



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

**DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
INSTRUMENTATION**

THEME

**ETUDE des propriétés d'un capteur a fibre optique à
résonance plasmonique de surface**

Présenté par le binôme :

- Zediri Ibtissam
- Fares Chaima

Devant le jury :

- | | | |
|-------------------|-----|------------------|
| - Cheriet leyla | MCB | Président |
| - Gouder Soraya | MCB | Encadreur |
| - Nezzari Hassene | MCB | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element with several small flowers and leaves is positioned at the top left of the calligraphic text.

Remerciement

Sincères remerciements à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de terminer ce travail avec intégrité et stabilité.

Nous remercions tout d'abord "ALLAH" de nous avoir donné le courage d'entamer et de finir ce mémoire dans de bonnes conditions.

Nous remercions vivement, Dr GOUDER SORAYA, avoir accepté d'encadrer ce travail Nous la remercions pour leur indéfectible disponibilité, leur rigueur scientifique au cours de l'élaboration de ce mémoire ; Qu'elles trouvent dans ces pages une infime partie de notre infinie reconnaissance.

Nous remercions professeur FARES ABD ELHAKIM et également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail nous tenons à adresser nos remerciements à tous les employés du Département d'Electronique et, professeurs et administrateurs de l'Université de Tebessa, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail



**TABLE DE
MATIERES**

		page
Remerciement		
TABLE DE MATIERES		
LISTE DES FIGURES		
INTRODUCTION GENERALE		2
CHAPITRE I : PLASMON DE SURFACE ET LA FIBRE OPTIQUE		
I-1 INTRODUCTION.....		05
I-2 PLASMON DE SURFACE.....		05
I-2-1 Définition plasmons de surface.....		05
I-3 Types de plasmon de surfaces.....		05
I-3-1 Les plasmons de surfaces délocalisés.....		05
I-3-2 Plasmons de surface localisés.....		06
I-4 LA RESONNANCE DE PLASMON DE SURFACE.....		06
I-4-1 Le principe.....		06
I-5 Relation de dispersion des plasmons de surface.....		07
I-5-1 Relation de couplage plasmon-lumière.....		09
I-6 Les configurations d'excitation principales d'une onde plasmon de surface.....		10
I-6-1 Couplage par prisme.....		10
I-6-2 Couplage par réseau de diffraction.....		10
I-7 LA FIBRE OPTIQUE.....		11

TABLE DE MATIERES

I-7-1 Définition.....	11
I-8 Structure de la fibre.....	12
I-9 Principe de fonctionnement d'une fibre optique.....	12
I-9-1 Principe de propagation.....	13
I-10 Types des fibres optiques.....	13
I-11 Comparaison entre les différents types de fibres optique.....	14
I-12 Caractéristiques de la fibre optique.....	15
I-13 Avantages de la fibre optique.....	15
I-14 Inconvénients de la fibre optique.....	15
I-15 Les applications de la fibre optique.....	15
I-15-1 Les télécommunications.....	15
I-15-2 La médecine.....	16
I-15-3 Les capteurs (température, pression, etc.).....	16
I-16 CONCLUSION.....	17
CHAPITRE II : CAPTEURS A RESONANCE DES PLASMONS DE SURFACE	
II-1 INTRODUCTION.....	19
II-2 CAPTEURS A RESONANCE DES PLASMONS DE SUR- FACE.....	19
II-3 Principe de fonctionnement des capteurs SPR à fibre optique..	19
II-4 Capteurs SPR à fibre optique.....	22
II-5 Conditions d'excitation d'un plasmon de surface dans une fibre.....	23

TABLE DE MATIERES

II-6	Caractéristiques du capteur fibre optique.....	24
II-6-1	La sensibilité S du capteur.....	24
II-6-2	La limite de détection ou résolution.....	25
II-6-3	La gamme de fonctionnement du capteur.....	25
II-7	CONCLUSION.....	26
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION		
III-1	INTRODUCTION.....	28
III-2	METHODE DES ELEMENTS FINIS (FEM).....	28
III-2-1	Algorithme de résolution FEM.....	29
III-2-2	Algorithme de FEM.....	29
III-2-3	Organigramme d'un logiciel éléments finis.....	30
III-2-4	Méthode FDTD (Finité Différence Time Domain).....	32
III-3	RESULTATS ET DISCUSSION.....	32
III-3-1	Structure réalisée.....	32
III-4	CARACTERISTIQUES OPTIQUES.....	35
III-4-1	Dispersion du champ électrique.....	35
III-4-2	L'indice effectif de la gaine.....	36
III-4-3	La transmission.....	37
III-4-3-1	Influence nombre de réseaux d'argent (N) sur la transmission.....	37
III-4-3-2	Influence du revêtement résiduelle d sur la transmission.....	38
III-4-3-3	Influence de l'épaisseur spécifique de l'or et de l'argent sur la transmission.....	39
III-4-3-4	Influence des indices de réfraction sur la transmission.....	40

TABLE DE MATIERES

III-4-3-5	Influence de l'épaisseur de l'hématite sur la transmission.....	41
III-4-4	La résonance.....	42
III-5	Sensibilité.....	44
III-6	CONCLUSION.....	45
CONCLUSION GENERALE		47
REFERENCES		49
ANNEXE		53



**LISTE DES
FIGURES**

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : PLASMON DE SURFACE ET LA FIBRE OPTIQUE	
Figure I.1 : La formation de l'onde évanescente.....	06
Figure I.2 : Relation entre angle de résonance et mesure du signal en SPR et SPRi.....	07
Figure I.3 : Couplage par prisme.....	10
Figure I-4 : LA FIBRE OPTIQUE.....	11
Figure I-5 : LA FIBRE OPTIQUE.....	11
Figure I-6 : Structure de la fibre.....	12
Figure I-7 : Principe de propagation.....	13
Figure I-8 : Multimode.....	14
Figure I-9 : Monomode.....	14
Figure I-10 : Une seule paire de fibre optiques transporte un débit.....	16
Figure I-11 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins.....	16
CHAPITRE II : CAPTEURS A RESONANCE DES PLASMONS DE SURFACE	
Figure (II-1) . Principe de fonctionnement d'un capteur à résonance plasmonique de surface (SPR).....	20
Figure (II-2) : Réponses d'un capteur à résonance plasmonique de surface.....	21
Figure (II-3) : principe du capteur SPR.....	22
(Figure II-4) : Capteur à fibre optique dont la zone sensible est située à l'extrémité de la fibre.....	23
Figure (II-5) : Schéma explicatif de l'état de polarisation de la lumière se propageant dans une fibre.....	24
Figure (II-6).....	25
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	
Figure (III-1) : Quelques types d'éléments.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure (III-2) : Organigramme d'un logiciel dans les méthodes d'éléments finis.....	31
Figure (III-3) : Schéma du capteur de fibres SPR basé sur l'hématite argentée (α Fe ₂ O ₃). (a) Sonde de structure 3D. (b) Coupe transversale du capteur SPR.....	32
Figure (III-4) : Le maillage.....	34
Figure (III-5).....	35
- (a) Spectre du capteur de fibre SPR proposé IR externe de 1,39.	
- (b) Champ électrique du réseau Ag/ α Fe ₂ O ₃ Capteur SPR	
Figure (III-6) : Relation entre l'IR externe et la longueur d'onde à différentes largeurs d'intervalle d'air (w_a).....	37
Figure (III-7) : Spectres du capteur SPR à différents nombres de réseaux d'argent (N) ; IR externe = 1,39.....	38
Figure (III-8) : Spectres du PSR proposé à différentes quantités de revêtement résiduel (d).....	39
Figure (III-9) : (a) Relation entre les spectres de transmission et longueur d'onde à IR = 1,39 et épaisseurs spécifiques de l'Au.....	40
(b) Relation entre les spectres de transmission et la longueur d'onde à RI = 1,39 et épaisseurs spécifiques des couches Ag	
Figure (III-10) : Spectres du capteur de fibre SPR proposé avec des IR externes, 20 grilles argentées, 10 nm de largeur entre grilles et épaisseur d'argent de 45 nm.....	41
Figure (III-11) : (a) Spectres du capteur SPR proposé pour des épaisseurs de l'hématite à une IR externe de 1,39.....	42
Figure (III-12) : Spectres du capteur SPR proposé avec des IR externes et (45+12) nm d'épaisseur Grille Ag/ α Fe ₂ O ₃	42
Figure (III-13) : Relation entre les différents IR externes et longueur d'onde résonante (a) Ag. (b) Au.....	43
Figure (III-14) : illustre la sensibilité en fonction de l'épaisseur de l'hématite. Elle présente une forme presque gaussienne avec une largeur à mi-hauteur moyenne.....	44



INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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 des instruments hautement perfectionnés est devenu un défi 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 composants miniatures, une surveillance dans des environnements difficilement accessibles, 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 Su Les premières études de détection réalisées par résonance plasmons de surface datent des années 1980 avec en particulier les travaux de C. Nylander et B. Liedberg. Ces derniers ont exploité pour la première fois la configuration dite de Kretschmann-Raether pour la détection de gaz et de biomolécules. Depuis, les capteurs SPR n'ont cessé de connaître un développement croissant grâce à leurs nombreux avantages. Citons par exemple, la capacité de mesure en temps réel des interactions moléculaires spécifiques avec une grande précision, la rapidité importante de la mesure

Actuellement, les capteurs à fibre optique basés sur la résonance des plasmons de surface ont prouvé leur capacité de mesure aussi bien en laboratoire de recherche que lors de tests de détection de différentes espèces chimiques et biochimiques industrielles. Néanmoins, pour espérer obtenir un capteur SPR à fibre optique performant et compétitif, il est aujourd'hui nécessaire d'améliorer sa sensibilité et sa limite de détection. Ces deux caractéristiques de performance dépendent principalement des configurations géométriques du capteur ainsi que de certains paramètres physiques tels que nature des traitements de surface, les constantes diélectriques des matériaux mis en jeu, de la rugosité de la couche métallique... D'une manière générale, nous pouvons dire que le problème se résume à trouver la géométrie idéale ainsi que les paramètres clés ayant l'influence sur la réponse du capteur.

Pour pallier à cet état de fait, et d'une certaine manière optimiser ces capteurs, des recherches sont en cours dans plusieurs laboratoires de par le monde, autant universitaires qu'industrielles. L'association fibre/SPR constitue le sujet de notre travail, à savoir les capteurs à fibre optique fondés sur la résonance de plasmons de surface. L'étude de ces dispositifs est particulièrement intéressante car elle permet de concilier à la fois l'aspect

INTRODUCTION GENERALE

Dans ce mémoire, nous proposons l'étude et la simulation d'un capteur SPR forme D avec un nombre N de réseaux d'Argent (Ag) et revêtement d'oxyde de Fer (Fe_2O_3). Ce dernier est souvent utilisé comme revêtement fonctionnel sur les surfaces des capteurs SPR pour permettre la capture sélective des molécules d'intérêt. Il peut améliorer la spécificité de la détection en permettant une liaison plus spécifique ou en facilitant la fixation des molécules cibles sur la surface du capteur.

Divers paramètres géométriques tels que la distance de pas, le nombre de réseaux, l'épaisseur du canal d'analyte...etc ont été optimisés pour obtenir des performances meilleures pour un SPR à fibre optique.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres organisés comme suit :

- Dans le chapitre I, on traite l'approche théorique des plasmons de surface, et Conditions d'excitation d'un plasmon de surface dans une fibre et le Relation de dispersion
 - Le chapitre II présente des généralités sur les fibres optiques dont la structure de la fibre optique, les avantages dans la fibre optique, les différents types de la fibre optique, principe fonctionnement d'un capteur SPR à fibre optique, la sensibilité, la limite de détection et la gamme de fonctionnement. Les avantages dans la fibre optique, les différents types de la fibre optique.
 - Le troisième chapitre sera consacré à la simulation d'un capteur à fibre optique forme D dont la structure est à base de fibre optique via le logiciel de simulation COMSOL multiphysique.
- Enfin, notre travail sera fini par une conclusion générale qui résumera les résultats obtenus.



CHAPITRE I

PLASMON DE SURFACE ET LA FIBRE OPTIQUE

I-1 INTRODUCTION

Les plasmons de surface ont été originalement découverts début du siècle précédent lors.

De l'observation du spectre de réflectivité spéculaire des réseaux de diffraction, où des anomalies sous forme de fines bandes sombres dans le spectre diffracté ont été remarquées.

Il fallait attendre jusqu'au début des années 1940 pour trouver une interprétation théorique de ces anomalies, basée sur l'existence des ondes de surface (plasmon de surface) supportées par le réseau [1]. Un peu plus tard une autre interprétation dit que ces anomalies sont provoquées par des effets de résonance provenant du couplage entre l'onde incidente et les modes propres du réseau. Depuis les travaux se suivent pour expliquer ce type d'ondes.

Aujourd'hui, l'intérêt pour les plasmons de surface n'est plus à démontrer. En particulier le succès de la résonance des plasmons de surface (SPR) qui permet de mesurer des variations d'indice de réfraction et des épaisseurs de couches organiques avec une grande précision, par exemple la conception des capteurs biologiques capables de détecter les interactions entre enzymes et substrat [1].

I-2 PLASMON DE SURFACE**I-2-1 Définition plasmons de surface**

Les plasmons de surface sont des oscillations quantifiées de plasma, ils existent à l'interface entre un milieu métallique, le plus souvent un métal noble, et un milieu diélectrique. L'oscillation collective des électrons qui les constitue coexiste avec le champ électromagnétique évanescent de chaque côté de l'interface. Un dispositif efficace et relativement simple d'excitation des plasmons de surface consiste à travailler en réflexion interne totale de lumière dans un prisme dont une face plate est recouverte d'une fine couche métallique. Ces ondes sont principalement exploitées en biophysique et en biochimie au travers de la résonance de plasmon de surface.[2][16]

I-3 Types de plasmon de surfaces

Ils existent deux types de plasmon de surfaces [2]:

I-3-1 Les plasmons de surfaces délocalisés

Les plasmons de surfaces délocalisés sont générés à l'interface des films métalliques lisses, ils sont dits « non radiatifs » car ils ne peuvent se coupler spontanément avec une onde électromagnétique. Cela nécessitera le recours à un « attelage » [3]

I-3-2 Plasmons de surface localisés

Ces plasmons diffèrent des plasmons de surface délocalisés par différentes propriétés : l'effet de taille ainsi que la nature des particules métalliques ont une influence marquante sur la condition de résonance. Ces plasmons de surface sont radiatifs et peuvent se coupler directement avec la lumière. Ils présentent un fort confinement du champ électromagnétique au voisinage des particules métalliques et ils ne se propagent que sur des distances nanométriques. Ce confinement joue un rôle essentiel en microscopie optique en champ proche, la résonance de plasmon localisé a été utilisée dans différents dispositifs afin d'augmenter le signal détecté.[3]

I-4 LA RESONNANCE DE PLASMON DE SURFACE

I-4-1 Le principe

Lorsque la lumière incidente est dirigée à un certain angle (angle de résonance) sur un métal riche en électrons libres tel que l'or ou l'argent, les photons provoquent une oscillation des électrons libres appelée Résonance Plasmonique de Surface (SPR). Ces oscillations se caractérisent par une onde évanescente dont l'amplitude diminue exponentiellement depuis la surface sur une distance maximale de 200 nm (figure I.1) [5]

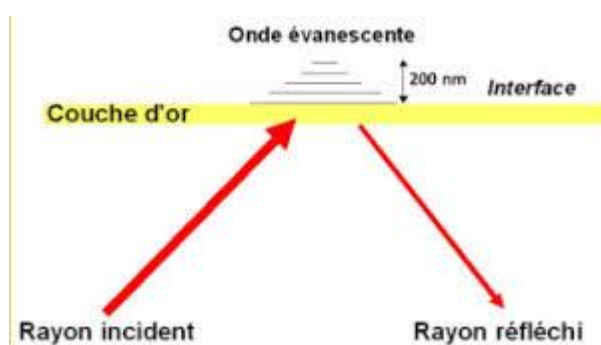


Figure I.1: La formation de l'onde évanescente

L'onde évanescente est le point central des mesures d'interactions. En effet, une perturbation de l'onde évanescente, consécutive à l'interaction de biomolécules sur la surface va induire une diminution de l'angle de résonance directement mesurable. Deux stratégies sont alors envisageables). (Figure I.2) La première est de suivre les variations d'angle de résonance au cours du temps, il s'agit des systèmes basés sur la Résonance Plasmonique de Surface (SPR) dite « classique ». La seconde approche est de travailler à angle fixe et de mesurer les variations de réflectivité induites par la variation d'angle au cours du temps, on parle alors de Résonance Plasmonique de Surface par imagerie (SPRi).[6]

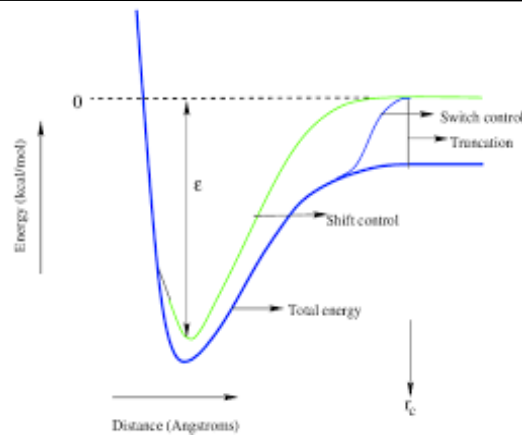


Figure I.2: Relation entre angle de résonance et mesure du signal en SPR et SPRi

I-5 Relation de dispersion des plasmons de surface

Les plasmons de surface délocalisés (PS) sont donc des ondes de surface se propageant à interface d'un milieu diélectrique, de constante ϵ_m , dont la partie réelle est négative dans le domaine visible. Pour étudier les plasmons de surface, il est intéressant de tracer sur un graphe la fonction liant la pulsation du PS en fonction de son vecteur d'onde. En particulier, il est alors possible de prévoir les conditions de couplage avec la lumière par exemple, et d'en déduire les caractéristiques importantes de propagation de l'onde. Nous pourrions montrer que le champ électromagnétique résultant d'une telle fluctuation, présente une décroissance exponentielle de part et d'autre de l'interface.

Pour introduire ces courbes de dispersion, nous devons résoudre les équations de Maxwell appliquées aux ondes de surface présentes à l'interface plane entre un milieu métallique (m) et une relative positive ($\epsilon_s > 0$), et d'un film métallique (non-magnétique) diélectrique ou vide (s). Considérons ces deux milieux comme linéaires, homogènes, isotropes et non magnétiques. Dans cette géométrie plate, on recherche des fonctions ondulées, des solutions de équations de Maxwell, qui se propagent parallèlement à l'interface. Considérons les champs électriques et magnétiques dans les deux médias s et m selon, (cas spécial d'une onde de polarisation magnétique transversale TM encore noté-p) :[7]

$$\begin{cases} \vec{H}_j = (0, \vec{H}_{jy}, 0) \times \exp[+i(K_{jx}x + K_{jz}|Z| - \omega t)] \\ \vec{E}_j = (\vec{E}_{jx}, 0, \vec{E}_{jz}) \times \exp[+i(K_{jx}x + K_{jz}|Z| - \omega t)] \end{cases} \quad (I. 1)$$

Pour $z > 0$ (dans le diélectrique) et pour $z < 0$ (dans le métal), avec $j = s, m$ et où k_{jx} est la constante de propagation de l'onde plasmon

Selon l'axe O_x . Ces champs doivent satisfaire les équations de Maxwell (équations I2) :

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = -\partial \vec{D} \\ \nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} \\ \nabla \times \vec{D} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = 0 \end{cases} \quad (I.2)$$

Où \vec{E} représente le vecteur champ électrique (V/m), \vec{B} G l'induction magnétique (Tesla), \vec{D} le vecteur déplacement électrique (C/m2) et \vec{H} le champ magnétique (A/m2). En tenant compte des conditions de continuité à l'interface (équations I-3 et I-4)

$$\begin{cases} E_{mx} = E_{sx} \\ H_{my} = H_{sy} \\ \tilde{\epsilon}_m E_{mx} = \epsilon_s E_{sx} \\ K_{mx} = K_{sx} = K_x^{sp} \end{cases} \quad (I.3)$$

Il vient le système suivant :

$$\begin{cases} H_{my} - H_{sy} = 0 \\ \frac{K_{mz}}{\tilde{\epsilon}_m} H_{my} + \frac{K_{sz}}{\epsilon_s} H_{sy} = 0 \end{cases} \quad (I.4)$$

Ce système n'a de solution que si le déterminant est nul, ce qui revient à écrire la relation de dispersion :

À partir des relations de Maxwell (équations I-2) et les conditions de continuité à l'interface

$$\frac{K_{sz}}{\epsilon_s} + \frac{K_{mz}}{\tilde{\epsilon}_m} = 0 \quad (I.5)$$

(Équations I-3 et I-4),

$$K_x^2 + K_{jz}^2 = K_0^2 \epsilon_j \quad \text{avec } j = s, m \quad (I.6)$$

Avec k_0 la norme du vecteur d'onde dans le vide :

$$K_0 = \omega/c$$

Finalement, l'expression de la constante de propagation (ou encore « relation de dispersion

($\omega = f(k)$) ») de l'onde plasmon sera écrite sous la forme :

$$K_x^{sp} = \frac{2\pi}{\gamma} \sqrt{\frac{\epsilon_s \times \tilde{\epsilon}_m(\omega)}{\epsilon_s + \tilde{\epsilon}_m(\omega)}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_s \times \tilde{\epsilon}_m(\omega)}{\epsilon_s + \tilde{\epsilon}_m(\omega)}} \quad (I.7)$$

$$K_{jz} = \sqrt{\epsilon_j \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - K_x^2} \quad (I.8)$$

Il est intéressant de noter à ce niveau, que dans le cas d'une interface métal-air par exemple, nous aurons dans le domaine visible $\epsilon_s = 1$ et $\epsilon_m < -1$ ce qui conduit à $k_x > \omega/c$ et alors $K_{jz} = i|K_{jz}|$ devient imaginaire pur. Ce résultat confirme que l'onde de surface présentera un champ maximal à l'interface qui diminuera exponentiellement dans les deux milieux (pour les $|z|$ croissants). Sur la figure I-2, nous avons tracé la relation de dispersion (équation I-7). La figure montre que la courbe de dispersion des plasmons de surface se situe toujours « à droite » de la courbe dite ligne de lumière à laquelle correspond la relation de propagation de la lumière dans le vide $k = \omega/c$.

I-5-1 Relation de couplage plasmon-lumière

Nous venons de représenter graphiquement la relation de dispersion $\omega - k$ qui représente la pulsation du plasmon de surface ω_{sp} en fonction de la norme du vecteur d'onde k_{sp} . Cette représentation permet d'expliquer pourquoi les plasmons de surfaces sont dits « non radiatifs ». Nous avons pu montrer qu'aucun couplage entre les plasmons de surface et la lumière ne pourra être observé, car il faudrait satisfaire l'égalité entre la norme du vecteur d'onde des plasmons de surface k_{sp} et la projection dans le plan de la surface du vecteur d'onde k_x de lumière incidente. Ceci s'écrit simplement selon l'équation I-9

$$\vec{k}_x(\text{photon}) = \vec{k}_{sp} \quad (I.9)$$

Pour coupler les plasmons de surface avec un rayonnement électromagnétique photonique, on remarque en particulier qu'il est nécessaire d'augmenter la composante (k_x) du vecteur d'onde du photon d'une quantité (Δk_x) afin que la condition de résonance décrite par l'équation (I-9) soit satisfaite. Pour réaliser le couplage, il est donc indispensable d'avoir recours à l'utilisation d'un système de couplage, encore appelé « coupleur ». Le rôle du coupleur est d'« accorder » l'onde lumineuse incidente avec l'un des modes des plasmons de surface, afin qu'il y ait un échange d'énergie entre les deux. En effet, avec l'utilisation d'un coupleur et sous réserve que la vérifiée, l'énergie apportée par les photons peut être transférée aux plasmons. Le transfert d'énergie s'accompagne alors d'une exaltation de l'intensité du champ au voisinage de l'interface (localisation d'énergie), et par l'absorption des photons. Ce phénomène quantique optique-électrique résultant du couplage entre les photons incidents et les électrons du métal est encore appelé plasmons-polaritons de surface (SPP) ou résonance des plasmons de surface. C'est le mécanisme mis en jeu dans les capteurs chimiques que nous étudierons. Il existe principalement Deux approches permettant de coupler les plasmons avec la lumière : 1. En faisant passer la lumière incidente à travers un milieu d'indice de réfraction supérieur à celui du milieu diélectrique siège des ondes plasmons. En ajoutant un pseudo-moment, dû à la structure de l'interface métallique via un réseau périodique ou plus généralement via une surface rugueuse. Dans la suite,

nous présentons successivement la méthode ATR (Atténuâtes Total Réflexion) basée sur la première approche puis le couplage par réseau qui se base sur la seconde. Signalons que les plasmons de surface peuvent aussi être observés par bombardement d'électrons (avec un microscope électronique à transmission par exemple).[8]

I-6 Les configurations d'excitation principales d'une onde plasmon de surface

I-6-1 Couplage par prisme

La méthode dite ATR (Atténuâtes Total Réflexion) 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. Kretshmann qui utilisent un prisme comme coupleur (figure I.3).[9]



Figure I.3: Couplage par 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 :

$$K_x = \sqrt{\epsilon_p} \frac{\omega}{c} \sin \theta \tag{I. 10}$$

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

$$K_x = K_{sp} \rightarrow \sqrt{\epsilon_p} \frac{\omega}{c} \sin \theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_s}{\epsilon_m + \epsilon_s}} \tag{I. 11}$$

Où ϵ_p , ϵ_s , ϵ_m sont respectivement les fonctions diélectriques du prisme, de l'échantillon et de la couche métallique.

I-6-2 Couplage par réseau de diffraction

Couplage par réseau Si l'interface métal/diélectrique est périodiquement déformée d'un pas d'a, l'onde optique incidente est diffractée sous différents angles suivant les caractéristiques du

CHAPITRE I PLASMON DE SURFACE ET LA FIBRE OPTIQUE

réseau de diffraction (indice, période, géométrie). 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 :

$$\sqrt{\epsilon_p} \frac{\omega}{c} \sin \theta = K_{sp}(\omega) \pm n \frac{2\pi}{a} = K_{sp}(\omega) \pm \Delta K_x \quad (I.12)$$

Avec n un entier relatif. Cette expression se généralise en posant Δk_x , comme le terme qui traduit les perturbations associées au réseau ou à la rugosité de surface par rapport à la surface plane. [10]

I-7 LA FIBRE OPTIQUE

I-7-1 Définition

Une fibre optique est un mince filament cylindrique en verre qui permet de guider une onde électromagnétique.

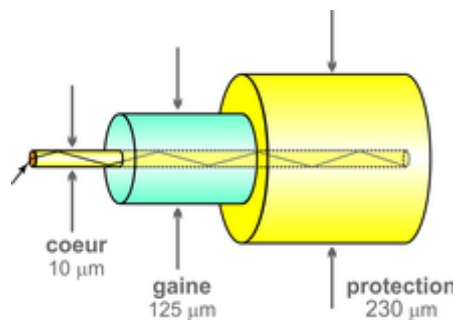


Figure I-4: LA FIBRE OPTIQUE

Elle est très utilisée en télécommunications car elle permet des transmissions sur de grandes distances et sur une large bande de fréquences. La fibre optique consiste en une partie centrale, le cœur d'indice de réfraction il transporte le signal optique. Entourée par une seconde partie qui est la gaine optique d'indice de réfraction, elle évite que le signal optique sorte du cœur. Un autre exemple de guide d'onde est le câble coaxial qui est utilisé pour transporter par exemple les signaux de télévision jusqu'à nos résidences La fibre optique est souvent recouverte d'un revêtement protecteur qui ne joue aucun rôle dans le guidage de la lumière [11] (figure I-5)

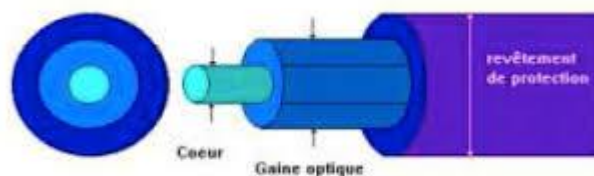


Figure I-5: LA FIBRE OPTIQUE

I-8 Structure de la fibre

Pour bien comprendre les fibres optiques, il faut tout d'abord commencer par comprendre leur structure et composition. Une fibre optique peut être réalisée à l'aide de différents matériaux et ceci impliquera des phénomènes physiques différents observés par la suite. Classiquement une fibre est constituée de 3 parties : Le cœur, la gaine optique et la couche protectrice.[12]

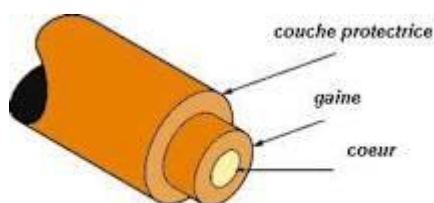


Figure I-6: Structure de la fibre

- Le cœur : Composé de silice, de quartz fondu ou de plastique. C'est la couche la plus importante en termes de transmission optique qui permet de guider les informations d'un bout à l'autre de la fibre sans trop de pertes.
- La gaine optique : Qui est composée des mêmes matériaux que le cœur. Son indice de réfraction est inférieur à celui du cœur (différence de quelques millièmes), ce qui permet de réfléchir la lumière entièrement de multiples fois à l'interface cœur-gaine (phénomène de réflexion totale interne). La gaine optique n'étant pas destinée à transmettre la lumière, il n'est pas nécessaire que ses propriétés optiques soient aussi bonnes que celles du cœur. Le cœur et la gaine constituent la partie optique qui canalise et propage la lumière.
- La couche de protection : Permet le contact de la fibre avec des supports sans perturber le fonctionnement de la partie optique. Généralement en plastique, le tube n'intervient pas dans la transmission de la lumière. Il assure la protection mécanique de la fibre ; il sert à la flexibilité de la fibre et facilite sa manipulation.

I-9 Principe de fonctionnement d'une fibre optique

La fibre optique est un guide d'ondes qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection.

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.[13]

Une fibre optique est souvent décrite selon deux paramètres :

- La différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine $\Delta = (N_c - N_g) / N_c$ ou N_c est l'indice de réfraction du cœur, et N_g celui de la gaine
- L'ouverture numérique de la fibre qui est concrètement le sinus de l'angle d'entrée maximal de la lumière dans la fibre pour que la lumière puisse être guidée sans perte, mesuré par rapport à l'axe de la fibre.

I-9-1 Principe de propagation

La propagation de la lumière dans le passage d'un milieu matériel à un autre est régie par la loi de Snell-Descartes. Si n_1 désigne l'indice de réfraction du matériau 1 dans lequel la lumière est incidente avant de rencontrer l'interface entre les deux matériaux et n_2 l'indice de réfraction du matériau 2 dans lequel la lumière pénètre après sa traversée de l'interface, la loi de Snell-Descartes s'écrit $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$. θ_1 et θ_2 désignent respectivement l'angle d'incidence dans le milieu 1 et l'angle de réfraction dans le milieu 2 selon le schéma ci-dessous :

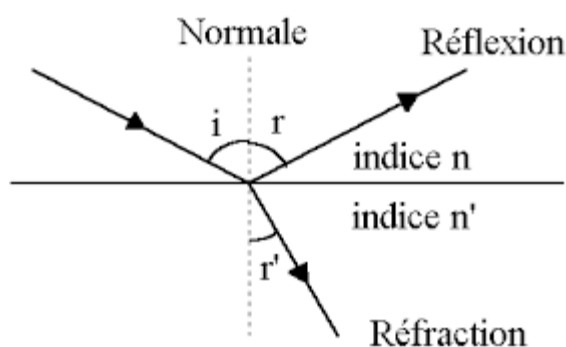


Figure I-7: Principe de propagation

Les angles sont toujours repérés par rapport à la normale à l'interface (la normale à l'interface est représentée en trait discontinu sur le schéma ci-dessus). La réflexion se fait avec un angle réfléchi θ_3 égal à l'angle d'incidence θ_1 . [14]

I-10 Types des fibres optiques

Il existe 2 grands types de fibres :

- Multimode : dans lequel il existe différents modes de propagation de la lumière au sein du cœur de la fibre.
- Monomode : dans lequel il existe un seul mode de propagation de la lumière, le mode en ligne droite.

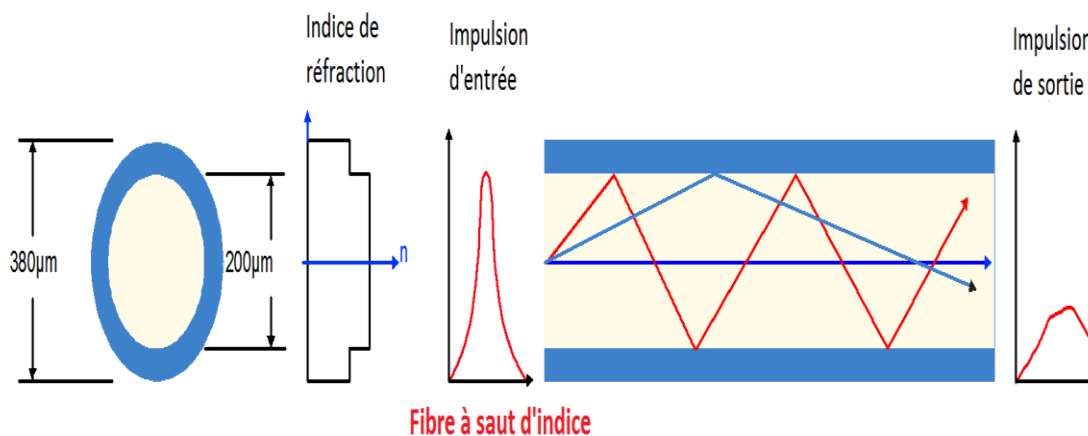


Figure I-8 : Multimode

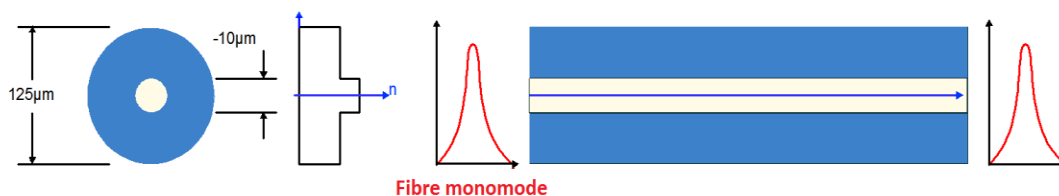


Figure I-9: Monomode

I-11 Comparaison entre les différents types de fibres optique

Structures	Avantages	Inconvénients	Applications pratiques
Multimode à saut d'indice (SI)	Grande ouverture numérique, connexion facile, faible prix, facilité de mise en œuvre	Pertes, dispersion et distorsion, élevées du signal	Communications courtes distances, réseaux locaux
Multimode à gradient d'indice (GI)	Bande passante raisonnable et bonne qualité de transmission	Difficile à mettre en œuvre	Communications courtes et moyennes distances
Monomode	Bande passante très grande, atténuation très faible, faible dispersion	Prix très élevé	Communications longues distances

Tableau 1 : Comparaison entre les différents types de fibre optiques.[12]

I-12 Caractéristiques de la fibre optique :

La première des caractéristiques de la fibre optique que nous allons décrypter est l'atténuation de la fibre optique. Sa définition est simple : il s'agit de l'affaiblissement du signal au cours de la propagation. Le faible affaiblissement du signal lumineux est d'ailleurs un des principaux avantages de cette technologie. Depuis les années 70, les fabricants de fibre travaillent avec insistance pour réduire les pertes durant le transport des communications optiques.

Si les réseaux fibre sont en train de remplacer progressivement les réseaux cuivrés, c'est notamment grâce à cet affaiblissement du signal peu important. [15]

I-13 Avantages de la fibre optique

- Le débit
- La vitesse et la qualité de connexion
- La sécurité de transmission des données en ligne.

I-14 Inconvénients de la fibre optique

Bien que l'emploi de la fibre optique présente de nombreux avantages, elle embarque également des inconvénients.

- Fragilité
- Faible puissance des sources d'émission de puissance-lumière
- Utilisation limitée au sol.

I-15 Les applications de la fibre optique**I-15-1 Les télécommunications**

En télécommunications, la fibre optique est utilisée pour la transmission d'information, que ce soit des conversations téléphoniques, des images ou des données. C'est probablement l'un des domaines où l'utilisation de la fibre optique est le plus important et a le plus d'avenir. Un fil de cuivre ne peut supporter que quelques communications, contre 300000 pour la fibre optique. Les fibres sont alors utilisées en particulier pour les réseaux à haut débit. Leurs capacités de transmission atteignent des débits de l'ordre du gigabit par seconde (câbles transatlantiques) avec une atténuation très faible et grâce aux multiplexages, on atteint la centaine de Gbits/s.

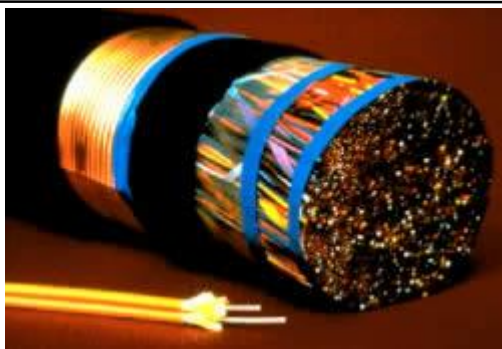


Figure I-10 : Une seule paire de fibre optiques transporte un débit

10 fois plus fort que 250 paires de fils de cuivre

I-15-2 La médecine

La première utilisation d'envergure de la fibre optique fut en médecine, domaine où elle est toujours grandement utilisée aujourd'hui. La fibre optique est utilisée en médecine tant pour diagnostiquer des problèmes de santé que pour traiter certaines maladies.

I-15-3 Les capteurs (température, pression, etc.)

Un domaine où la fibre optique a trouvé une application plus récemment est celui de la mesure. La fibre optique, comme tout objet, subit les influences de différents paramètres. Elle sera, entre autres, légèrement déformée lorsqu'elle est soumise à une pression, une force, une contrainte ou une variation de température. La déformation subie par la fibre optique aura une influence sur la façon dont la lumière s'y propage. Il est possible de mesurer ces modifications et de convertir cette mesure en unités de pression, de température ou de force, selon ce qu'on désire mesurer. Ces capteurs ont l'avantage d'être très petits, très précis et insensibles aux perturbations électromagnétiques.

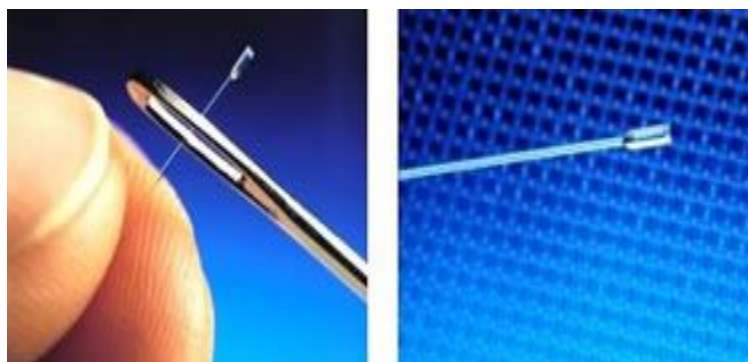


Figure I-11 : Capteur pour mesurer la pression dans les vaisseaux sanguins

I-16 CONCLUSION

Ce chapitre comporte deux parties distinctes :

En premier lieu, nous avons donné les notions de bases pour les plasmons de surface, Cette technologie est aujourd'hui la plus performante par son automatisation et son intégration dans plusieurs domaines. Dans ce chapitre, ainsi que les fibres optiques.

Cependant, la deuxième partie donne une vue générale sur la fibre optique, cette dernière peut être assimilés à un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété de conduire la lumière et sert dans les transmissions terrestres et océaniques de données. Elle est notamment estimée pour son atténuation très faible et ses débits d'informations nettement très élevés.

La fibre optique est généralement utilisée dans les télécommunications pour la transmission de données à très haut débit sur de grandes distances. Toutefois elle possède d'autres applications répandues comme en médecine (la fibroscopie), en automatisation (pour les mesures en temps réel des capteurs), ou en éclairage décoratif.



CHAPITRE II

CAPTEURS A RESONANCE DES PLASMONS DE SURFACE

II-1 INTRODUCTION

Depuis leur développement industriel voici plus d'un quart de siècle, les fibres optiques se sont imposées dans les communications. Ils se sont déplacés dans d'autres directions, comme les détecteurs à fibres optiques. Équipement de communication et capteur à fibres optiques se différencient par la nature du signal transmis. Le premier est conçu de manière à véhiculer le signal avec le minimum de perturbations, tandis que le deuxième doit délivrer le plus fort signal possible en réponse à une perturbation spécifiée. L'utilisation de la fibre optique comme capteur à plasmons de surface a suscité un grand intérêt et ce depuis 1993. Dans ce chapitre nous allons donner les notions de base des capteurs à résonance plasmonique (SPR) de la définition jusqu'au mode d'excitation des plasmons de surface dans une fibre optique.[16]

II-2 CAPTEURS A RESONANCE DES PLASMONS DE SURFACE

Les capteurs sont désormais un élément essentiel et indispensable dans de nombreux domaines allant de la recherche scientifique au contrôle des processus de production industrielle ou du contrôle de l'environnement, mais ils existent également en particulier dans le domaine des sciences de la vie (biologie, biochimie, médecine et écologie).[17]

L'onde plasmon de surface est une oscillation pour exacerber les charges qui apparaissent dans l'interface entre deux matériaux dont les constantes isolantes sont des indicateurs différents, comme entre le métal (l'or ou l'argent souvent) et l'isolation électrique. Il existe de nombreuses configurations de biocapteurs SPR, et ceux-ci diffèrent seulement par le biais de plasmon de surface. Dans ce cas, la lumière est totalement réfléchi à l'interface du prisme et du métal et génère une onde évanescente dans la couche de métal

II-3 Principe de fonctionnement des capteurs SPR à fibre optique

Ce capteur permet de mesurer les caractéristiques d'interaction entre deux molécules en temps réel, et sans marquage spécifique. Pour cela, une molécule est installée à la surface du biocapteur et l'autre molécule (cible) est injectée. Le principe de détection SPR est basé sur la quantification des changements du coefficient de réfraction près de la surface, associés à la variation de densité sur la surface du biocapteur, en raison de la composition et de la désintégration des complexes moléculaires [18]

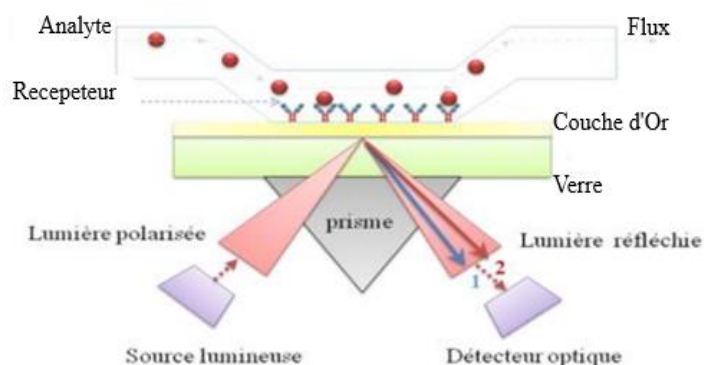


Figure (II-1) . Principe de fonctionnement d'un capteur à résonance plasmonique de surface (SPR)[19].

En effet la mesure est basée sur la courbe de plasmon qui représente la variation de la réflectivité en fonction de l'angle d'incidence. L'optimum de résonance des plasmons est au voisinage d'un angle d'incidence donnant le minimum de réflectivité. Les variations des propriétés de ce pic d'adsorption vont permettre de quantifier les perturbations se produisant près de l'interface métal/solution dues aux variations de l'indice de réfraction du milieu couvrant, de l'épaisseur de la couche formée lors de la variation de la concentration de la molécule cible. Ainsi pour un état (1) la courbe de plasmons présentera un angle de résonance (θ_1), la fixation d'une entité sur la surface (état 2), la courbe se déplace présentant alors un angle de résonance (θ_2). En physique, cela se traduit par le fait que lorsque la lumière monochromatique et polarisée arrive à l'interface entre deux milieux d'indice de réfraction différent. Cette interface est recouverte d'une fine couche métallique, l'intensité de la lumière réfléchie est nettement réduite pour un angle d'incidence particulier.

La composante électromagnétique de la lumière, l'onde évanescente, se propage perpendiculairement à l'interface, jusqu'à une certaine épaisseur dans la couche métallique. L'angle de résonance varie notamment en fonction de l'indice de réfraction, donc en fonction de la masse des molécules situées au voisinage de la surface.

Par conséquent, un suivi de l'angle SPR en fonction du temps permet de suivre en temps réel l'association et la dissociation entre la sonde et la cible. Le signal obtenu est un sténogramme (cf. figure II-2). Il permet de donner des informations sur la cinétique des interactions, l'épaisseur et la masse de la couche déposée sur la surface donc sur le nombre de molécules fixées.

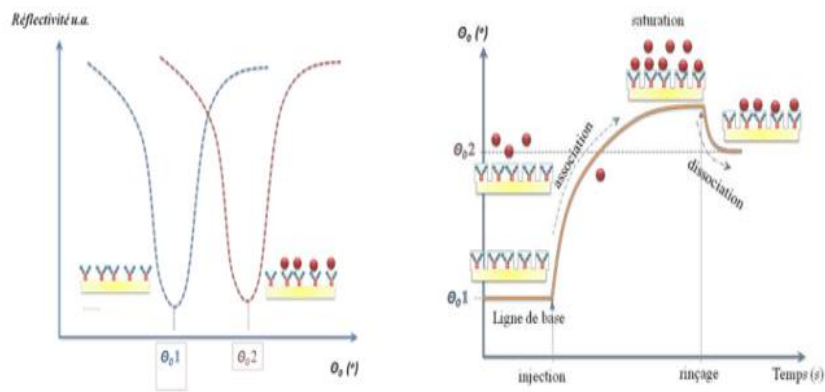


Figure (II-2) : Réponses d'un capteur à résonance plasmonique de surface

Dans le principe du SPR, les plasmons de surface non-localités sont impliqués. La théorie montre que ces plasmons ne peuvent se coupler avec une lumière visible que dans des conditions très particulières, qui imposent d'utiliser des configurations expérimentales originales. En effet, pour observer des plasmons de surface non-localités à l'aide d'une excitation optique, il est indispensable de satisfaire la relation de couplage donnée par l'équation suivante:

$$\sqrt{\epsilon_p} \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\tilde{\epsilon}_m(\omega) \times \epsilon_s}{\tilde{\epsilon}_m(\omega) + \epsilon_s}} \quad (II.1)$$

Où ϵ_m est la fonction diélectrique complexe du métal, ϵ_s la constante diélectrique du milieu environnant,

ϵ_p la constante diélectrique du prisme ou de la fibre optique,

λ la longueur d'onde et θ l'angle d'incidence de la lumière qui vient sonder la surface.

Si nous tentions de tracer ces deux courbes (terme de gauche et terme de droite), nous obtiendrions des courbes dites de dispersions de la lumière et des plasmons de surface. Ces deux courbes, dont l'une est une droite, ne se coupent qu'à un point précis, définissant le point de résonance. Pour se placer dans ces conditions de résonance, et sous réserve que l'ensemble des fonctions diélectriques est compatible, nous pourrions jouer sur l'angle θ et la longueur d'onde λ . C'est précisément les deux modes de fonctionnement des capteurs SPR où la détection se fait par interrogation angulaire, pour trouver la condition de résonance ou par modulation de la longueur d'onde de la lumière incidente (figure II-3). Les deux méthodes peuvent être résumées ainsi :

- 1- l'interrogation angulaire (θ) qui consiste à suivre la position angulaire du minimum de réflectivité SPR à une longueur d'onde λ fixe

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

II-4 Capteurs SPR à fibre optique

Plusieurs principes de mesure pour divers paramètres physiques et chimiques ont été proposés et testés expérimentalement, de sorte que les capteurs à fibre optique étaient une spécialité majeure en 1982. Dans ce chapitre, nous nous référerons aux différentes configurations utilisées dans capteurs SPR à fibre optique.

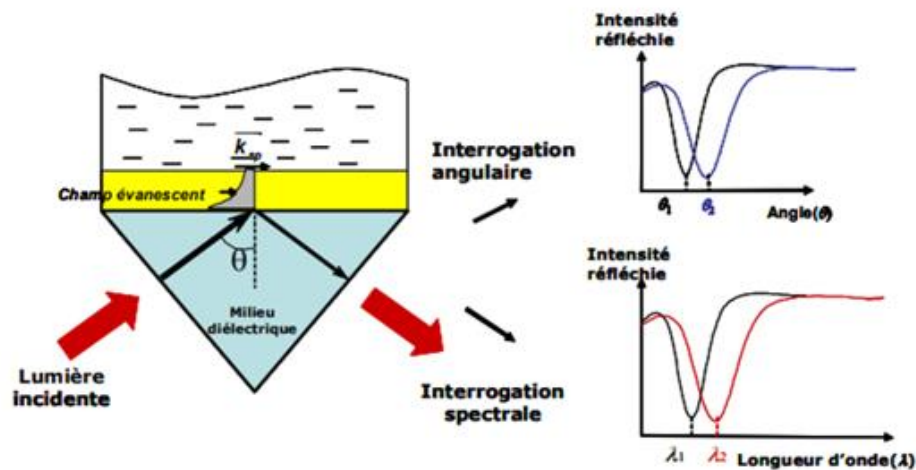
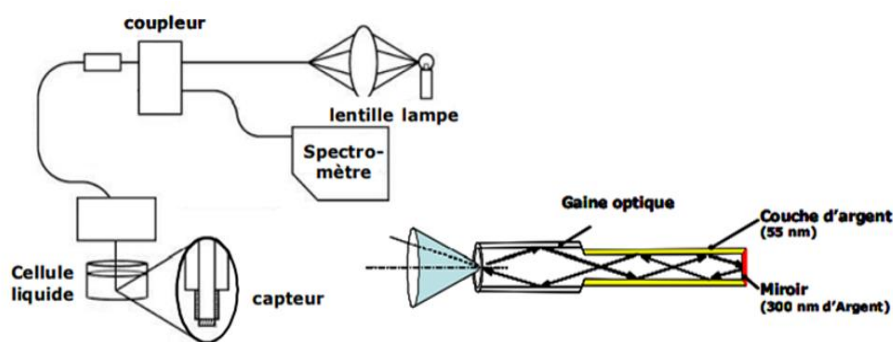


Figure (II-3) : principe du capteur SPR

L'utilisation d'une fibre optique comme capteur à plasmons de surface a été proposée en premier (1993) par Jorgensen et Yee [20] Ils ont simultanément étudié une structure basée sur le prisme de Kretschmann et sur une fibre optique multimodale [21]. Leur première configuration basée sur la réflexion de la lumière (réflection -bases fibre-optique RFO) est constituée d'une zone sensible à l'extrémité d'une fibre optique multimodale. Celle-ci a été dénudée puis métallisée symétriquement avec une cinquantaine de nanomètre d'argent ou d'or (figure II-4). La lumière d'une source blanche est injectée dans la fibre et subit de multiples réflexions sur la zone active où certaines longueurs d'onde sont absorbées par les ondes plasmons de surface. Un miroir disposé sur la face de sortie de la fibre réfléchit la lumière qui est ensuite traitée par un spectromètre [22]



(Figure II-4) : Capteur à fibre optique dont la zone sensible est située à l'extrémité de la fibre [23]

II-5 Conditions d'excitation d'un plasmon de surface dans une fibre

Pour pouvoir générer un plasmon de surface dans une fibre, il est nécessaire de remplacer la gaine optique par une couche métallique sur quelques centimètres. Il est alors possible sous certaines conditions d'exciter une telle onde de surface à l'interface entre le métal déposé sur le cœur de la fibre et le diélectrique qui entoure le tout. Si le diamètre de la fibre est suffisamment grand, le formalisme développé précédemment pour le calcul de l'angle Ψ et des coefficients de réflexions à l'interface cœur/gaine peut s'appliquer de la même façon pour une interface cœur/métal.

En revanche, les conditions d'excitation du plasmon sont différentes dans les fibres : - Dans un dispositif à prisme, il est possible de choisir uniquement la polarisation TM. Par contre, lors de la réflexion de la lumière sur la surface du cœur de la fibre, il existe à la fois la polarisation TE et la polarisation TM quel que soit l'état de polarisation de la lumière à l'entrée de la fibre. (La Figure II-5) représente la face d'entrée de la fibre. On suppose que la lumière est polarisée linéairement suivant l'axe Ox. Pour le rayon lumineux qui se propage dans le plan xOz, seule la polarisation TM existe pour la réflexion à la périphérie du cœur. Au contraire, pour le rayon lumineux dans le plan yOz, seule la polarisation TE existe. Pour un plan quelconque caractérisé par l'angle θ , la contribution de la polarisation TM pour le champ électrique est proportionnelle à $\cos(\theta)$. Pour l'intensité, elle est proportionnelle à $\cos^2(\theta)$. Donc, en moyenne, pour tous les angles θ , cette contribution vaut $\frac{1}{2}$

L'onde incidente sur la face d'entrée de la fibre IGI, issue de la fibre unimodale a priori, une polarisation quelconque qui peut être considérée comme la superposition de deux polarisations linéaires perpendiculaires. On peut donc considérer qu'à l'entrée de la fibre, les contributions TE et TM sont égales. Etant donné que seule la polarisation TM est affectée par l'excitation du plasmon

de surface, l'intensité lumineuse en sortie de la fibre sera, a priori, dans les meilleures conditions la moitié de l'intensité incidente [24]

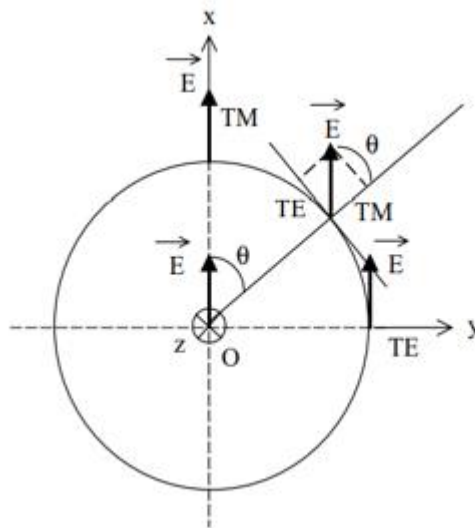


Figure (II-5) : Schéma explicatif de l'état de polarisation de la lumière se propageant dans une fibre

II-6 Caractéristiques du capteur fibre optique

En général, un capteur est décrit par les 3 caractéristiques suivantes : La sensibilité, la limite de détection (lié à la précision de la mesure) et la gamme de fonctionnement.

II-6-1 La sensibilité S du capteur

La sensibilité S du capteur est définie comme le rapport entre la variation du paramètre caractérisant la résonance plasmon, ici la longueur d'onde λ_{res} pour laquelle la transmission à travers la fibre est minimale (figure II-6) et la grandeur à mesurer qui peut être dans notre cas un indice de réfraction, ou encore une masse ou une épaisseur de molécules adsorbées. L'indice de réfraction, valeur normalement sans unité, sera néanmoins noté, par conformité avec ce qui est fait dans la littérature, en RIU pour « Refractive Index Unit ». Alors la sensibilité du capteur sera égale aux valeurs de $n_s S d\lambda = n d\lambda_{res}$ (RIU/nm) ou de $S dn = \lambda_{res} dn$ (nm/RIU) [2,3]. Dans ce travail nous avons choisi la définition suivante (équation III.2) [25]:

$$S_{\gamma} = \frac{dn}{d\gamma_{res}} [RIU / nm] \quad (II. 2)$$

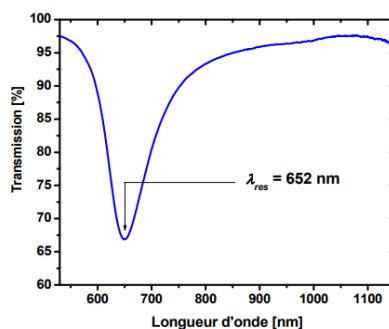


Figure (II-6)

II-6-2 La limite de détection ou résolution

Est la variation minimale du paramètre mesurée (l'indice de réfraction) que l'on sera capable de résoudre. Elle dépendra donc de la résolution spectrale qui est calculée ou estimée à partir de la résolution instrumentale liée aux équipements utilisés pour la mesure du signal. Dans notre cas, cette limite de détection dépendra essentiellement des performances du spectromètre (résolution en longueur d'onde, réponse de la CCD,...). De fait, la résolution instrumentale est fortement influencée par la précision avec laquelle la longueur d'onde de résonance est relevée.

La résolution sera aussi fortement influencée par la forme intrinsèque du signal mesuré. Notre capacité à séparer deux signaux distincts dépendra de l'amplitude du pic d'absorption et de sa largeur. En particulier, une grande largeur à mi-hauteur des bandes d'absorption obtenues avec des fibres ne permettra pas de pointer avec une grande précision la longueur d'onde de résonance.

Finalement dans la littérature, la limite de détection, donnée en RIU, est généralement calculée en multipliant la sensibilité du capteur S_λ (valeur intrinsèque) par la résolution de la chaîne de mesure selon l'équation III.3 [26]:

$$\text{limite de détection} = S_\gamma \times R_{spec} = \left(\frac{dn}{d\gamma_{res}} \right) \times \text{Résolution} \quad [RIU] \quad (\text{II. 3})$$

II-6-3 La gamme de fonctionnement du capteur

C'est l'intervalle d'indices de réfraction pour lequel le capteur est efficace. La gamme sera généralement comprise entre les indices de réfraction ns de 1,33 à 1,44. Cette gamme peut paraître étroite, mais si l'on tient compte que ces capteurs sont essentiellement envisagés pour la détection en milieu aqueux de polluants ou d'espèces biologiques présentes en faible quantité, on doit alors s'attendre à travailler autour de l'indice de l'eau, à savoir 1,3335.[27]

II-7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons conçu et analysé un capteur à base de fibre optique en forme de D monomode utilisant une structure de réseau de nano composite Ag-fe₂o₃ dans des configurations séparées. Pour valoriser le SPR, nous avons optimisé l'épaisseur du gainage résiduel (Rc), largeur de grille (w), et l'écart de largeur de grille (wg). De plus, nous avons étudié l'effet de

Épaisseur de Fe₂o₃ recouverte de grilles d'argent. Nous avons également étudié la variation du champ électrique en mode SPR sur les surfaces du réseau. À base d'Ag-fe₂o₃



CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSION

III-1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présenterons les résultats de simulation obtenus lors de notre étude. Ces résultats serviront à évaluer les performances du modèle choisis pour notre capteur SPR.

Nous commencerons par décrire la méthodologie de simulation que nous avons employé, ensuite nous présenterons le modèle étudié du capteur à fibre optique à résonance plasmonique basé sur une grille Ag- α -Fe₂O₃

Enfin nous donnerons les résultats obtenus de manière claire et concise en utilisant des graphiques et nous conclurons en en soulignant les principales conclusions tirées des résultats de simulation afin de définir les valeurs optimales des différents paramètres du capteur en

III-2 METHODE DES ELEMENTS FINIS (FEM)

La méthode des éléments finis FEM (finité Elément Method) est une méthode numérique utilisé pour résoudre des problèmes dont la structure est assez complexe.

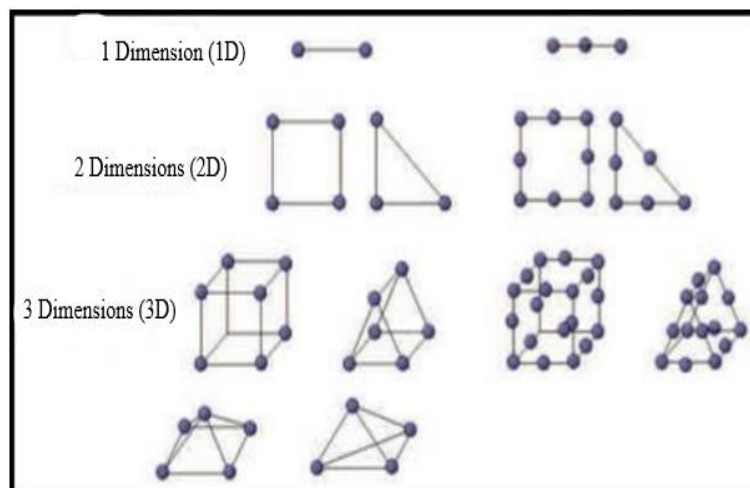


Figure (III-1) : Quelques types d'éléments.

Son principe consiste à :

- Diviser l'espace d'étude (structure) en un grand nombre de petites régions appelés « élément »
- Calculer localement le champ électromagnétique dans chacun de ces éléments. Cette approche réduit considérablement la complexité de la structure, elle permet ainsi de transformer le système d'équations de MAXWELL en un système d'équations matricielles dont la solution est mesurable par les méthodes numériques traditionnelles [28].

III-2-1 Algorithme de résolution FEM :

Généralement, appropriée à toutes sortes de problèmes d'équations différentielles, la résolution par la méthode des éléments finis comprend les étapes clés suivantes :

A. Formulation vibrationnelle : Application de l'équation d'onde dans le domaine d'étude

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu r} \vec{\nabla} \right) \times \vec{E}(\vec{r}) - k_{0^2 \epsilon r} \vec{E}(\vec{r}) = \vec{0} \quad (III.1)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = -\frac{1}{j\omega\mu r} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}) \quad (III.2)$$

B. Découpage et formulation des éléments finis : Pour chaque élément du domaine envisagé, les grandeurs des champs continus \vec{E} et \vec{H} sont approchées par des valeurs discrètes dont les inconnues nodales sont écrites E_i et H_i . Le résultat de cette étape sera donc un ensemble d'équations linéaires correspondant aux vecteurs champs électrique E et magnétique H.

C. Résolution : Après avoir construit un ensemble d'équations linéaires (matriciel), l'étape suivante consiste à résoudre ces équations. Ainsi, différentes méthodes de résolution des systèmes linéaires peuvent être appliquées, les critères de choix sont souvent [29] :

- Le temps de calcul nécessaire,
- Le degré de précision des résultats obtenus,
- La convergence et la stabilité du calcul numérique. Les méthodes de résolution sont diverses mais les plus répandues sont :
- Les méthodes itératives : Gauss-Seidel, Jacobi, algorithme du gradient conjugué...etc.
- La méthode directe de décomposition LU

III-2-2 Algorithme de FEM :

L'une des premières étapes de la méthode des éléments finis est le maillage de la structure. En d'autres termes, diviser l'espace de travail en plus petits morceaux. La taille des éléments ainsi découpés dépend des détails de la géométrie de la structure. Pour chaque élément fini, une simple loi de changement de champ est exprimée.

Le but de l'analyse est de calculer les champs aux différents nœuds (les coins de chaque élément de coupe).

Les techniques utilisées par la méthode FEM incluent la minimisation ou la maximisation d'expressions connues pour être statiques autour de la solution. Généralement, la méthode FEM cherche l'expression du champ électrique tout en minimisant la fonction énergétique. Le champ magnétique peut être obtenu à partir du champ électrique ainsi calculé. Par rapport aux autres technologies numériques, l'un des avantages de cette technologie est les propriétés électriques et géométriques de chaque élément qui peuvent être définies indépendamment les unes des autres, cela conduit à un maillage différent entre les parties géométriques les plus complexes du système et le reste de l'espace à analyser.

III-2-3 Organigramme d'un logiciel éléments finis :

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient des étapes caractéristiques ou des blocs fonctionnels décrits par la Figure (III-2)

Préprocesseur interactif

Fonctions : Décodage des données.

Données : Coordonnées des nœuds, définition des éléments < mailles > Paramètres physiques, sollicitations, condition aux limites.

Vérifications : Visualisation du maillage, lecture du < fichier résultat > ou < questions-réponses-vérifications > et création du fichier des données.

Analyse du problème

Vérification des données

Bloc calcul non interactif

Fonctions :

-Calcul des matrices et vecteurs et résolution du système d'équations.

Pour chaque élément :

- Calcul des matrices élémentaires (comportement, sollicitations) - Assemblage dans les matrices globales.

Résolution :

-Prise en compte des sollicitations nodales, prise en compte des conditions aux limites, résolution et création du fichier des données.

Modification des données

Vérification des données

Post processeur interactif

Fonctions :

-Traitement des résultats visualisation, calcul des variables secondaires (δ , ξ etc.), traitements des variables.

- Superposition de problèmes et visualisation.

Analyse des résultats note

De calcul

Figure (III-2) : Organigramme d'un logiciel dans les méthodes d'éléments finis.

III-2-4 Méthode FDTD (Finité Différence Time Domain) :

La méthode FDTD est une autre méthode similaire à la méthode FEM, elle a été initialement proposée par Kane S. Yee en 1966. Cette méthode de calcul effectuée dans le domaine temporel permet de visualiser la propagation de l'onde dans des milieux structurés tels que les cristaux photoniques. Cette méthode permet à l'utilisateur de développer une compréhension plus intuitive des processus de propagation. Elle permet aussi d'obtenir de nombreuses informations sur la propagation de l'onde dans la structure [30].

III-3 RESULTATS ET DISCUSSION

III-3-1 Structure réalisée

Le schéma du capteur proposé est présenté Figure (III-3), une séquence de maillage contrôlée par la physique avec une taille d'élément extrêmement fine est utilisée pour obtenir une précision maximale dans la simulation.

La forme choisie du capteur est sous la forme D, c'est un type spécifique de capteur utilisé pour détecter les interactions moléculaires en temps réel, la configuration en forme « D » permet une sensibilité accrue et une meilleure résolution des mesures. Le revêtement de ce capteur est faite par une couche de Fe_2O_3 (Oxyde de Fer), Le capteur est réalisé par une couche de Fe_2O_3 (oxyde de fer), et une couche d'argent Ag dont le diamètre est de 62,5 nm et 4,5 nm et la longueur de la zone de détection était $L = 3500nm$ Voir les réseaux agricoles et les écarts entre les réseaux représentés dans les groupes de travail et les W_a L'épaisseur des réseaux αFe_2O_3 et Ag est d_2 et d_1 respectivement. La quantité de la gaine restante est représentée par (Λ) [30]

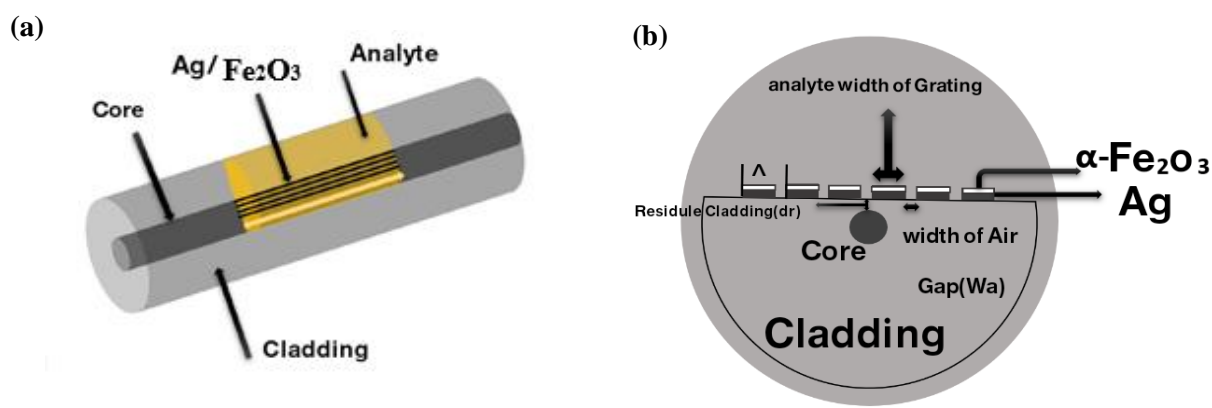


Figure (III-3) : Schéma du capteur de fibres SPR basé sur l'hématite argentée (αFe_2O_3). (a) Sonde de structure 3D. (b) Coupe transversale du capteur SPR.

Nom	Expression	Valeur	Description
rc	4.5	4.5	Cœur de Radius
rc1	62.5	62.5	Revêtement Radius
Ag-th	45[nm]	4.5E-8m	Réseau siliver
Fe-th	12[nm]	1.2E-8m	Féminité effaçant la couche de thckness
W	1	1	Largeur du réseau
P	0.1	0.1	Pitch
W1	1[um]	1E-6m	Longueur d'onde de fonctionnement
f0	c_const/w1	2.9979E14 1/s	Fréquence opérationnelle
t_PML	0.5*7.5*p		
B1	0.6961663		
C1	0.0684043[um]		
B2	0.4079426		
C2	0.1162414[um]		
B3	0.8974794		
C3	9.896161[um]		
n_silica	$\text{Sqrt}(1+(B1*wl^2)/(wl^2-C1^2) + (B2*wl^2)/(wl^2-C2^2) + (B3*wl^2)/(wl^2-C3^2))$		Eq Selemrier pour le revêtement
b1	0.7028554		
c1	0.727723[um]		
b2	0.4146307		
c2	0.1143085[um]		
b3	0.8974546		
c3	9.896161[um]		
n_Ge_dop	$\text{Sqrt}(1+(b1*wl^2)/(wl^2-c1^2) + (b2*wl^2)/(wl^2-c2^2) + (b3*wl^2)/(wl^2-c3^2))$		Eq Selemrier pour l'IR de Cœur

Tableau (III-1) : Paramètres de la structure

Le maillage de la structure est représenté figure (III-4), il montre la division de la structure en petits éléments finis connectés entre eux pour former un réseau continu. Chaque élément fini est caractérisé par un ensemble de nœuds ou de points d'interpolation, et les propriétés physiques de la structure sont attribués à ces éléments est utilisé pour représenter les paramètres de conception et permettre la recherche des meilleures configurations en ajustant la forme, la taille ou la position des éléments.

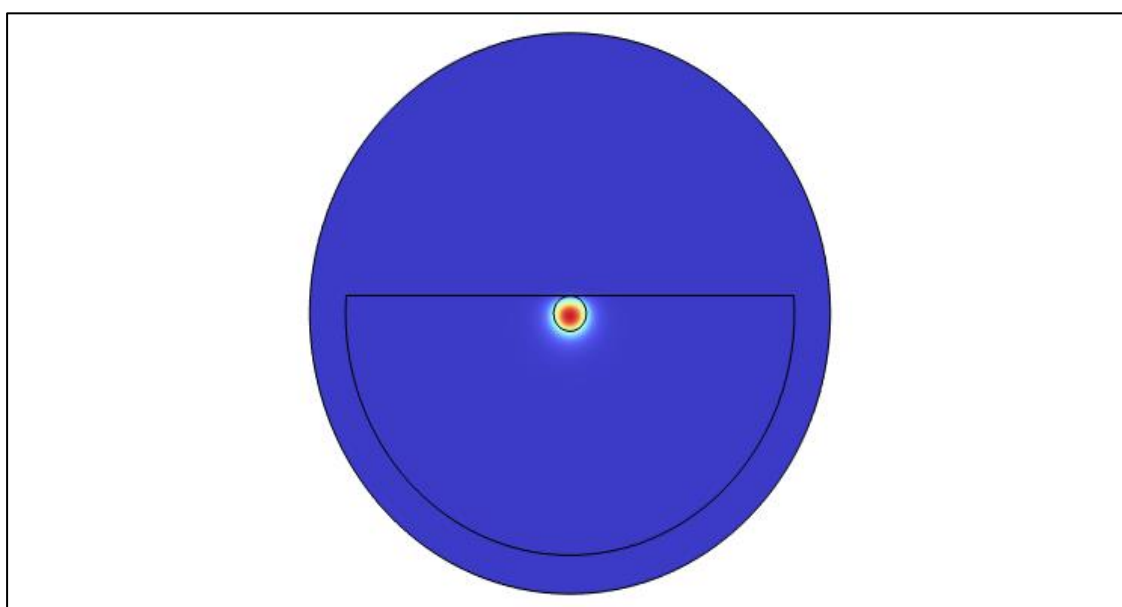
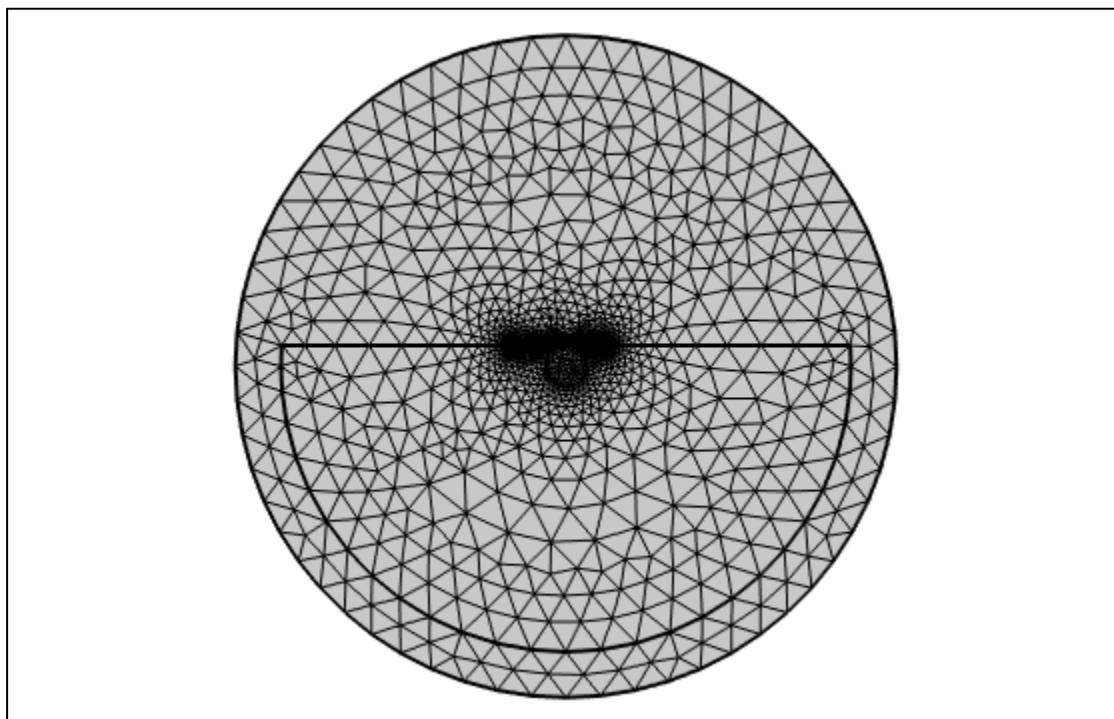


Figure (III-4) : Le maillage

III-4 CARACTERISTIQUES OPTIQUES

Les capteurs SPR possèdent plusieurs caractéristiques distinctives qui les rendent adaptés à la détection d'interactions moléculaires. Dans la section suivante, nous donnerons les résultats obtenus pour certaines caractéristiques de notre capteur tel que la sensibilité et la transmission.

III-4-1 Dispersion du champ électrique

La dispersion du champ électrique dans un capteur SPR de forme D fait référence à la distribution spatiale du champ électrique à la surface du capteur. Elle est influencée par les propriétés des plasmons de surface, qui sont des oscillations collectives des électrons à l'interface entre le matériau du capteur et le milieu environnant (Figure (III-5) (a)). La forme D du capteur SPR permet une concentration accrue du champ électrique à la pointe de la structure, ce qui peut entraîner une augmentation significative de la sensibilité du capteur. La pointe de notre structure est recouverte d'argent, qui présente des propriétés plasmonique favorables.

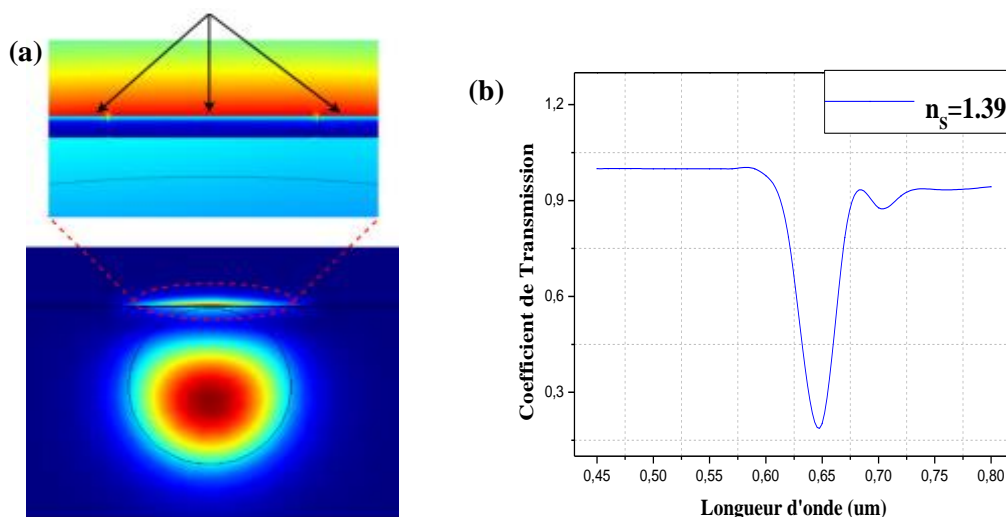


Figure (III-5) :

- (a) Spectre du capteur de fibre SPR proposé IR externe de 1,39.
- (b) Champ électrique du réseau Ag/ α Fe₂O₃ Capteur SPR

La figure (III-5) (b) montre le spectre de transmission du capteur SPR avec une longueur d'onde de 952 nm et un indice de réfraction IR de 1,39. L'intensité du champ électrique a été obtenue avec une couche de 12 nm de α -Fe₂O₃ enduit sur la couche d'argent Ag de 45 nm d'épaisseur. La transmission d'un capteur SPR de forme D fait référence à la quantité de lumière qui est transmise à travers le capteur lorsqu'une onde lumineuse est incidente. Dans le contexte des capteurs SPR, la transmission est généralement mesurée en termes de l'intensité de la lumière transmise à travers le capteur par rapport à l'intensité de la lumière incidente.

Au cours de la résonance plasmonique, les vecteurs d'ondes du plasmon de surface et des ondes électromagnétiques incidentes se sont appariés

III-4-2 L'indice effectif de la gaine :

La longueur d'onde en fonction de l'indice de réfraction IR est présentée sur la (figure (III-6)) à différentes valeurs de w_a d'entrefer et avec une largeur de grille fixe $w_g = 0,5 \mu\text{m}$.

L'indice effectif de la gaine, également connu sous le nom d'indice de réfraction effectif de la gaine, est un concept utilisé en optique pour décrire le comportement de la lumière se propageant dans une fibre optique à sa périphérie.

L'augmentation de l'indice IR a entraîné une augmentation non linéaire de la longueur d'onde de résonance de chaque entrefer. Ceci peut être expliqué par les valeurs de la sensibilité obtenue cette dernière est définie comme le rapport entre la variation du paramètre caractérisant la résonance des plasmons, ici la longueur d'onde pour laquelle la transmission à travers la fibre est minimale et la grandeur à mesurer qui sera dans ce cas l'indice de réfraction n .

L'indice de réfraction sera donné en RIU pour « Réfractive Index Unit ». La sensibilité du

Capteur sera égale aux valeurs de S (nm /RIU) dont l'équation est la suivante :

$$S_\gamma = \frac{\Delta\gamma_{res}}{\Delta n} \quad (nm/RIU)$$

Avec :

$\Delta\gamma_{res}$: la variation de l'onde de résonance

Δn : la variation de l'onde de réfraction

Les valeurs de la sensibilité du capteur SPR obtenues sont respectivement 4,6,4,4, 4,2 et 4,0 $\mu\text{m}/\text{RIU}$ pour des valeurs de w_a valant 10, 30, 50 et ce qui montre une réduction mineure de S avec des largeurs d'écart accrues.

A noter que les capteurs SPR sont connus pour leur grande sensibilité, ce qui leur permet de détecter de faibles variations d'indice de réfraction à la surface du capteur.

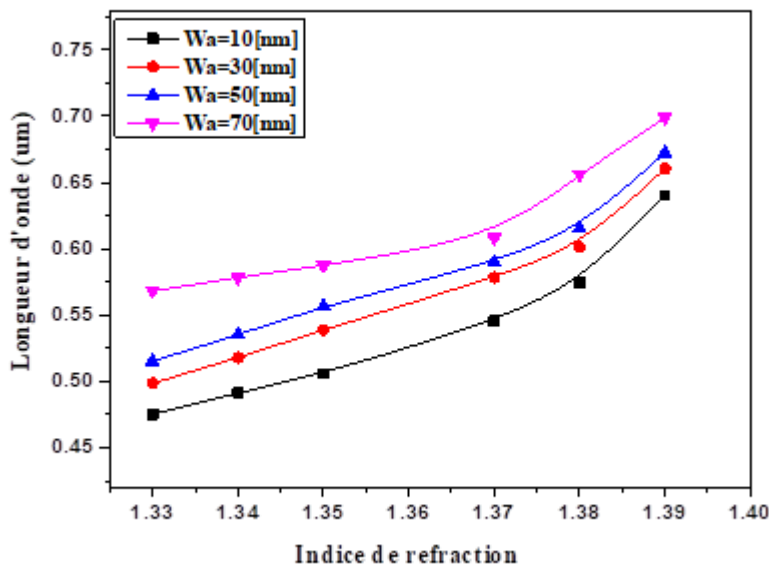


Figure (III-6) : Relation entre l'IR externe et la longueur d'onde à différentes largeurs d'intervalle d'air (w_a)

III-4-3 La transmission

La transmission de la lumière à travers un capteur SPR de forme D peut fournir des informations sur les changements d'indice de réfraction à la surface du capteur, elle est donnée par la relation suivante :

$$T = \exp\left(-\frac{4\pi}{\gamma_0} \text{imag}(n_{eff})L\right)$$

III-4-3-1 Influence nombre de réseaux d'argent (N) sur la transmission

La Figure (III-7) représente le coefficient de transmission en fonction de la longueur d'onde γ en faisant varier N qui est le nombre des grilles d'argent à IR=1.39.

Le nombre de réseaux d'argent (N) dans un capteur SPR peut avoir une influence significative sur la transmission de la lumière à travers le capteur. Voici quelques aspects à prendre en compte :

- Effet de couplage : Lorsque N augmente, les réseaux d'argent se rapprochent davantage les uns des autres.
- Cela peut entraîner un couplage plasmonique entre les réseaux, ce qui modifie les propriétés optiques du système. Le couplage plasmonique peut entraîner des résonances supplémentaires dans le spectre de transmission, ce qui peut affecter la quantité de lumière transmise

→ Largeur et profondeur des creux : Le nombre de réseaux d'argent peut influencer la largeur et la profondeur des creux présents dans la structure. Ces creux peuvent agir comme des cavités résonantes, ce qui peut entraîner des modifications du spectre de transmission. La présence de multiples creux dus à un grand nombre de réseaux peut conduire à des interférences constructives ou destructives qui affectent la transmission

Dans notre figure (III-7), nous avons pu remarquer aussi que la longueur d'onde de résonance est affectée par le nombre de grilles quand celui-ci vaut 5 et 10, au-delà de cette valeur aucun décalage n'est perçu pour la longueur d'onde de résonance. Ainsi, le nombre de grilles A_g a été fixé à 20

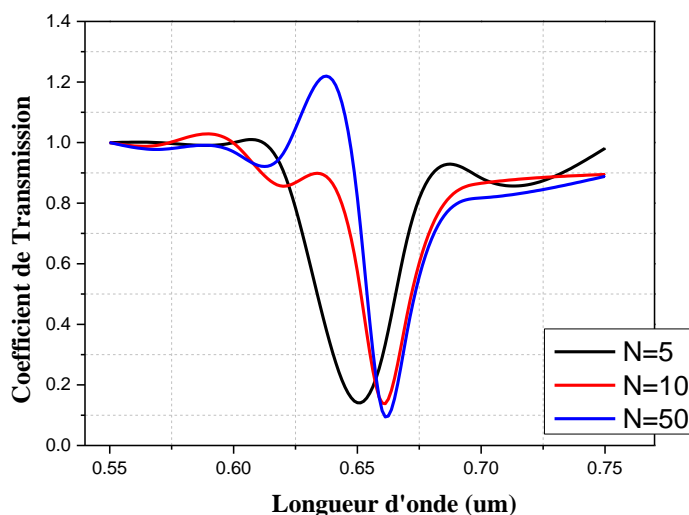


Figure (III-7) : Spectres du capteur SPR à différents nombres de réseaux d'argent (N) ; IR externe = 1,39

III-4-3-2 Influence du revêtement résiduelle d sur la transmission

Le revêtement résiduel (épaisseur d) dans un capteur SPR de forme D peut avoir une influence sur la transmission de la lumière à travers le capteur, il peut modifier la distance entre la pointe du capteur SPR et l'échantillon ou le milieu environnant. Cette distance peut affecter l'interaction entre la lumière et les plasmons de surface, ce qui à son tour peut modifier la transmission. Une épaisseur de revêtement adéquate peut optimiser l'efficacité du couplage entre la lumière et les plasmons de surface, maximisant ainsi la transmission.

La Figure (III-8) représente le coefficient de transmission en fonction de la longueur d'onde λ en faisant varier d qui est la distance entre le cœur et l'analyte à $IR=1.39$. Comme montrée sur la figure (III-8), la variation de d entraîne une profonde et large courbe SPR pour une longueur d'onde presque inchangée. La largeur à mi-hauteur des différentes courbes varie en fonction de d , elle est plus accentuée pour d plus grand, cependant, S augmente mais faiblement.

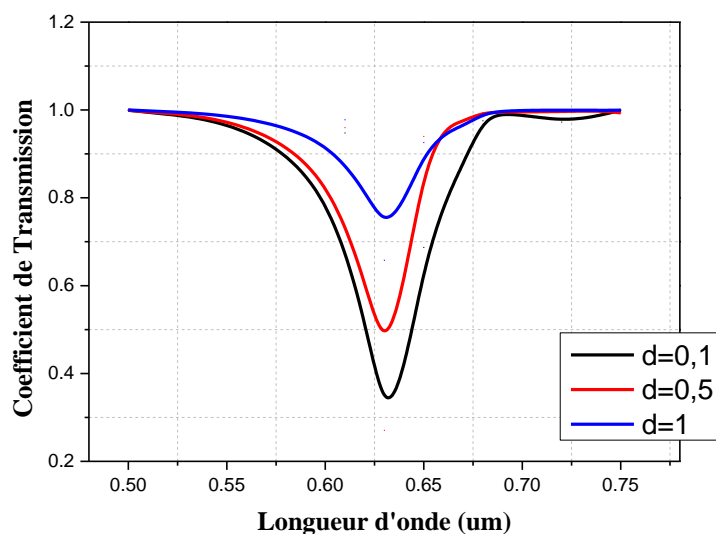


Figure (III-8) : Spectres du PSR proposé à différentes quantités de revêtement résiduel (d)

III-4-3-3 Influence de l'épaisseur spécifique de l'or et de l'argent sur la transmission

La figure (III-9) (a) montre la relation entre la longueur d'onde à $IR = 1,39$ et les spectres de transmission en termes variant l'épaisseur des grilles Ag. L'épaisseur réduite des grilles Ag a produit une baisse remarquable des courbes SPR avec une profondeur remarquable augmentant ainsi S . la même observation peut être faite pour la couche d'or où la croissance de son l'épaisseur augmente S .

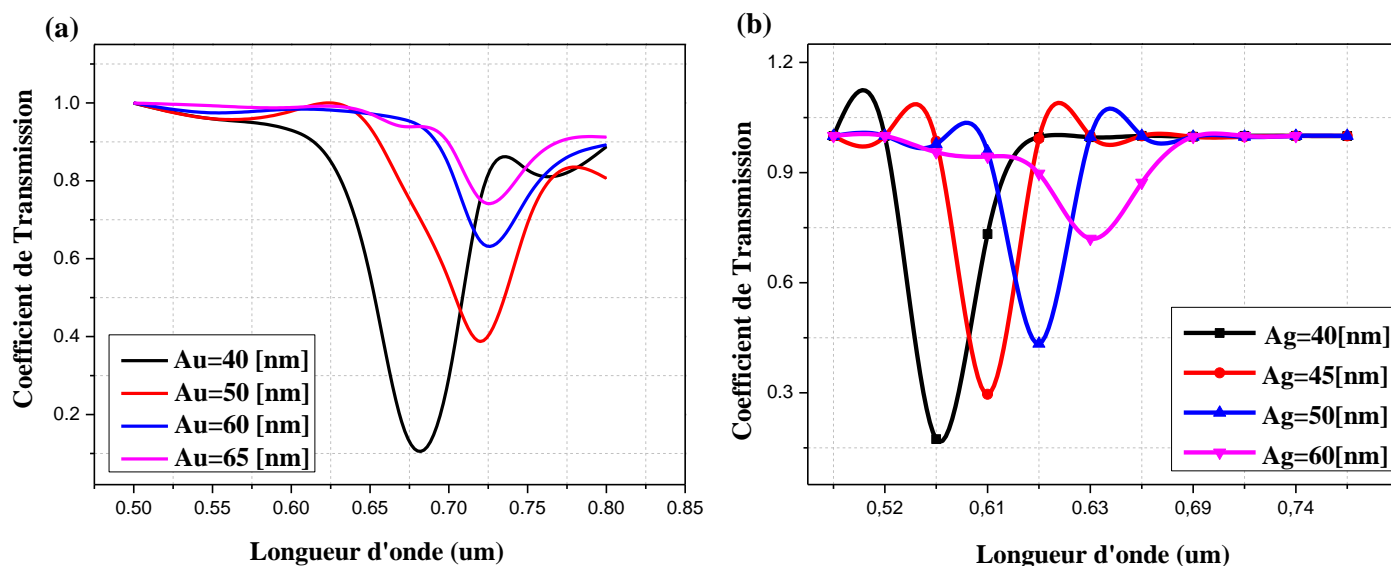


Figure (III-9) : (a) Relation entre les spectres de transmission et longueur d’onde à IR = 1,39 et épaisseurs spécifiques de l’Au.

(b) Relation entre les spectres de transmission et la longueur d’onde à RI = 1,39 et épaisseurs spécifiques des couches Ag

III-4-3-4 Influence des indices de réfraction sur la transmission

La Figure (III-10) représente le coefficient de transmission en fonction de la longueur d’onde λ en faisant varier n_s pour $N=20$, $w_a=10\text{nm}$ et $Ag=45\text{nm}$. Pour ces valeurs, la sensibilité du capteur atteint une valeur de $4,6 \mu\text{m}/\text{RIU}$. Le maximum de transmission augmente de manière inverse avec n_s .

L’épaisseur spécifique de l’or et de l’argent dans un capteur SPR peut avoir une influence sur la transmission de la lumière à travers le capteur. Ces deux facteurs peuvent influencer la transmission comme suit :

- L’épaisseur de l’or et de l’argent peut affecter la quantité de lumière transmise car la transmission de la lumière à travers les métaux dépend de l’interaction de la lumière avec les plasmons de surface qui se propagent le long de l’interface métal-environnement. Pour des épaisseurs spécifiques, différentes longueurs d’onde de lumière peuvent être favorisées ou atténuées par l’excitation des plasmons de surface. Ainsi, l’épaisseur des couches métalliques peut être ajustée pour maximiser la transmission à une longueur d’onde spécifique ou pour obtenir des caractéristiques spectrales particulières.

- En plus, l'or et l'argent ont des propriétés optiques différentes en termes d'indice de réfraction et d'absorption de la lumière. Ces propriétés varient en fonction de la longueur d'onde de la lumière. En modifiant l'épaisseur des couches d'or et d'argent, il est possible de modifier les propriétés optiques du matériau, ce qui peut à son tour influencer la transmission de la lumière.

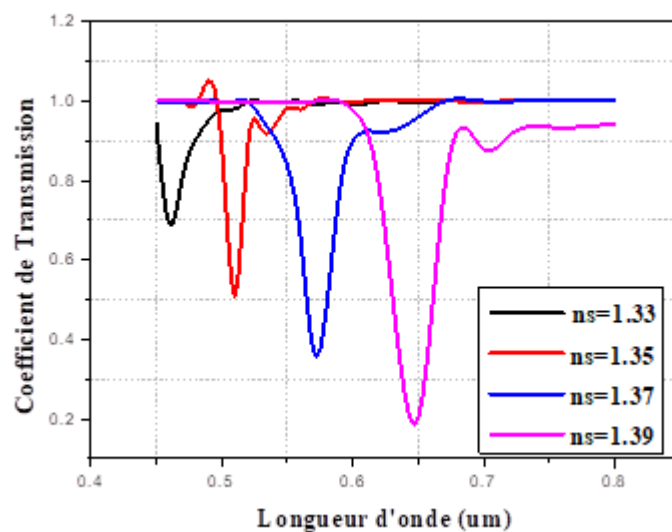


Figure (III-10) : Spectres du capteur de fibre SPR proposé avec des IR externes, 20 grilles argentées, 10 nm de largeur entre grilles et épaisseur d'argent de 45 nm.

III-4-3-5 Influence de l'épaisseur de l'hématite sur la transmission

La Figure (III-11) représente le coefficient de transmission en fonction de la longueur d'onde λ en faisant varier l'épaisseur de l'Hématite ($n_s=1.39$, $w_a=0.5\mu m$ et $w_a=10nm$). En faisant varier l'épaisseur de l'Hématite, les spectres SPR sont devenus plus approfondis.

L'épaisseur de l'hématite peut affecter la position de la résonance SPR. La résonance SPR se produit lorsque les plasmons de surface sont excités à l'interface entre le métal et l'hématite. L'épaisseur de l'hématite peut modifier les conditions de résonance, déplaçant ainsi la longueur d'onde à laquelle la transmission est maximale. Il est possible d'optimiser l'épaisseur de l'hématite pour obtenir une résonance SPR spécifique et une transmission maximale à une longueur d'onde donnée.

L'épaisseur de la couche de Fe_2O_3 a été modifiée de 0 nm à 12 nm pour déterminer son épaisseur optimale et améliorer la sensibilité S du capteur SPR. Cette dernière vaut $5\mu m/RIU$ pour une épaisseur de l'Hématite de 12nm.

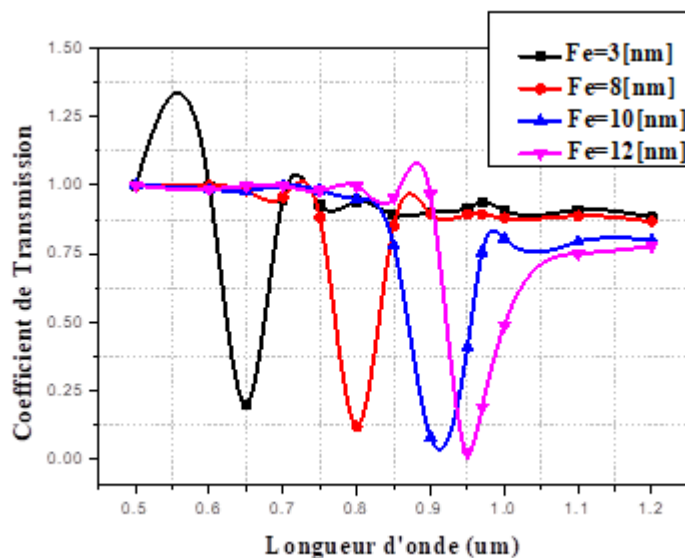


Figure (III-11) : (a) Spectres du capteur SPR proposé pour des épaisseurs de l’hématite à une IR externe de 1,39.

Les spectres SPR du capteur pour N=20, l’écart entre les grilles = 10 nm, l’épaisseur de la couche Ag = 45 nm, et l’épaisseur α F e2O3 =12 nm

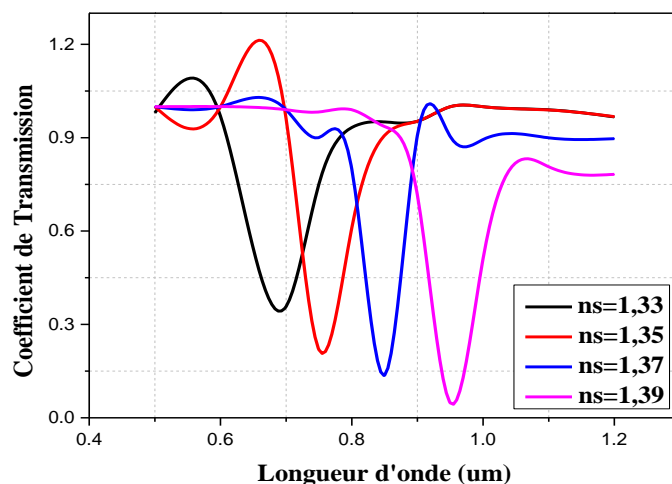


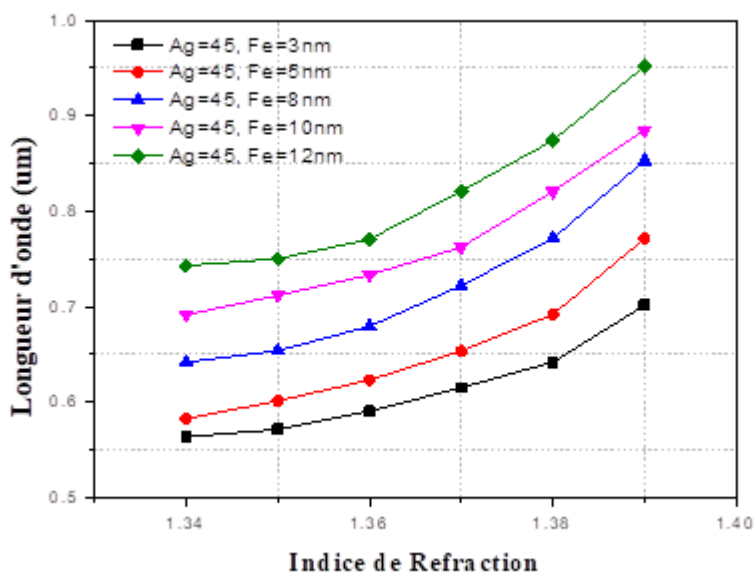
Figure (III-12) : Spectres du capteur SPR proposé avec des IR externes et (45+12) nm d’épaisseur Grille Ag/ α F e2O3

III-4-4 La résonance

Les figures III-13 (a) et (b) présentent les longueurs d’ondes de résonance en fonction de l’indice de réfraction pour des valeurs différentes de l’Hématite allant de 3nm jusqu’à 12nm pour une épaisseur fixe de l’argent et de l’or valant 45nm. La résonance d’un capteur SPR de forme D se produit lorsque les plasmons de surface sont excités à l’interface entre le métal et le milieu

environnant. Sur nos figures (III-13), nous avons remarqué que la longueur d'onde de résonance décale vers les valeurs hautes proportionnellement avec RI. La sensibilité S obtenue pour ces valeurs est : de 2,2, 2,6, 1,8, 2,1, 2,0 et 2,4 m/RIU

(a)



(b)

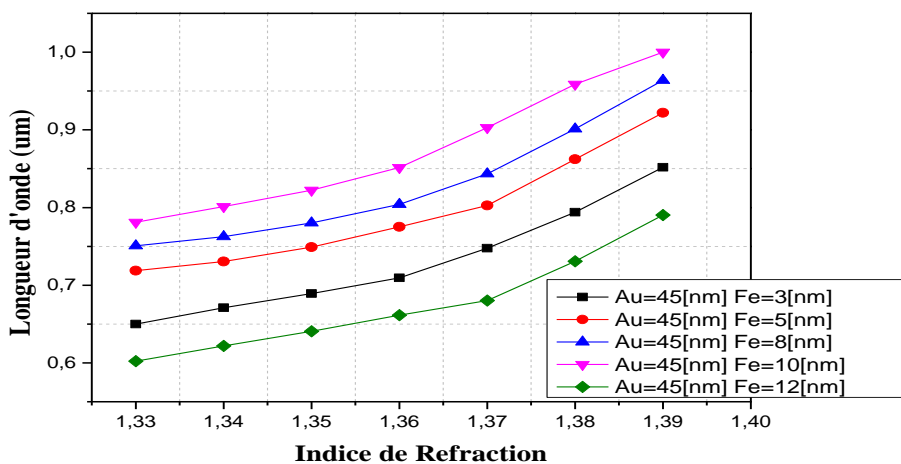


Figure (III-13) : Relation entre les différents IR externes et longueur d'onde résonante (a) Ag. (b)

Au.

III-5 Sensibilité

La sensibilité d'un capteur SPR de forme D fait référence à sa capacité à détecter de faibles variations d'indice de réfraction à proximité de la surface du capteur. Elle peut être influencée par plusieurs facteurs :

- La géométrie du capteur : La forme D spécifique du capteur peut avoir un impact sur la sensibilité. Par exemple, une pointe dans la structure peut permettre une concentration plus élevée des plasmons de surface et une interaction plus étroite avec l'environnement, ce qui peut augmenter la sensibilité du capteur
- Le choix du matériau utilisé dans le capteur SPR forme D peut également affecter la sensibilité.
- L'épaisseur de la couche métallique dans le capteur SPR peut également avoir un impact sur la sensibilité. Une épaisseur optimisée peut permettre une interaction plus efficace entre la lumière et les plasmons de surface, ce qui améliore la sensibilité du capteur.

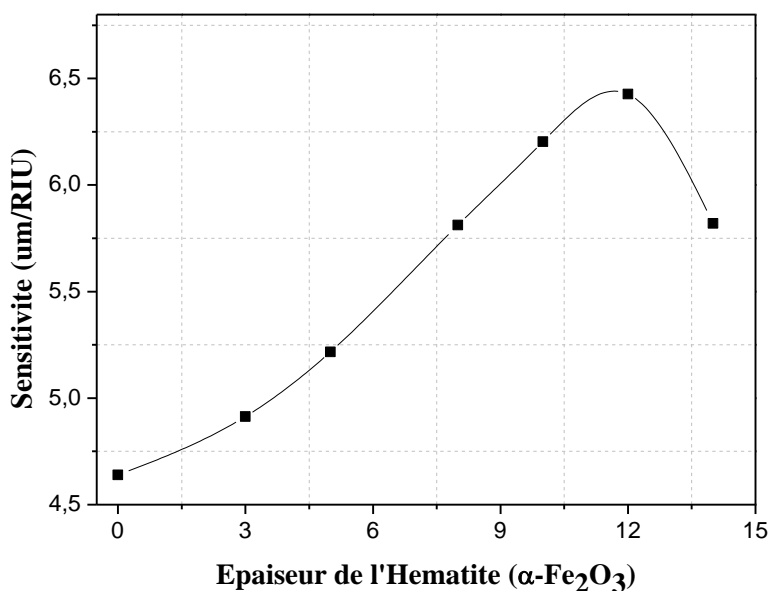



Figure (III-14) : illustre la sensibilité en fonction de l'épaisseur de l'hématite. Elle présente une forme presque gaussienne avec une largeur à mi-hauteur moyenne.

III-6 CONCLUSION

En conclusion, le capteur SPR de forme D est un dispositif utilisé pour détecter les interactions biomoléculaires et les changements d'indice de réfraction à proximité de sa surface. La géométrie spécifique de forme D, telle qu'une pointe ou une concentration de matériau métallique, peut influencer les propriétés optiques et la sensibilité du capteur. L'épaisseur des couches métalliques, ainsi que les propriétés optiques des matériaux utilisés, jouent également un rôle dans la transmission de la lumière et la résonance SPR.



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le capteur SPR (Surface Plasmon Résonance) de forme D est un dispositif utilisé pour détecter les interactions biomoléculaires et les changements d'indice de réfraction à proximité de sa surface. La géométrie spécifique de forme D, telle qu'une pointe ou une concentration de matériau métallique, peut influencer les propriétés optiques et la sensibilité du capteur. L'épaisseur des couches métalliques, ainsi que les propriétés optiques des matériaux utilisés, jouent également un rôle dans la transmission de la lumière et la résonance SPR.

La sensibilité du capteur SPR forme D dépend de facteurs tels que la géométrie du capteur, l'épaisseur des couches métalliques, l'angle d'incidence et les propriétés optiques de l'environnement. En ajustant ces paramètres de manière appropriée, il est possible d'optimiser la sensibilité du capteur pour détecter de faibles variations d'indice de réfraction et réaliser des mesures précises.

Cependant, il est important de noter que l'optimisation de la sensibilité du capteur SPR forme D est un processus complexe qui nécessite souvent des études expérimentales ou des simulations numériques spécifiques. En comprenant les principes fondamentaux de la résonance SPR, des interférences et des interactions lumière-matière, il est possible de concevoir et d'optimiser des capteurs SPR forme D adaptés à des applications spécifiques telles que la détection biomoléculaire, l'analyse de l'environnement ou d'autres domaines de recherche scientifique et technologique.



REFERENCES

REFERENCES

- [1] -MOKHBI Wahiba. ETUDE DES PLASMONS DE SURFACE DANS UNE FIBRE OPTIQUE ATTAQUEE CHIMIQUEMENT. UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF (ALGERIE).
- [2] - Marine BOULADE¹, Julien MOREAU², Thierry LIVACHE¹ ¹ CEA, CNRS, Univ. Grenoble Alpes, INAC-SPRAM, 38000 Grenoble, France ² Laboratoire Charles Fabry, [1] J.
- [3]. Gandhi, M. 2019. Recent advances in plasmonic sensor-based fiber optic probes for biological applications. *Applied Sciences*, 9(5): 949
- [4] R. Slavík, J. Homola, and J. Ctyroky, "Single-mode optical fiber surface plasmon resonance sensor," *Sens. Actuators B*, vol. 54, pp. 74–79, 1999.
- [5] Flavien Pillet « développement d'un outil d'analyse d'interactions moléculaires basé sur la résonance plasmonique de surface (SPRi) » thèse de doctorat, 15/12/2010, l'université de Toulouse.
- [6] Flaien Pillet « Développement d'un outil d'analyse d'interactions moléculaires basé sur la Résonance plasmonique de surface (SPRi) » thèse de doctorat, 15 décembre 2010, INSA Toulouse
- [7] Jiří Homola and Marek Piliarik. Surface plasmon resonance (spr) sensors. In *Surface plasmon resonance based sensors*, pages 45–67. Springer, 2006.
- [8] RC Jorgenson and SS Yee. A fiber-optic chemical sensor based on surface plasmon resonance. *Sensors and Actuators B : Chemical*, 12(3) :213–220, 1993.
- [9] : Karla Balaa « Capteur à fibre optique basé sur le principe de Résonance de Plasmons de Surface : optimisation pour la détection d'espèces chimiques » thèse de doctorat, 16 février 2007, Université de Nantes
- [10] Hervé Portales « Etude par diffusion Raman de nanoparticules métalliques en matrice diélectrique amorphe » thèse de doctorat, 17 /12/2001, l'université Claude Bernard - Lyon I
- [11] K. Matsubara, S. Kawata, and S. Minami, "Multilayer system for a high-precision surface plasmon resonance sensor," *Optics letters*, vol. 15, pp. 75-77, 1990
- [12] K. Kurihara, H. Ohkawa, Y. Iwasaki, O. Niwa, T. Tobita, and K. Suzuki, "Fiber-optic conical microsensors for surface plasmon resonance using chemically etched single-mode fiber," *Analytica Chimica Acta*, vol. 523, pp. 165–170, 2004

REFERENCES

- [13] Ó. Esteban, M. C. Navarrete, A. González-Cano, and E. Bernabeu, "Simple model of compound waveguide structures used as fiber-optic sensors," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 33, pp. 219–230, 2000.
- [14] W. B. Lin, N. Jaffrezic-Renault, A. Gagnaire, and H. Gagnaire, "The effects of polarization of the incident light-modeling and analysis of a SPR multimode optical fiber sensor," *Sens. Actuators A*, vol. 84, pp. 198–204, 2000.
- [15] Yoann Jestin « verres fluorés à base de fluoroindate et fluor gallate pour l'amplification optique : fibres à fort ouverture numérique, guides d'onde planaires et spectroscopie des ions de terre rare » thèse de doctorat, 7 novembre 2002, l'université du Maine.
- [16] J. BLANC - T MRIM – MONTAUBAN C06_Fibre_E
- [17] Homola, *Surface plasmon resonance based Sensors*, Springer Séries in Chemical Sensors and biosenseurs, vol. 4 Institut d'Optique Graduate School, Université Paris Saclay, 91227 Palaiseau, France
- [18]: A. K. Sharma and B. D. Gupta, "Fiber optic sensor based on surface plasmon resonance with nanoparticle films," *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Appl.*, vol. 3, pp. 30–37, 2005
- [19]: A. K. Sharma and B. D. Gupta, "Fiber-optic sensor based on surface plasmon resonance with Ag-Au alloy nanoparticle films," *Nanotechnology*, vol. 17, pp. 124–131, 2006. *Applications biomédicales*, Université Claude Bernard Lyon, 2009.
- [20]: D. M. Hernández and J. Villatoro, "High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensor," *Sens. Actuators B*, vol. 115, pp. 227–231, 2006.
- [21]: J. L. U. Unjie, Y. L. I. An, Y. A. H. An, Y. I. L. Iu, and J. I. G. Ao, "D-shaped photonic crystal fiber plasmonic refractive index sensor based on gold grating," *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 19, pp. 5268–5272, 2018.
- [22]: M. Niggemann, A. Katerkamp, M. Pellmann, P. Bolsmann, J. Reinbold, and K. Cammann, "Remote sensing of tetrachloroethene with a micro-fibre optical gas sensor based on surface plasmon resonance spectroscopy," in *Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators, Eurosensors IX*, Stockholm, Sweden, 1995, vol. 2, pp. 797–800.
- [23]: M. Niggemann, A. Katerkamp, M. Pellmann, P. Bolsmann, J. Reinbold, and K. Cammann, "Remote sensing of tetrachloroethene with a micro-fibre optical gas sensor based on

REFERENCES

surface plasmon resonance spectroscopy,” in Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sens. Actuators, Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, 1995, vol. 2, pp. 797–800.

[24]: J. Homola and R. Slavik, “Fibre-optic sensor based on surface plasmon resonance,” *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 480–482, 1996

[25]: A. Abdelghani, J. M. Chovelon, J. M. Krafft, N. Jaffrezic-Renault, A. Trouillet, C. Veillas, C. Ronot-Trioli, and H. Gagnaire, “Study of self-assembled monolayers of n-alkanethiol on a surface plasmon resonance fibre optic sensor,” *Thin Solid Films*, vol. 284–285, pp. 157–161, 1996

[26]: A. Abdelghani, J. M. Chovelon, N. Jaffrezic-Renault, C. Ronot-Trioli, C. Veillas, and H. Gagnaire, “Surface plasmon resonance fibre-optic sensor for gas detection,” *Sens. Actuators B*, vol. 39, pp. 407–410, 1997

[27]: R. Slavík, J. Homola, and J. Ctyroký, “Single-mode optical fiber surface plasmon resonance sensor,” *Sens. Actuators B*, vol. 54, pp. 74–79, 1999

[28]: Ó. Esteban, M. C. Navarrete, A. González-Cano, and E. Bernabeu, “Simple model of compound waveguide structures used as fiber-optic sensors,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 33, pp. 219–230, 2000.

[29]: W. B. Lin, N. Jaffrezic-Renault, A. Gagnaire, and H. Gagnaire, “The effects of polarization of the incident light-modeling and analysis of a SPR multimode optical fiber sensor,” *Sens. Actuators A*, vol. 84, pp. 198–204, 2000

[30]: J. Homola and R. Slavik, “Fibre-optic sensor based on surface plasmon resonance,” *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 480–482, 1996



ANNEXE

ANNEXE A

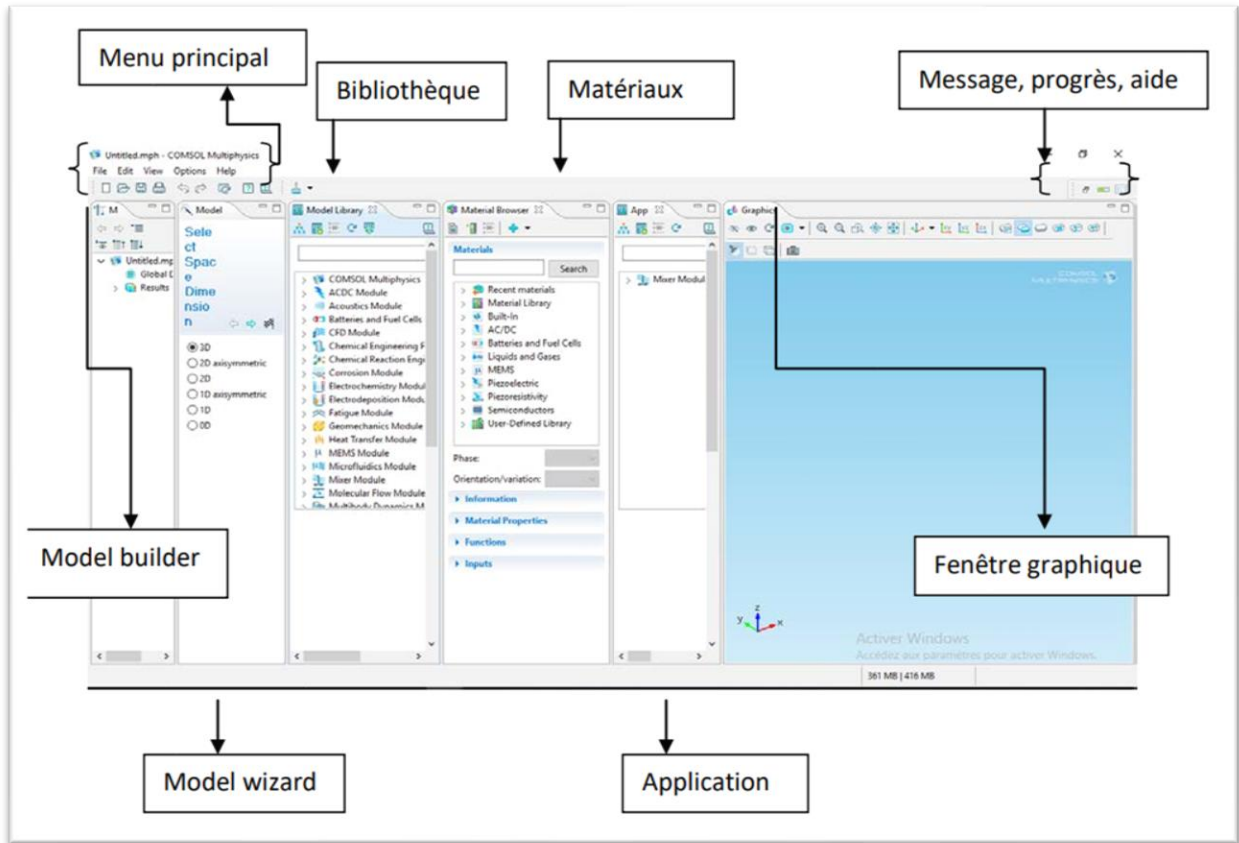
Présentation de l'outil de simulation COMSOL Multiphasiques

COMSOL (Multiphysics) est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques. Développé en 2005, Comsol est un outil de simulation complet qui couvre toutes les étapes depuis la définition de la géométrie jusqu'au post-traitement en passant par le maillage et le solveur

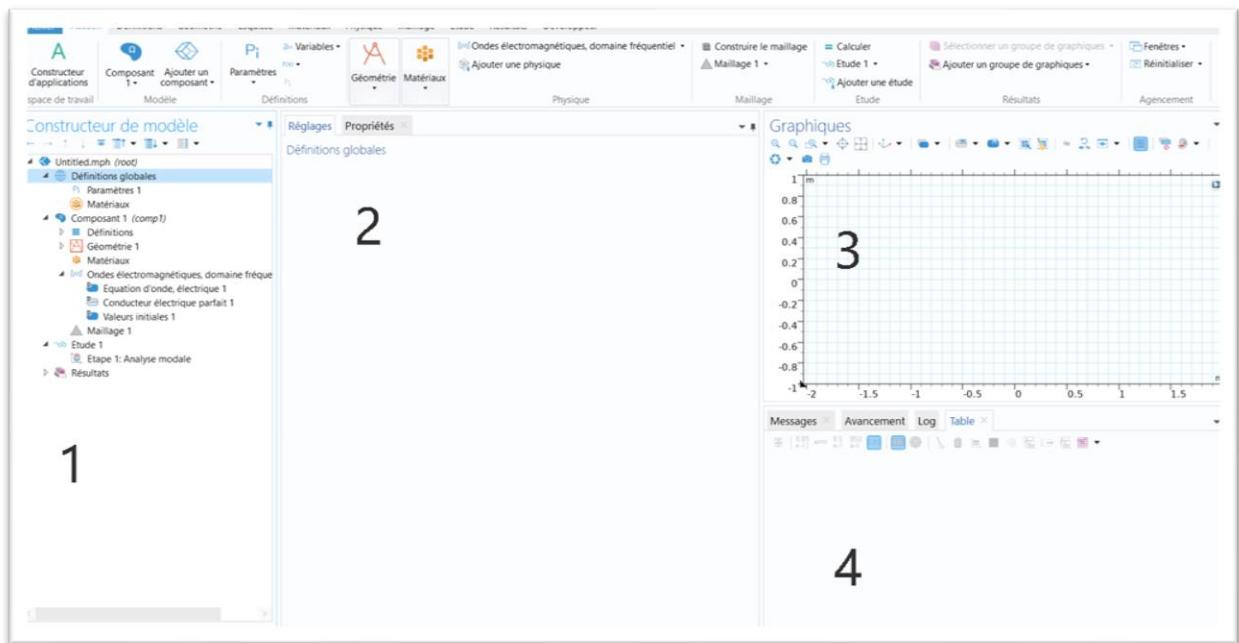


Méthodologie de conception et modélisation sous COMSOL

La version utilisée pour réaliser ma simulation est la version 6.0. Chaque physique est représentée par un module et chaque module peut interagir avec les autres modules. La fenêtre du logiciel est constituée de quatre parties comme l'indique par la capture d'écran suivante



L'interface de COMSOL



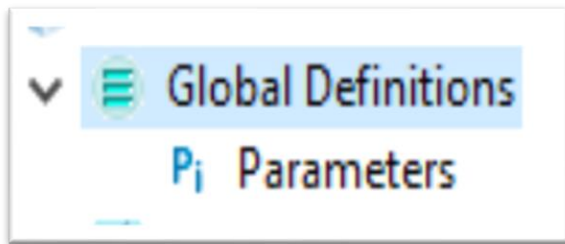
Découpage de la fenêtre de travail de COMSOL

ANNEXE

Constructeur de modèle La première partie concerne l'organisation de simulations, où Éléments de cette simulation (composants utilisés, matériaux, éléments techniques, études, valeurs et résultats obtenus, etc.).

- ❖ La deuxième partie est l'interface qui permet Saisie de données pour la simulation (taille du corps, paramètres spécifiques Caractéristiques des matériaux, équations, etc.)
- ❖ La troisième partie est l'interface graphique sur laquelle apparaît la géométrie dessinée, le maillage choisi, les courbes obtenues, ...
- ❖ La Partie IV se réjouit de l'indicateur d'événement, qui montre les pourcentages et les valeurs qui font des progrès remarquables pour simulation, erreurs ou avertissements.

« Définitions globales », on sélectionne « Paramètres » :



Fenêtre de définitions générale

Les paramètres sont utiles dans le contexte suivant :

- (Détermination des dimensions et de la forme géométriques et Taux requis et données et d'informations appropriées

Cette fenêtre permet de tracer la structure étudiée en se basant sur ses dimensions

Cette étape consiste à cloner le composant réel, pour effectuer cette étape

Cliquez sur la fenêtre d'ingénierie. Le logiciel propose une grande quantité de formes différentes pour la 2D (carres, cercles, triangles, etc.). Chaque forme a trois Dimensions (longueur, largeur et hauteur) en trois axes (x, y, z)

Une étude complète utilisant COMSOL est effectuée en 7 étapes consécutives, et nous Progression de ces différentes étapes :

- **1 ère étape** : Définition de l'étude
- -Le modèle d'étude repose sur quatre phases:

ANNEXE

Dimensions spatiales, physique utilisée, études et définitions globales (paramètres) fonctions générales, variables et globales).

- -sélectionner la dimension d'espace :

La dimension est sélectionnée lorsque le programme démarre, à partir d'Un modèle où vous choisissez la section " model wizard " qui vous permet de choisir une dimension

Mdel espace. Dans notre cas, nous avons choisi un environnement 2D

(2D).

Choix de la dimension.

- -sélectionner la physique :

Après avoir choisi la dimension spatiale, on passe à la physique qui sera utilisée Selon la simulation, nous ferons. Le formulaire est sélectionné dans la liste qui apparaît dans la figure suivante Le bon modèle est choisi pour introduire les bonnes équations Simulation

Fenêtre des modèles physiques

- Sélection de l'étude :

Cette liste nous permet de choisir le type d'étude dans le champ approprié Identifier la physique utilisée. Pour cette étude

Saisie des données Dans le domaine des définitions globales, on introduit toutes les constantes et toutes les expressions que l'on utilise dans la simulation.

- 2 -ème étape : Réalisation de la géométrie :

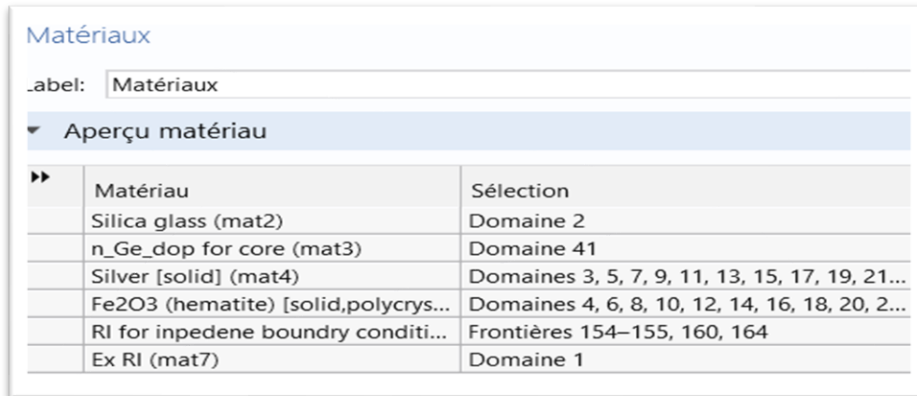
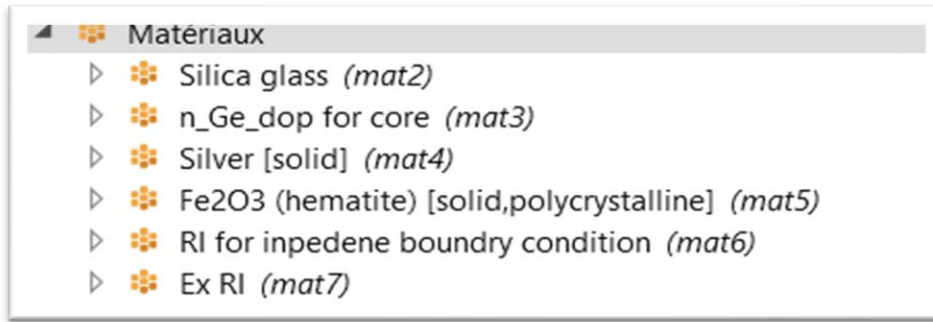
. La fenêtre « Définitions globales » :

En cliquant sur :

- 3 -ème étape : Choix des matériaux :

Il existe au sein du logiciel COMSOL une large bibliothèque de matériaux. Selon les physiques choisies et les caractéristiques nécessaires au calcul de la simulation

Cette liste nous permet de sélectionner le matériel requis et de le sélectionner sur zones de structure. D'autres matériaux que nous choisissons peuvent être ajoutés.



Fenêtre de type matériaux

- 4 -ème étape : les caractéristiques associées à la modèle physique choisie :

Il s'agit de définir, dans cette étape, l'ensemble des propriétés physiques agissant sur notre structure

Vous devriez donc vérifier les équations par défaut si elles conviennent à notre application

Et fournir des valeurs bien connues pour certaines variables du système.

- 5 -ème étape : La fenêtre « Maillage » :

Avant de démarrer le compte, vous devez sélectionner le réseau. C'est une étape. Cliquez avec le bouton droit de la souris pour ajouter une fonction ou Créez un réseau d'éléments que vous avez utilisés pour créer le réseau

Important parce que nous pouvons obtenir des résultats plus précis. Le programme contient

Différentes formes de maille selon la forme du squelette

- 6 -ème étape : La fenêtre « étude » :

ANNEXE

Une fois que vous avez mis toutes les étapes ci-dessus, vous pouvez aller à Le compte de simulation affiche la fonction « Calcul » et Le logiciel recueille toutes les données, et enfin nous donne tous Résultats obtenus pendant la simulation



- 7ème étape : Exploitation des résultats :

Sous ce menu, on trouve les résultats de simulation et Une fois le calcul terminé, il est possible de réaliser une grande quantité d'opérations sur les résultats

Résumé :

Ce travail a proposé la simulation d'un capteur de fibre optique à résonance plasmonique de surface (SPR) très sensible équipé d'une couche d'hématite (α Fe₂O₃) recouverte de caillebotis argentés sur la surface d'une fibre optique en forme de D. Le film nano matériel α Fe₂O₃ a été utilisé comme couche de détection. Les électrons libres à la surface du métal ont été stimulés par des ondes évanescentes à la surface de la fibre pour générer des ondes de plasmons de surface. Les pics d'absorption de résonance ont été surveillés pour déterminer les changements de l'indice de réfraction (IR). Le capteur de fibres SPR a été optimisé en utilisant la méthode des éléments finis pour analyser les paramètres structurels de la fibre optique en forme de D et des réseaux d'argent. Cette méthode a également été appliquée pour examiner l'effet de l'épaisseur de la couche hématite sur la sensibilité du capteur (S). Les grilles argentées recouvertes d'hématite ont considérablement amélioré le capteur, comme l'ont révélé les résultats de la simulation. Dans ce travail, la réponse S maximale du capteur peut atteindre 6,4 $\mu\text{m}/\text{RIU}$ lorsque l'IR externe a été changé de 1,33 à 1,39 avec un réseau argenté de 45 nm d'épaisseur, des espaces d'air de 50 nm de largeur et une hématite de 12 nm d'épaisseur (α Fe₂O₃). Les résultats suggèrent le potentiel élevé des nanomatériaux α Fe₂O₃ dans les applications de détection de fibres optiques.

الملخص

اقترح هذا العمل محاكاة مستشعر ألياف بصرية للرنين البلازموني (SPR) شديد الحساسية على السطح مزود بطبقة من الهيماتيت (α Fe₂O₃) مغطاة ببشور فضي على السطح بألياف بصرية على شكل D. تم استخدام α Fe₂O₃ المواد النانوية كطبقة كشف. تم تحفيز الإلكترونات الحرة على سطح المعدن بواسطة الموجات المتلاشية على سطح الألياف لتوليد موجات بلازمون سطحية. تمت مراقبة قمم امتصاص الرنين لتحديد التغيرات في معامل الانكسار (RI). تم تحسين مستشعر ألياف SPR باستخدام طريقة العناصر المحدودة لتحليل المعلمات الهيكلية لشبكات الألياف البصرية والفضية على شكل D. تم تطبيق هذه الطريقة أيضًا لفحص تأثير سمك طبقة الهيماتيت على حساسية المستشعر (S). أدت الشبكات الفضية المغطاة بالهيماتيت إلى تحسين جهاز الاستشعار بشكل كبير، كما كشفت نتائج المحاكاة. في هذا العمل، يمكن أن يصل الحد الأقصى لاستجابة المستشعر S إلى 6.4 $\mu\text{m}/\text{RIU}$ عندما يتم تغيير IR الخارجي من 1.33 إلى 1.39 مع شبكة فضية بسمك 45 نانومتر ومساحات هوائية بعرض 50 نانومتر و12 نانومتر سمك الهيماتيت (α Fe₂O₃). تشير النتائج إلى إمكانات العالية α Fe₂O₃ المواد النانوية في تطبيقات الكشف عن الألياف الضوئية.