszka, X. He, M. Dembo, T.A. Morton, B. Goldstein, "Extending The Range Of Rate Constants Available From Biacore: Interpreting Mass Transport- Influenced Binding Data", *Biophys. J.*, Vol.75, Pp.583-594, 1998.
- [14] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* 391, 667-669 (1998).

- [15] H. A. Bethe, "Theory of Diffraction by Small Holes," *Phys. Rev.* 66, 163–182 (1944).
- [16] . Kukushkin, J. Smet, V. Kovalskii, S. Gubarev, K. von Klitzing, W. Wegscheider .
Spectrum of one-dimensional plasmons in a single stripe of two-dimensional
electrons *Physical Review* B72.1-4 (2005)
- [17] Mekki Abdelhaq, Tahir Tarek «Etude et conception de capteur plasmonique
bidimensionnels pour la bio-détection» ,mémoire de magister ;université demsila
(2019)
- [18] A. Wokaun, Surface-enhanced electromagnetic processes, *Solid State Physics* 38
223-294(1984).
- [19] R. M. Dickson et L.A. Lyon. Unidirectional plasmon propagation in metallic
nanowires.*Journal of Physical Chemistry B* 104, 6095–6098 (2000).
- [20] . Agniel, Etude des Plasmons de Volume et Surface dans des couches minces, lisses et
rugueuses d'argent, These de doctorat de l'Universit'e de Dijon (1978)
- [21] A. W. Sanders, D. A. Routenberg, B. J. Wiley, Y. Xia, E. R. Dufresne et M. A. Reed
Observation of plasmon propagation, redirection, and fan-out in silver nanowires. *Nano
Letters* 6, 1822 – 1826 (2006).
- [22] J.Homola, S.S. Yee, G. Gauglitz, Surface plasmon resonance sensors : Review, *Sensors
and Actuators B*, 54. 3-15 (1999).
- [23] D. Barchiesi, Pseudo modulation transfer function in reflection scanning near-field
optical microscopy, *Optics Communications* 154 . 167–172(1998).
- [24] R. Fikri, T. Grosjes, D. Barchiesi, Apertureless scanning near-field optical microscopy
: numerical modeling of the lock-in detection, *Optics Communications*
232.15–23 (2004) .
- [25] J. Grausem, B. Humbert, A. Burneau, J. Oswald, Subwavelength Raman spectroscopy,
Applied Physics Letters 70.1671-1673 (1997) .
- [26] M. Watanabe, K. Kajikawa, An optical fiber biosensor based on anomalous reflection
of gold, *Sensors and Actuators B* 89 . 126-130(2003).
- [27] B. Steinberger, A. Hohenau, H. Ditlbacher, A. L. Stepanov, A. Drezet, F. R. Aussenegg,
A. Leitner et J. R. Krenn. Dielectric stripes on gold as surface plasmon waveguides.
Applied Physics Letters 88, 94104 (2006).
- [28] J. Homola, present and future of surface plasmon resonance biosensors, *Anal bioanal
Chem* 377. 528-539 (2003).
- [29] J.Homola, S.S. Yee, G. Gauglitz, Surface plasmon resonance sensors : Review, *Sensors
and Actuators B*, 54. 3-15 (1999).

- [30] P. Ferdinand, Capteurs à fibres optiques et réseaux associés, Tec & Doc, Paris (1992).
- [31] M Campbell, Sensor systems for environmental monitoring, tome I: sensor technologies. Chapman & hall, London (1997)
- [32] Karla Balaa. Capteur à fibre optique basé sur le principe de Résonance de Plasmons de optimisation pour la détection d'espèces chimiques. Matière Condensée [cond-mat]. Université de Nantes, 2007. Français
- [33] X. Liu, D. Song, Q. Zhang, Y. Tian, L. Ding and H. Zhang, Wavelength- modulation surface plasmon resonance sensor, Analytical Chemistry, (2005), 24(10), 887.
- [34] J.Homola, S.S. Yee, G. Gauglitz, Surface plasmon resonance sensors : Review, Sensors and Actuators B, 54 (1999) 3-15.
- [35] A. K. Sharma, B. D. Gupta, On the sensitivity and signal to noise ration of a step-index fiber optic surface Plasmon resonance sensor with bimetallic layers, Optics Communications 245(2005) 159-169.
- [36] A. K. Sharma and B. D. Gupta Comparison of Performance Parameters of Conventional and Nano- plasmonic Fiber Optic Sensors, Plasmonics 2(2007) 51–54.
- [37] S.Y. Wu, H.P. Ho, Sensitivity improvement of the surface plasmon resonance optical sensor by using a gold-silver transducing layer, in, Proceedings of the IEEE, Electron Devices Meeting 2002, Hong Kong, 2002, pp. 63–68.
- [38] X-C Yuan, B.H. Ong, Y. G.Tan, D.W, Zhang, R. Irawan et S.C. Tjin, Sensitivity-Stability-optimized surface Plasmon resonance sensing with double metal layers. Journal of optics A: pure and applied optics 8 (2006) 959-963.
- [39] S.A. Zynio, A. V. Samoylov, E.R. Surovtseva, M. Mirsky et Y. M. Shirshov, Bimetallic layers increase sensitivity of affinity sensors based on surface Plasmon resonance. Sensors 2 (2002) 62-70.
- [40] Homola, On the sensitivity of surface Plasmon resonance sensors with spectral interrogation, Sensors and Actuators B41 (1997) 207-211.
- [41] M-H Chiu, C-h Shih, M-H Chi, Optimum sensitivity of single-mode D-type optical fiber sensor in the intensity measurement. Sensors and Actuators B 123(2007)
- [42] SahnouneNadjet « étude d'une structure microbande rayonnante Par la méthode FDTD application à une antenne microbande rectangulaires », mémoire de majistère ,université de mentouricanstantine(2008-2009).
- [43] Harouzahlem « contrilution à l'étude et la conception des captures à base de cristaux photoniques », thèse de doctorat, université de msila, (2017).

- [44] Rouibah Ammar « étude d'une antenne microvubon de forme arbitraire par la méthode FDTD », mémoire de magistère, université de ferhatabbassetif, (2019).
- [45] A.Taflove, S.Chagress, « computational electrodynamics : the finite difference time domain method », artech house, book second edition , (997 pages), norwood, (2005)
- [46] Hamidi Mahdi, « modélisation par la méthode FDTD des plasmons de surface localisés », thèse de doctorat, université de constantine, (2013).
- [47] Abri Badouat Hadjira, « étude et conception des micro composants à base de cristaux photoniques bidimensionnels », thèse de doctorat, université de telemcen, (2012).
- [48] Melle Benaissa Fatima, « étude et simulation de la propagation des ondes électromagnétiques dans les guides à cristaux photoniques applications aux filtres optiques », mémoire de magistère, université de telemcen, (2013).
- [49] Rsoft tcad 7.0 user guide Rsoft design groupe. Inc. 400 executive B/ vd suite 100 ossining Ny10562, (1993-2006).
- [50] Rsoft design groupe, Inc « fullwave 6.0 guide », (1997-2007).
- [51] Mabrouk Hiba Yasmine, Dehimilmen, « conception d'un filtre optique basé sur un résonateur d'anneau 2D pour les systèmes WDM », mémoire de magistère, université de msila, (2019).
- [52] Xie, Y.Y. ; Huang, Y.X. ; Zhao, W.L. ; Xu, W.H. ; He, C. *IEEE Photon. J*, 7, 4800612- 1–4800612-12. 2015 1695.
- [53] Maier, S.A. *Plasmonics : Fundamentals and Applications ; Springer : New York, (2007).*

Résume :

Les polaritons plasmoniques de surface (SPP) sont des ondes électro magnétiques de surface résultant du couplage du rayonnement incident et des oscillations électroniques collectives aux interfaces métal-diélectrique. les structures MIM ont été appliquées à de nombreux éléments optiques SPP, tels que filtres, commutateurs, modulateurs, atténuateurs optiques, réseaux, etc.

Nous proposons une structure métal-isolant-métal (MIM) composée d'un résonateur en forme de T et d'un guide d'onde de polariton plasmonique de surface (SPP). Le domaine temporel des différences finies (FDTD) est utilisé dans la simulation par un logiciel R-soft. Les résultats montrent que cette structure forme un capteur de plasmon. Le capteur à l'échelle nanométrique montre une sensibilité élevée et pourrait avoir des applications potentielles en génie biologique et biomédical.

Mots-clés : SPP, MIM, FDTD, R-soft, structure

Abstract

Surface plasmonic polaritons (SPP) are surface electromagnetic waves resulting from the coupling of incident radiation and collective electronic oscillations at metal-dielectric interfaces. MIM structures have been applied to many SPP optical elements, such as filters, switches, modulators, optical attenuators, networks, etc.

We provide a metal-insulator-metal (MIM) structure composed of a T-shaped resonator and a surface plasmonic polariton (SPP) waveguide. The Finite Difference Time Domain (FDTD) is used in the simulation by R-soft software. The results show that this structure forms a plasmon sensor. The nanoscale sensor shows high sensitivity and could have potential applications in biological and biomedical engineering

Key words : SPP, MIM, FDTD, R-soft, structure

ملخص

البولاريتونات البلازمية السطحية (SPP) هي موجات كهرومغناطيسية سطحية ناتجة عن اقتران الإشعاع الساقط والتذبذبات الإلكترونية الجماعية في الواجهات المعدنية العازلة. تم تطبيق هياكل MIM على العديد من العناصر البصرية SPP، مثل المرشحات والمفاتيح، المغيرات، المخففات البصرية، الشبكات، الخ.

نحن نقدم هيكلًا معدنيًا عازلاً للمعادن (MIM) يتكون من مرنان على شكل حرف T ودليل موجي لسطح بولاريتون (SPP). يستخدم المجال الزمني للفرق المحدود (FDTD) في المحاكاة بواسطة برنامج R-soft. أظهرت النتائج أن هذا الهيكل يشكل مستشعرًا للطعام. يُظهر المستشعر النانوي حساسية عالية ويمكن أن يكون له تطبيقات محتملة في الهندسة البيولوجية والطبية الحيوية.