

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
Département d'Électronique**



MEMOIRE
Présentée pour obtenir le diplôme de Mater 2
en Électronique



OPTION
Instrumentation et Maintenance Industrielle

THÈME

***Étude et simulation des paramètres géométriques d'un
capteur à onde acoustique de surface (SAW) sur
environnement Comsol-Multiphysique***

Proposé et dirigé par :

Dr. GUERMAT Noubel

Présenté par :

BEN GHADA Tareq

PROMOTION JUIN 2016

Remercîment

Mes remerciements, avant tout à الله Tout-puissant de m' avoir donné le courage, la volonté et la patience durant toutes ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade.

*Je remercie sincèrement : **Dr. Guermat. N**, docteur à l'université Mohamed Boudiaf de m'sila Pour ses fructueuses remarques, ses encouragements et sa passion pour la recherche .Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

Pour l'honneur au membre de jury qu'ils m'accordent, en acceptant la participation dans le jugement de notre travail.

Merci également à tous les membres de ma famille, sans leur soutien, la réalisation de ce travail n'aurait pas possible.

Enfin, je tiens à exprimer nos gratitudes à nos enseignants de département d'électronique du l'université de m'sila, mes amis et mes collègues et tous ceux qui contribué de près ou de loin à ce travail.

ben ghada tareq

Dédicaces

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite,
de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses
précieux conseils,
pour toute son assistance et sa présence dans ma vie Mon père,
qui peut être fier et trouver ici le résultat de
longues années de sacrifices et de privations
pour m'aider à avancer dans la vie
À mes très chers frères oussama,
zakaria, , abdarahmen
Mes très chère soeur aya À toute les familles Ben Ghada et Mes
collègues et mes amis*

ben ghada tareq

Sommaire

SOMMAIRE

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I *Généralités sur les capteurs chimiques*

<i>I.1- Introduction</i>	3
<i>I.2- Définition</i>	3
<i>I.2.1- L'élément sensible du capteur</i>	3
a- Les oxydes métalliques	4
b- Les matériaux polymères	4
<i>I.2.2- L'élément physique du capteur chimique (transducteur)</i>	4
a- Transducteur mécanique	5
1. Les transducteurs à ondes acoustiques de surface (SAW)	6
2. Microbalance à quartz QCM (Quartz Crystal Microbalance)	7
b- Transducteur thermique	8
c- Transducteur optique.....	9
d- Capteurs électrochimiques	10
<i>I.3- Caractéristiques métrologiques des capteurs de gaz</i>	11
<i>I.3.1- Sensibilité</i>	11
<i>I.3.2- Sélectivité</i>	11
<i>I.3.3- Réversibilité</i>	11
<i>I.3.4- Stabilité – Fidélité</i>	12
<i>I.3.5- Temps de réponse</i>	12
<i>I.4- Mécanismes d'incorporation d'un gaz dans un solide</i>	12
<i>I.4.a- Adsorption, absorption et désorption</i>	13
<i>I.4.b- Différents phénomènes d'adsorption</i>	14
<i>I.5- Conclusion</i>	15

Chapitre II

Les capteurs à ondes acoustiques de surfaces

<i>II.1- Introduction</i>	16
<i>II.2- Transducteur piézoélectriques</i>	16
II.2.1- Définition de la piézoélectricité	16
II.2.2- Symétrie et piézoélectricité	17
II.2.3- Les matériaux piézoélectriques	17
II.2.4- Equations piézoélectriques	18
II.2.5- Domaines d'application	21
<i>II.3- Equations de propagation dans les solides</i>	21
II.3.1- Description des solides	21
a) déplacement et déformation	21
b) Force et contraintes	22
II.3.1- Equations de propagation dans un milieu piézoélectrique	23
a) Pour un milieu non piézo-électrique	23
b) Pour un milieu piézo-électrique	24
c) Conditions aux limites	24
<i>II.4- Propagation des ondes acoustiques</i>	26
II.4.1- Ondes acoustiques	26
II.4.2- Principe de génération d'ondes acoustiques	28
<i>II.5- Ondes acoustiques de surface SAW</i>	30
II.5.1- Ondes de Rayleigh	30
II.5.2- Ondes de Bleustein-Gulyaev	31
II.5.3- Ondes STW (Surface Transverse Wave)	31
<i>II.6- Capteurs à ondes acoustiques de surface SAW</i>	32
II.6.1- Principe de fonctionnement des (IDT)	32

II.6.2- Principe de détection.....	33
II.6.3- Sensibilité du dispositif à ondes acoustiques.....	34
II.7- Conclusion	35

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1- Introduction	36
III.2- Description du modèle.....	36
III.2.1- Propriétés de matériau.....	37
III.2.2- Etude paramétrique (orientation cristallographique).....	38
III.3.1- Choix de la dimension du modèle	40
III.3.3- Saisie des données.....	42
III.3.4- Dessin de la géométrie.....	42
III.3.5- Propriétés des matériaux	43
III.3.6- Propriétés physique des domaines	44
III.3.7- Maillage.....	46
III.4- Résolution du problème	46
III.4.1- Etude de l'effet de l'épaisseur de l'interdigité sur la réponse du capteur.....	47
III.4.2- Etude de l'effet de la largeur de l'interdigité sur la réponse du capteur.....	51
III.5- Conclusion	55
Conclusion générale	57
Bibliographies	58
Liste des figures	61
Résumé	

Introduction Générale

Introduction générale

La demande de la détection d'espèces chimiques et de la mesure de leur concentration a considérablement augmenté. Cet intérêt est essentiellement dû aux considérations environnementales, de sécurité, de contrôle de procédé ou de diagnostic médical rapide [1]. Ce type de détection, est accompli par les capteurs chimiques de gaz.

Ces capteurs chimiques ou biochimiques, quant à eux, sont généralement des systèmes simples, constitués d'une couche sensible permettant la reconnaissance de l'espèce avec laquelle elle interagit et d'un système transducteur transformant l'interaction chimique en un signal électrique. [2,3]

L'intérêt croissant pour ces capteurs aussi bien dans le domaine de la recherche qu'en industrie provient de plusieurs raisons. Nous pouvons citer entre autres, des coûts de fabrication avantageux favorisés par le développement des technologies de la microélectronique ; ce qui permet de réduire la taille des composants et intégrant les capteurs, son alimentation, l'électronique de traitement et bien d'autres éléments ; on parle alors de nez électroniques intégrés[4, 5].

En conséquence, parmi les capteurs développés à ce jour, on a les capteurs SAW (Surface Acoustic Wave). Ces dispositifs de taille micrométrique associent au sein d'un même substrat, par des technologies de micro fabrication, des éléments mécaniques et électriques.

Le capteur SAW est constitué d'un transducteur interdigité (IDT) gravé sur un substrat piézoélectrique et recouvert d'une couche sensible Poly-Iso-Butylène (PIB). Cette couche sensible est choisie pour ses affinités particulières avec les espèces à détecter CH_2Cl_2 (dichlorométhane, DCM). L'absorption de ces molécules dans la couche sensible crée alors une onde acoustique (amplitude, fréquence).

Les matériaux piézoélectriques le plus utilisé comme substrat sont le quartz, le niobate de lithium et le tantalate de lithium, du fait de leur disponibilité en. En quantité et en qualité. Le type d'onde généré à la surface de ces substrats par ces dispositifs est connu depuis 1885 par les géophysiciens. En effet, à cette époque, Lord Rayleigh, au cours de ses travaux sur les ondes sismiques, démontre l'existence d'une onde se propageant à la surface d'un solide isotrope, cette onde portera son nom [13].

L'objectif de ce travail, est la simulation d'un capteur SAW sous environnement COMSOL multi physiques, et l'étude de l'influence des paramètres du substrat sur la sensibilité à l'effet de masse du capteur.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres et il est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, on effectue une étude des capteurs chimiques de gaz, ou on précise leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous rappelons l'effet piézoélectrique et les différents modes de propagation d'une onde élastique dans un milieu piézoélectrique.

Le second chapitre, sera consacré à l'étude de capteur à onde acoustique de surface SAW et de son principe de fonctionnement. Nous avons aussi donné un petit aperçu sur le principe de génération de cette onde, et des divers modes existants. Enfin nous avons établi le modèle régissant la sensibilité à effet de masse du capteur.

Dans le troisième chapitre nous présentons, en premier temps, l'outil de simulation COMSOL multi physiques, qui est un logiciel de simulation par la méthode des éléments finis. En second temps, nous développons le modèle d'un capteur de gaz à ondes de surface SAW établi sous environnement COMSOL, pour déterminer la réponse du capteur et sa sensibilité l'effet de masse. Afin de déterminer les effets des paramètres d'influence sur la réponse du capteur et de sa sensibilité, nous avons effectué une étude paramétrique en fonction de différents des de substrat piézoélectriques tel que les (LiNbO_3 , quartz, LiTaO_3) et l'orientation de la coupe cristallographique sur la sensibilité du capteur à l'effet de masse. Et enfin, nous terminons par une conclusion.

Chapitre I

*Généralités sur les capteurs
chimiques*

I.1- Introduction

Dans le domaine de la détection de gaz, les capteurs chimiques sont les plus répandus par rapport aux autres capteurs (Electrochimique, Optique, Electro mécanique, Thermique). Cette particularité est due à leur faible consommation énergétique, leur faible coût, et leur temps de réponse relativement court.

Ce chapitre commencera par une généralité sur les capteurs chimiques ainsi que les différentes méthodes de transduction utilisées dans la conception des capteurs chimiques, nous présentons ensuite les différents composants d'un capteur chimique et son principe de fonctionnement. Puis nous décrivons le principe de fonctionnement des capteurs à base des structures interdigités (IDS).

I.2- Définition

Nous avons plusieurs définitions et terminologies concernant le capteur chimique; d'une façon générale, un capteur chimique est un outil analytique qui se situe à l'interface entre la physique, la chimie et la biologie [4].

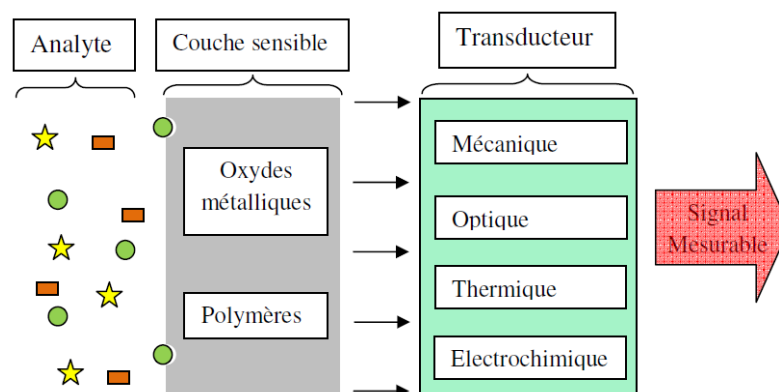


Figure I-1 : Principe de fonctionnement des capteurs chimiques [1].

Un capteur chimique (fig. I-1) est constitué essentiellement de deux composants de base reliés en série : une couche sensible, souvent appelée couche chimio-sensible, et une composante physique qui constitue ce qu'on appelle le transducteur. Le principe de base d'un capteur chimique est de détecter cette reconnaissance moléculaire et le transformer en un autre type de signal (grandeur mesurable) qui est produit par le transducteur.

I.2.1- L'élément sensible du capteur

Le principe de fonctionnement des capteurs chimiques est basé sur le choix de la couche sensible dont dépend le signal émis qui est dû à l'interaction physique et/ou chimique

entre un matériau sensible et l'espèce chimique. Ces matériaux sont choisis pour entrer en réaction spécifique avec une espèce chimique, ainsi on assure une bonne sélection. L'adsorption physico-chimique sur la surface du capteur conduit à la modification d'une grandeur physique qui est le plus souvent la résistivité du matériau et parfois la variation de la masse de l'élément sensible [4]. Selon le matériau utilisé comme matière de base pour la fabrication du capteur chimique, on peut distinguer deux types de capteurs à base des oxydes métalliques ou des polymères.

a- Les oxydes métalliques

Plusieurs capteurs de gaz de l'état solide basé sur les oxydes métalliques à semi-conducteurs ont été rapportés. Les principaux avantages de ces capteurs sont : facile à utiliser, robuste, à faible coût avec la possibilité de contrôler et diriger in-situ. Les oxydes métalliques de formule générale MO (M pour métal et O pour oxygène), tels que WO_3 , Y_2O_3 [4], SnO_2 et ZnO [5] sont des matériaux semi-conducteurs de type n utilisés en tant que couche active de capteurs. Une couche mince d'oxyde sur un substrat va subir une variation de résistivité en présence d'une atmosphère oxydante. Ce type de capteur repose sur la mesure de la fluctuation de la valeur de la résistivité en fonction de la quantité de gaz adsorbable présent.

b- Les matériaux polymères

L'utilisation des matériaux polymères dans le développement des capteurs chimiques prennent une grande importance pour les chercheurs à cause de leurs propriétés électriques et optiques intéressantes. Ces films minces élaborés à base des matériaux polymères sont avantageux parce qu'ils ont [2]:

- ✓ une faible constante diélectrique ;
- ✓ une bonne stabilité thermique ;
- ✓ une bonne adhésion (que ce soit au substrat, au conducteur ou à lui-même) ;
- ✓ une faible absorption d'eau ;
- ✓ être facile à mettre en œuvre.

I.2.2- L'élément physique du capteur chimique (transducteur)

Tous les capteurs chimiques contiennent un transducteur qui transforme la réponse chimique ou biologique en signal utilisable généralement sous forme électrique[3]. Le choix du transducteur dépend également de l'application du capteur et le type de réaction.

La relation qui existe entre la reconnaissance chimique et celle du mode de transduction est représentée dans le tableau I-1.

<i>Effet de la reconnaissance</i>	<i>Mode de transduction</i>	<i>Transducteur</i>
Modification de la concentration	Ampérométrie Potentiométrie	Electrode ampérométriques Electrode potentiométriques
Modification du potentiel redox	Potentiométrie	Electrodes potentiométriques ISFET
Modification de la conductivité	Conductimétrie	Cellule conductimétrique
Chaleur de réaction	Thermométrie	Thermistor, thermocouple
Modification optique	Biocapteurs optiques	Fibre optique Interféromètre
Modification de masse	Biocapteurs Piézoélectriques	Microbalance à quartz Onde acoustique de surface (SAW)

Tableau I-1 : Relation entre reconnaissance biologique et mode de transduction [6].

a- Transducteur mécanique

Les capteurs mécaniques, dits aussi transducteurs mécaniques, mesurent les variations de masse à leurs surfaces. Le principe de ces transducteurs réside dans les propriétés piézoélectriques des matériaux utilisés dont l'effet piézoélectrique direct correspond au phénomène qui a lieu lorsqu'un solide cristallin est soumis à une contrainte mécanique appliquée sur ses faces (la déformation du cristal s'accompagne d'une polarisation électrique dont l'amplitude est proportionnelle à la contrainte appliquée) [6]. À l'inverse, une différence de potentiel, appliquée entre les faces d'un matériau piézoélectrique, fait apparaître des contraintes au sein du matériau qui induit sa déformation: c'est l'effet piézoélectrique inverse [6].

Il existe deux types de transducteurs mécaniques à ondes acoustiques de surface SAW (Surface Acoustic Wave) et à microbalance à quartz QCM (Quartz Crystal Microbalance).

1. Les transducteurs à ondes acoustiques de surface (SAW)

Dans le champ de technologie du bio-récepteur, les capteurs SAW peuvent être utilisés pour déterminer la présence de molécules spécifiques dans l'environnement [12]. Les dispositifs SAW sont fabriqués par la technique de photolithographie semblable à celle utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs.

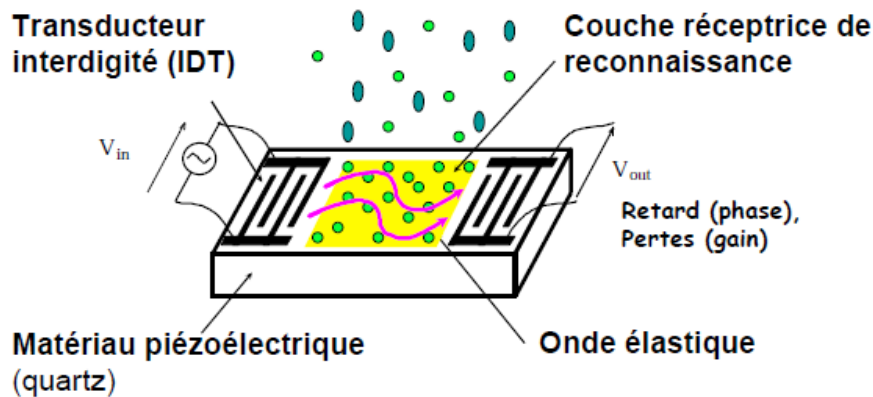


Figure I-2 : Description d'un capteur à onde acoustique de surface (SAW) [8].

Les transducteurs interdigités (IDT) métalliques périodiques, déposés sur les cristaux piézoélectriques uniformément polarisés, agissent en tant qu'entrée ou sortie électrique. L'application d'un signal à l'IDT produit une déformation de la surface du matériau en provoquant ainsi, le lancement d'une SAW qui se propage le long de la surface piézoélectrique avec une vitesse de phase donnée par les propriétés physiques du matériau (fig. I-2). Ces ondes de surface peuvent alors être converties de nouveau à un signal électrique par un IDT de réception. La fréquence du dispositif SAW est donnée par la formule suivante :

$$f = \frac{V_p}{\lambda} \dots\dots\dots (I-1)$$

Où λ : la longueur d'onde (la distance entre les doigts d'IDT) ;

V_p : la vitesse de phase dans le matériau.

• Fabrication de la structure inter-digitée

Les dispositifs inter-digités sont fabriqués par la technique de photolithographie semblable à celle utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs. Les dispositifs IDS sont typiquement produits par une technique appelée ' lift-off ' (fig. I-3). En première étape, le

recouvrement du substrat par une résine. En suite, l'exposition à une lumière (UV) à travers un masque. Les régions irradiées sont enlevées à l'aide d'une solution chimique. Après on procède à une métallisation complète du substrat. La résine restante est dissoute dans une solution chimique laissons le métal sur la surface du substrat.

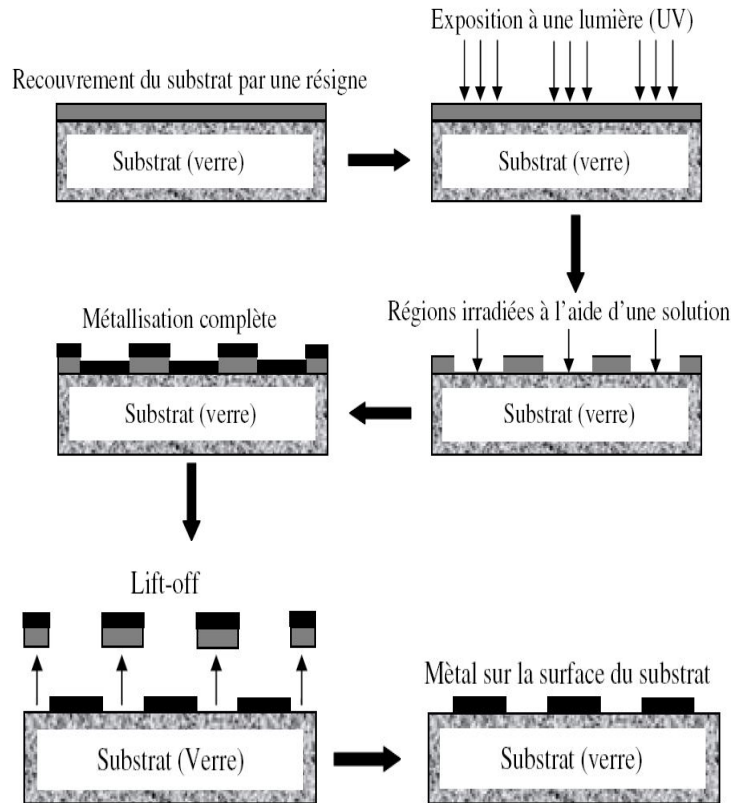


Figure I-3 : Procédé de gravure et développement d'interdigitée [2].

2. Microbalance à quartz QCM (Quartz Crystal Microbalance)

Les systèmes les plus classiques qui utilisent la transduction mécanique sont les microbalances à quartz QCM (Quartz Cristal Microbalance) [9]. Le dispositif est généralement constitué d'un solide piézoélectrique de géométrie simple dont la résonance est excitée par l'application d'une tension alternative. Cette dernière transmise par l'intermédiaire des électrodes métalliques, en or, déposées en couches minces sur le matériau (fig. I-4 et I-5). Ces couches peuvent être adaptées avec des sondes des molécules. La fixation des molécules cibles entraîne une variation de la fréquence de résonance en modifiant la masse présente en surface. Ces systèmes permettent de mesurer les interactions en temps réel, par l'intermédiaire de la variation de leur fréquence de résonance selon la loi de Sauerbrey [10]:

$$\Delta f = \frac{-2f^2}{A\rho c} \Delta m \dots\dots\dots (I-2)$$

Où ρ : la masse volumique du quartz qui est égale 2650 kg.m^{-3} ;
 c : la célérité d'une onde acoustique dans la coupe du quartz ;
 A : l'aire du recouvrement des électrodes ;
 Δm : La masse ajoutée sur l'électrode.

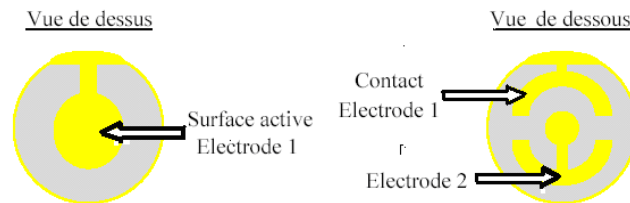


Figure I-4 : Descriptions du cristal à quartz.

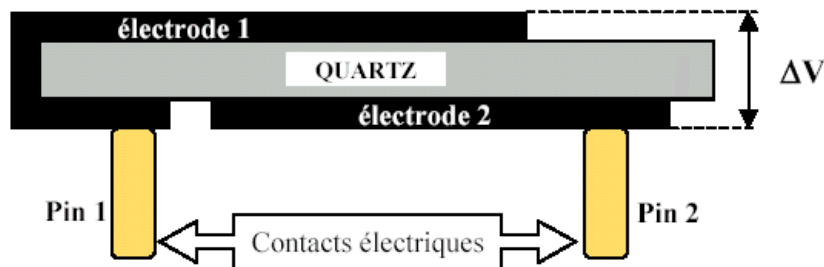


Figure I-5 : Vue d'une coupe transversale d'un quartz [8].

b- Transducteur thermique

Les capteurs thermométriques appelés aussi capteurs enthalpimétriques sont destinés à déterminer la concentration d'un substrat par la variation d'enthalpie associée à la réaction enzymatique. Le changement de température (ΔT) est déterminé par un microcalorimètre et relié aux variations d'enthalpie (ΔH) et à la capacité calorifique du réacteur (C_p) par la relation suivante :

$$\Delta T = \frac{n\Delta H}{C_p} \dots\dots\dots (I-3)$$

Où : « n » est le nombre de moles de substrat ayant réagit. Pour ce type de capteur chimique, il n'est pas nécessaire de mesurer le produit de la réaction, seule la chaleur dégagée au cours de la réaction est utilisée dans la mesure. La plupart des capteurs thermiques trouvent leurs applications dans les domaines pharmaceutiques et cliniques pour la détection du glucose.

c- Transducteur optique

L'utilisation de transducteurs optiques est de plus en plus répandue notamment pour les milieux biologiques et environnementaux. La détection est réalisée grâce à des changements des propriétés optiques (réflexion, absorption, ...). Le choix d'une méthode optique particulière dépend de la nature de l'application et de la sensibilité désirée. Ils existent plusieurs types de transducteurs optiques. Parmi les plus utilisés dans le domaine chimique et biologique on trouve les transducteurs à résonance du plasmon de surface (SPR) [11].

Dans les métaux, il existe des ondes particulières dites ondes plasmas, qui correspondent à une oscillation de la densité de charge. Ces ondes ayant une structure longitudinale (le vecteur d'onde est parallèle au champ électrique) ne peuvent pas être engendrées optiquement (structure transverse de l'onde électromagnétique). Cependant, on peut lever cette contrainte à l'interface entre un métal et un diélectrique en générant une onde évanescente qui présentera une composante longitudinale. Le mode mixte lumière/oscillation plasma est alors appelé plasmon. Le couplage entre l'onde plasma et la lumière, n'est efficace que lorsqu'il y a un accord des vitesses (de phase) des deux ondes; c'est à dire une égalité de leurs vecteurs d'onde le long de l'interface. Dans ces conditions, on a :

$$n \cdot \sin \alpha = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{1 + \epsilon_1}} \dots\dots\dots (I-4)$$

Où : n représente l'indice du verre, α l'angle d'incidence de l'onde lumineuse sur l'interface verre/métal et ϵ_1 la partie réelle de la constante diélectrique du métal. On a fait l'approximation $n_{\text{air}} = 1$.

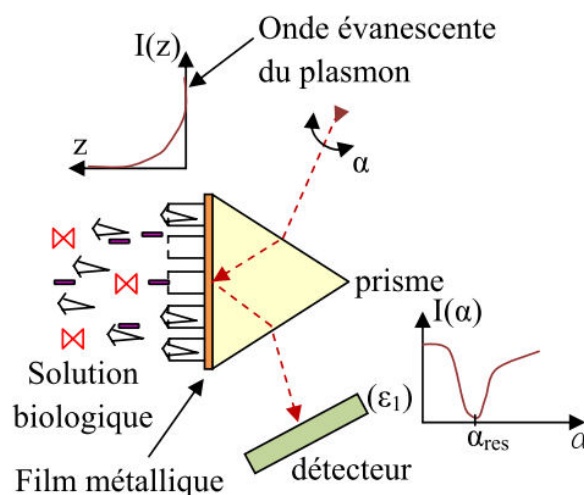


Figure I-5 : Schéma de principe de la résonance de plasmon [6].

La variation de l'indice de réfraction sera perturbée en modifiant l'angle de réflexion totale. Cette propriété est mise à profit dans des appareils commerciaux destinés à la détection de

(quelques) molécules biologiques. Cette technique permet même de suivre en temps réel des phénomènes comme la fixation d'anticorps sur une surface. De plus, notons que ce principe permet d'avoir accès aux cinétiques de réaction, c'est donc un capteur biologique (fig. I-5).

d- Capteurs électrochimiques

Un autre vaste champ des capteurs chimiques est celui de l'électrochimie où l'utilisation des méthodes électrochimiques en biochimie. Les capteurs électrochimiques sont des capteurs d'espèces ioniques en solution, ils opèrent donc dans les milieux liquides de manière continue, c'est-à-dire qu'ils se classent dans la catégorie des capteurs chimiques métaboliques (accès à la cinétique). La classification des capteurs électrochimiques s'effectue en fonction de la méthode de détection utilisée pour l'analyse du composé d'intérêt chimique ou biologique. Le type de reconnaissance moléculaire détermine le type de transducteur et par suite la méthode de caractérisation qui est, en général, de type ampérométrique, potentiométrique, volta-métrique ou impédancemétrique.

- **Méthode ampérométrique**

L'ampérométrie est une technique qui repose sur la détermination de l'intensité de courant qui traverse une cellule électrochimique à un potentiel imposé. Cette méthode de caractérisation est souvent appliquée aux biocapteurs qui sont en général élaborés par immobilisation d'une enzyme à la surface d'une électrode métallique (platine, or, argent, graphite). Les espèces électroactives consommées ou produites lors de la réaction vont être détectées à potentiel constant via leur oxydation ou leur réduction à la surface de l'électrode. Il est donc possible, après étalonnage, de déterminer la concentration de certains corps présents, par la mesure de l'intensité.

- **Méthode potentiométrique**

Le principe général de fonctionnement des capteurs potentiométriques repose sur la mesure de la différence de potentiel qui s'établit entre une électrode de mesure et une électrode de référence de potentiel constant.

- **Méthode impédancemétrique**

La réponse électrique de la détection utilisée pour nombreux domaines tels que la biologie, la physiologie ou la médecine est l'impédance [17]. Parmi ces applications, la mesure automatique d'impédance en microbiologie permet de mesurer, détecter, quantifier et

identifier les micro-organismes d'un échantillon. Les capteurs impédancemétriques sont surtout basés sur la mesure de la conductivité ou de la capacité entre deux électrodes interdigitées (fig. I-6).

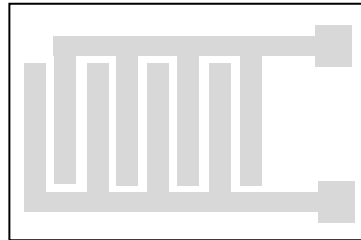


Figure I-6 : Schéma de structure d'électrodes interdigitées.

I.3- Caractéristiques métrologiques des capteurs de gaz

Le capteur de gaz est l'élément essentiel d'une chaîne de mesure dont le mesurande est la concentration de gaz. Comme pour tout instrument de métrologie, de nombreuses variables peuvent affecter ces caractéristiques. De manière générale on distingue les critères suivants de performances utilisés pour évaluer la qualité d'un capteur [1,3]

I.3.1- Sensibilité

La sensibilité est définie, pour une concentration de gaz donnée, par la variation relative de conductance (ou résistance).

$$S = \frac{G_{\text{gaz}} - G_{\text{air}}}{G_{\text{air}}} \dots\dots\dots (I-11)$$

Avec G_{gaz} et G_{air} sont les valeurs de conductance du capteur dans la présence d'une concentration d'un gaz donnée et de l'air sec.

I.3.2- Sélectivité

Un capteur chimique idéal n'est supposé répondre qu'à l'espèce chimique recherchée. Donc, la sélectivité est définie comme le rapport de la sensibilité (S) d'un gaz sur la sensibilité d'un autre gaz, pour des concentrations identiques. C'est donc la possibilité de distinguer un gaz dans un mélange.

I.3.3- Réversibilité

Elle définit la capacité du matériau à revenir à son état initial lorsqu'on supprime l'excitation gazeuse.

I.3.4- Stabilité – Fidélité

La notion de stabilité est associée aux problèmes de dérives temporelles. Ces dérives sont détectées par une instabilité de la ligne de base et par la variation de la sensibilité du matériau. Ces dérives peuvent avoir plusieurs origines telles que les variations de condition ambiante, les changements d'état de la surface du capteur ou l'instabilité de cette surface, ou encore externes à la couche sensible telle que l'activation des potentiels appliqués et variation de la température de fonctionnement due aux variations de chauffage. On définit deux types de dérives : les dérives à court terme (fidélité) et les dérives à moyen / long terme. Ces derniers indiquent un vieillissement de la couche sensible.

I.3.5- Temps de réponse

Il exprime le temps nécessaire que met la valeur de sortie du capteur pour se stabiliser lorsque les conditions de mesure varient brutalement d'un état à un autre. Le temps de réponse est pris entre 10% et 90% de la valeur stabilisée (fig. I-7). La réponse suit généralement une loi plus ou moins exponentielle avec le temps. Dans le cas des capteurs de gaz, cette valeur dépend essentiellement de la cinétique des réactions chimiques mises en jeu.

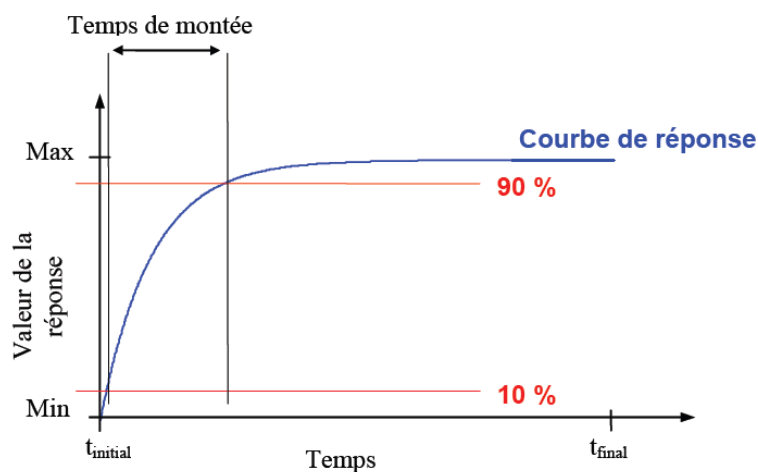


Figure I-7 : Représentation du temps de montée d'un capteur chimique.

I.4- Mécanismes d'incorporation d'un gaz dans un solide

Dans cette partie, nous allons définir les processus d'adsorption, d'absorption et de désorption. Nous nous attacherons tout particulièrement à mettre en évidence les différences entre absorption et adsorption, et à définir les différents types d'adsorption (physique ou chimique) [2].

I.4.a- Adsorption, absorption et désorption

La fig. I-8 représente les différents mécanismes d'incorporation d'un gaz ou d'une vapeur dans un solide.

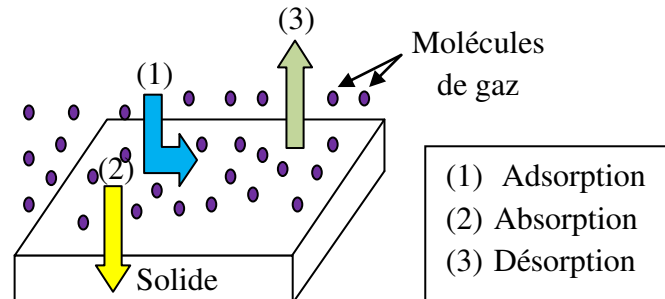


Figure I-8 : *Absorption, adsorption et désorption d'un gaz dans un solide.*

🔗 Adsorption

Les molécules provenant d'une phase gazeuse ou d'une solution forment une couche condensée sur une surface liquide ou solide. Dans le cas plus particulier des interactions gaz-surface, lorsqu'un gaz entre en équilibre avec une surface solide ou liquide, la concentration des molécules du gaz est plus importante à la proximité de la surface que dans le reste du volume occupé par le gaz, indépendamment de la nature de la surface ou du gaz. Les molécules de gaz se lient avec la surface, elles sont alors adsorbées[2].

🔗 Absorption

Les molécules du gaz pénètrent à l'intérieur de la structure absorbante par un phénomène de diffusion. Les molécules sont alors absorbées.

Les procédés d'absorption et d'adsorption sont fondamentalement différents :

- dans le cas d'un procédé d'absorption, lorsque la masse de l'absorbant est doublée, deux fois plus de gaz peut être absorbé ;
- par contre, dans le cas de l'adsorption, la quantité de gaz absorbé dépend l'aire totale du solide considéré et non de son volume ni de sa masse.

Si l'on morcelle le solide, cela n'a pas d'influence sur la quantité de gaz absorbé, mais cela modifié énormément la quantité de gaz adsorbé.

🔗 Désorption

Les molécules du gaz quittent la surface ou la couche dans laquelle elles avaient diffusé. Dans le cas des vapeurs, un phénomène supplémentaire peut intervenir : la condensation.

I.4.b-. Différents phénomènes d'adsorption

Les interactions entre ions ou atomes à la surface sont dissymétriques, et il en résulte l'apparition de champs électriques susceptibles d'attirer les molécules d'un gaz au voisinage immédiat de l'interface. L'adsorption est donc un mélange de molécules piégées directement à la surface de la couche adsorbante et à l'intérieur des pores de la couche. Selon l'énergie d'adsorption, les phénomènes d'adsorption peuvent être classés soit chimiquement ou physiquement.

a- Adsorption physique (Physisorption)

L'adsorption physique résulte de la présence de forces intermoléculaires d'attraction et de répulsion qui agissent entre deux particules voisines (entre atomes ou groupement d'atome du solide et les molécules de gaz). Ces derniers sont fixés sur le solide par des forces électrostatiques (forces de Van der Waals). Les liaisons entre le solide et le gaz sont de faible énergie (0 à 40 kJ/mol) comme le montre la fig. I-9. Le phénomène d'adsorption contrôlé par la diffusion des molécules, atteint son équilibre relativement rapidement (quelques secondes à quelques minutes). Néanmoins, il peut se prolonger sur des temps très longs selon la dimension des pores [6].

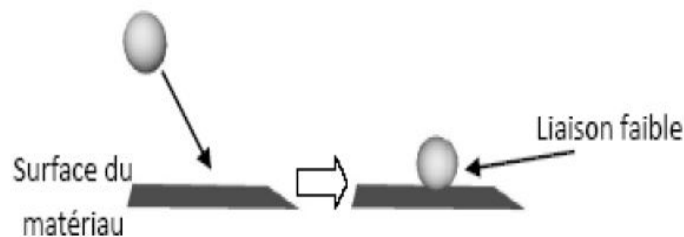


Figure I-9 : Principe de la physisorption d'une molécule sur une surface [6].

b- Adsorption chimique (Chimi-sorption)

Le second type d'adsorption est la chimi-sorption. Le principe est illustré sur la fig. I-10. Dans certains cas, l'interaction entre les atomes du solide et les molécules de gaz conduit à la formation de liaisons chimiques. Il s'agit alors de chimisorption. Dans le cas de l'adsorption chimique, les énergies d'interaction sont élevées, généralement supérieure à 40 kJ/mol par rapport à quelque kilojoule par mole pour la physisorption. Ces énergies s'accompagnent par la formation des liaisons entre les atomes de la surface et les molécules de l'adsorbât. La chimisorption est complète quand tous les centres actifs présents à la surface ont établi une liaison avec les molécules de l'adsorbât [6].

Dans le cas de la formation d'une liaison chimique spécifique, on peut envisager différents types de liaisons :

- liaison purement ionique dans laquelle l'atome ou l'ion joue le rôle de donneur ou d'accepteur d'électrons ;
- liaison covalente.

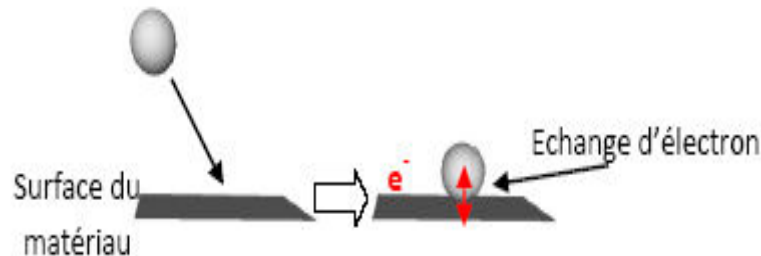


Figure I-10: Principe de la chimisorption d'une molécule sur une surface [6].

La chimisorption est déclinée en deux mécanismes différents : avec ou sans la dissociation de la molécule chimisorbée (fig. I-11). Pour une température assez importante, une molécule chimisorbée peut se dissocier à la surface du matériau. Elle se trouve alors sous forme ionique en surface. C'est la chimisorption dissociative (ou Ionosorption).



Figure I-11 : Différence entre la chimisorption moléculaire et dissociative [6].

I.5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les capteurs chimiques ainsi que leurs différents types. Nous avons présenté également quelques notions sur les matériaux utilisés pour la détection des espèces chimiques. Finalement, nous avons présenté aussi les mécanismes d'incorporation d'un gaz dans un solide.

Chapitre II

*Les capteurs à ondes
acoustiques de surfaces*

II.1- Introduction

Les capteurs à ondes acoustiques de surfaces (SAW : Surface Acoustic Wave) sont composés d'un élément sensible à l'espèce à détecter et d'un transducteur qui traduit la présence d'espèces chimiques en une mesure de fréquence. Leur principe de fonctionnement est basé sur la propagation des ondes élastiques (ou acoustiques) en surface.

En effet, une onde acoustique de surface (SAW) est une onde que se propage le long de la surface d'un matériau solide. Son amplitude décroît rapidement, souvent de façon exponentielle, avec la profondeur de la matière. Il existe plusieurs modes de propagation des ondes acoustiques de surface tel que : les ondes SH-APM, les ondes de Lamb, les ondes de Love et les ondes de Stoneley .

L'objectif de ce chapitre est d'effectuer une étude sur les capteurs à onde acoustique de surface. Ou nous allons présenter le principe de génération de cette onde, et d'en déduire le principe de fonctionnement du capteur.

II.2- Transducteur piézoélectriques

II.2.1- Définition de la piézoélectricité

L'observation qualitative du phénomène piézoélectrique a été faite par un minéralogiste français l'abbé R. HAÛY (1817). Cependant la découverte de la piézoélectricité est attribuée à Pierre et Marie CURIE (1880).

Piézo est un préfixe grec qui signifie serrer ou presser. Certains cristaux ont la propriété de se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique : c'est l'effet piézoélectrique direct schématisé sur la fig II-1.



Effet direct : Sous l'effet d'une contrainte, tension il apparaît des charges Effet indirect : L'application d'une tension engendre une déformation

Figure II-1 : L'effet piézoélectrique pour un matériau piézoélectrique [11].

L'effet piézoélectrique est réversible: ces mêmes cristaux se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Ce phénomène s'observe uniquement dans des matériaux non-

conducteurs. Le déplacement des charges se fait dans une direction privilégiée sous les efforts de traction ou de compression dans la structure cristalline de la céramique [12].

II.2.2- Symétrie et piézoélectricité

À l'échelle cristalline, la piézoélectricité se manifeste par une polarisation de la maille. À l'échelle de la maille, elle résulte de la création de dipôles internes par séparation du centre de gravité des charges positives et de celui des charges négatives suite aux déformations sous l'action de contraintes. Les propriétés de symétrie des cristaux ont une importance fondamentale.

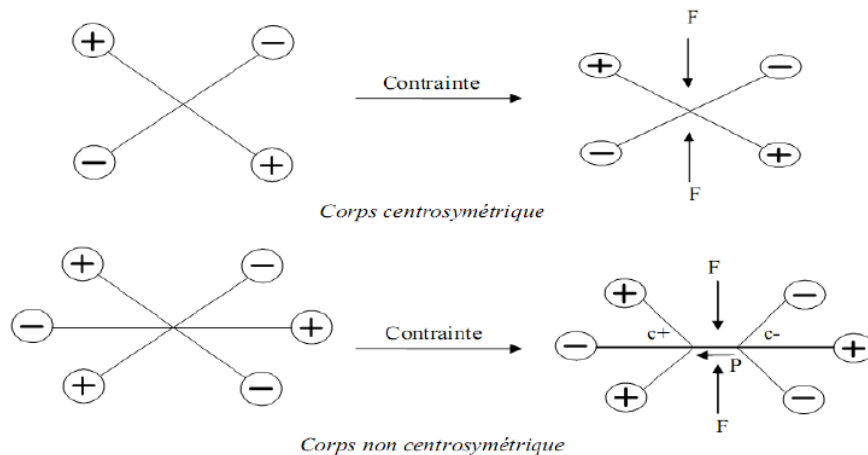


Figure II-2 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité [10].

Pour l'existence ou non de la piézoélectricité. Tout corps présentant un centre de symétrie ne peut pas être piézoélectrique alors que les cristaux ne possédant pas de centre de symétrie peuvent l'être (fig. II-2) [10].

II.2.3- Les matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques peuvent se regrouper en quatre classes principales, les céramiques, les cristaux, les polymères et les composites.

- **Les céramiques :** ce sont le plus souvent des solutions binaires ou ternaires possédant une structure pérovskite. Les premiers matériaux piézoélectriques de synthèse à base de Titanate de Barium sont apparus après 1945. Les Zircono-Titanate de Plomb (PZT) ont été élaborés dès 1954 et se sont répandus très rapidement, car leurs propriétés supplantent de loin celles de toutes les autres familles de composés.

- **Les cristaux** : nous citerons seulement le quartz et certains cristaux à base de Bismuth et de Lithium (comme le Niobate de Lithium et le Tantalite de Lithium) découverts respectivement par MATTHIAS et AURIVILLUS en 1949. Ces matériaux sont très stables, mais ont de faibles coefficients piézoélectriques. Il est actuellement possible de fabriquer de nombreux monocristaux de même composition que les céramiques citées précédemment, mais les techniques mises en jeu sont délicates et coûteuses.
- **Les polymères** : découverts par KAWAI en 1969, les films polymères semi-cristallins de type polyfluorure de vinilydène PVF2 présentent des propriétés piézoélectriques lorsqu'ils sont étirés sous un champ électrique. Les premières applications comme filtres à ondes de surface sont apparues au début des années 80.
- **Les composites** : ce sont des céramiques massives découpées et noyées dans des résines [7].

II.2.4- Equations piézoélectriques

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les huit équations d'état présentées dans le (Tableau II-1) relient des variables électriques (induction électrique **D** ou champ électrique **E**) à des variables mécaniques (déformation **S** ou contrainte **T**). Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique d'un matériau piézoélectrique. Trois types de coefficient interviennent :

- coefficients purement électriques,
- coefficients purement mécaniques,
- coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques [11] [13].

Soient **S** et **T**, respectivement la déformation et la contrainte et soient **D** et **E**, respectivement l'induction électrique et le champ électrique. On peut alors dire que pour un matériau piézoélectrique on a : **S** ou **T** qui peut être fonction de **D** ou **E**.

Le phénomène de couplage peut être décrit de manière adiabatique s'il s'agit d'une vibration rapide ou isotherme pour une transformation statique ou lentement variable. Comme les matériaux piézoélectriques sont anisotropes [14], leurs propriétés sont représentées par des

tenseurs, chaque symbole possède un indice, soit unique comme D_i , soit double ϵ_{ij} ou encore triple.

Les grandeurs envisagées étant tensorielles, d'ordre 1 pour le champ et l'induction électrique ou d'ordre 2 pour la contrainte et la déformation, les facteurs les reliant sont donc aussi tensoriels, d'ordre 3 pour les constantes piézoélectriques ou d'ordre 2 pour la permittivité électrique [15].

Variables indépendantes	Grandeurs électriques	Grandeurs mécaniques
E, T	$D = \epsilon^T . E + d . T$	$S = S^E . T + d^t . E$
D, T	$E = \beta^T . D - g . T$	$S = s^D . T + g^t . D$
E, S	$D = \epsilon^S . E + e . S$	$T = c^E . S - e^t . E$
D, S	$E = \beta^T . D - h . S$	$T = c^D . S - h^t . D$

Tableau II-1 : Les différentes équations piézoélectriques.

[]^t est la transposée de la matrice [].

()^x Indique que la grandeur est considérée à x constant ou nul.

Le Tableau II-2 précise les grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques utilisées dans les équations d'états.

➤ Coefficient de couplage électromécanique

Les céramiques piézoélectriques sont également caractérisées par un coefficient de couplage électromécanique K .

$$K = \frac{\text{energie transformée}}{\text{energie fourni}}$$

Il correspond à la capacité d'une céramique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement.

Abréviations	Dénominations	Types de grandeur	Matrice
D	Déplacement électrique ou induction C/m^2		(3, 1)
E	Champ électrique V/m	Electrique	(3, 1)
ϵ	Permittivité électrique F/m		(3, 3)
β	Constante d'imperméabilité diélectrique m/F		(3, 3)
S	Déformation relative	Mécanique	(6, 1)
T	Contrainte N/m^2		(6, 1)
s	Compliance ou susceptibilité élastique m^2/N		(6, 6)
c	Raideur ou constante élastique N/m		(6, 6)
d	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ nul ou constant C/N ou m/V	Piézoélectrique	(3, 6)
e	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation à champ nul ou constant C/m^2 ou N/V.m		(3, 6)
g	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ à induction constante ou nulle V.m/N ou m^2/C		(3, 6)
h	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ résultant à induction constante ou		(3, 6)

	nulle m/V ou N/C		
--	------------------	--	--

Tableau II-2 : Grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques.

II.2.5- Domaines d’application

Les domaines d’application de la piézoélectricité sont nombreux. Ils dépendent de la fréquence d’utilisation (tableau II-3). Les applications concernent la transduction électroacoustique pour l’imagerie médicale et le contrôle non destructif dans la gamme de fréquence du MHz, mais aussi les capteurs, les actionneurs, les éléments moteurs, ou encore les filtres. La conception et la modélisation de transducteurs et de systèmes d’échographie ultrasonore nécessitent donc la connaissance de l’intégralité des tenseurs électromécanique de l’ensemble des matériaux constitutifs [11].

Fréquence	Application
10-50 kHz	Nettoyage, soudage, usinage, collage ...
10-100 kHz	Acoustique sous-marine, analyse des sous-sols...
1-20 MHz	Acoustique médicale, échographie
100 MHz – 10 GHz	Acousto-optique, Acousto-électrique
10- 100 GHz	Etude de la matière

Tableau II-3 : Domaines d’application en fonction de leurs fréquences [16].

II.3- Equations de propagation dans les solides

II.3.1- Description des solides

a) déplacement et déformation

Sous l'action de forces extérieures, un solide subit une déformation si ses particules se déplacent relativement les unes par rapport aux autres.

➤ **Déplacement**

La position d’un point matériel d’un solide non déformé est définie, à partir d’une origine O, par le vecteur \bar{x} . Après déformation, le point choisi est repéré par le vecteur \bar{x}' tel que :

$$\bar{x}' = \bar{x} + \bar{u} \dots\dots\dots (II-1)$$

On appelle \vec{u} le vecteur déplacement. Le déplacement d'un point dans les trois directions de l'espace est une fonction continue des coordonnées X_k , ($k=1, 2, 3$).

➤ **Déformation**

Un solide quelconque soumis à des forces extérieures se déforme lorsque ses divers points matériels se déplacent relativement les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire si le gradient des déplacements $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ n'est pas nul.

On peut montrer que dans le cas d'un solide quelconque et pour de petites déformations, les composantes S_{ij} du tenseur des déformations [S] s'écrivent [13]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) (i, j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (II-2)$$

[S] est un tenseur symétrique de rang deux : $S_{ij} = S_{ji}$.

b) Force et contraintes

Considérons un solide soumis à des actions extérieures. Dans le solide déformé apparaissent des tensions mécaniques appelées contraintes qui tendent à le ramener dans son état de repos, et assurent l'équilibre de la matière. Ces contraintes sont homogènes à une force par unité de surface.

Soit en repère orthonormé [16], ΔF_i la composante sur l'axe i de la force $\vec{\Delta F}$ exercée sur l'élément de surface ΔS_i perpendiculaire à l'axe j . La contrainte T_{ij} est définie par la limite du rapport $\frac{\Delta F_i}{\Delta S_j}$ quand ΔS_j tend vers zéro :

$$T_{ij} = \lim_{\Delta S_j \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F_i}{\Delta S_j} \right) (i, j = 1, 2, 3) \dots\dots\dots (II-3)$$

Le tenseur des contraintes [T] est un tenseur de rang deux, constitué de neuf composantes T_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$). Comme il s'agit d'un tenseur symétrique, c'est-à-dire que $T_{ij} = T_{ji}$, le nombre de composantes indépendantes est réduit à six [13] :

T_{11}, T_{22}, T_{33} : contraintes normales aux faces.

T_{12}, T_{13}, T_{23} : contraintes tangentielles. Pour déformer un solide, des actions extérieures sont nécessaires. Des tensions mécaniques apparaissent alors dans le solide, et tendent à le ramener

dans son état de repos. Si le solide a un comportement élastique, il retrouve son état initial lorsque les actions extérieures sont supprimées. Ce comportement élastique se traduit par une relation entre les contraintes T_{ij} et les déformations S_{km} :

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{km} (i, j, k, m = 1,2,3) \dots\dots\dots (II-4)$$

Les coefficients c_{ijkl} qui traduisent la relation linéaire la plus générale entre les tenseurs de rang 2 T_{ij} et S_{km} sont les composantes d'un tenseur de rang 4 : [C] le tenseur des rigidités élastiques (N/m²).

Les tenseurs [T] et [S] étant symétriques on a : $c_{ijkl} = c_{jikl}$ et $c_{ijkl} = c_{ijmk}$, avec $i, j, k, m = 1,2,3$. Il vient alors que :

$$T_{ij} = \frac{1}{2} c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_m} + \frac{1}{2} c_{ijkm} \frac{\partial u_m}{\partial x_k} \dots\dots\dots (II-5)$$

Comme $c_{ijkl} = c_{ijmk}$, il vient enfin

$$T_{ij} = c_{ijkl} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} (i, j, k, m = 1,2,3) \dots\dots\dots (II-6)$$

II.3.2- Equations de propagation dans un milieu piézoélectrique

L'équation du mouvement résultant de la loi fondamentale de la dynamique

$\vec{F} = m \vec{\gamma}$ est telle que :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial X_j} = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \dots\dots\dots (II-7)$$

T_{ij} : Tenseur des contraintes (N/m²) ;

ρ : Densité du substrat (masse volumique) (kg/m) ;

U_i : Vecteur de déplacement (m).

Le tenseur de déformation mécanique est relie aux déplacements par la relation (II-2) La loi de Hooke s'écrit en fonction des déplacements [11, 17] :

a) Pour un milieu non piézo-électrique

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{km} = \frac{1}{2} c_{ijkl} \left[\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right] \dots\dots\dots (II-8)$$

Et comme le tenseur $S_{kl} = S_{kl}$ (symétrique) donc :

$$T_{ij} = c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \dots\dots\dots (II-9)$$

Donc la relation (II-4) devient :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \dots\dots\dots (II-10)$$

b) Pour un milieu piézo-électrique

Les expressions de la contrainte et de l'induction électrique sont définies comme suit :

$$T_{ij} = c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} - e_{kij} E_k \dots\dots\dots (II-11)$$

c_{ijkl} : Tenseur d'élasticité (N/m²) (i,j, k,l= 1 1, 2, 3) :

e_{kij} : Tenseur d'constante piézoélectrique (C/m²) ;

E_k : Champ électrique (V/m).

$$D_j = e_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \varepsilon_{ij} E_k \dots\dots\dots (II-12)$$

D_j : L'induction électrique (C/m²).

ε_{ik} : Tenseur du constant diélectrique (F/m).

D'après la symétrie des tenseurs c_{ijkl} , e_{kij} et ε_{ik} . Les relations (II-11) et (II-12) devient :

$$T = CS - e^t E \dots\dots\dots (II-13)$$

$$D = \varepsilon E + eS \dots\dots\dots (II-14)$$

e^t : transposé de e. C'est le même tenseur "e" de piézoélectricité qui intervient dans les deux équations (II-13) et (II-14).

c) Conditions aux limites

Les équations d'état piézoélectrique (II-13) et (II-14) précédentes doivent satisfaire les conditions aux limites mécaniques et électriques aux interfaces entre le milieu solide finis et le milieu extérieur

➤ *Conditions aux limites mécaniques*

Dans le cas de solides rigidement liés, il y a continuité des déplacements aux frontières. De même, en l'absence de force extérieure agissant sur la frontière, il y a continuité des contraintes aux interfaces. Dans le cas où le milieu extérieur est le vide, les contraintes en surface sont nulles.

➤ *Conditions aux limites électriques*

En électrostatique, il y a continuité des composantes tangentielles du champ électrique et du potentiel électrique aux interfaces. La composante normale D_n de l'induction électrique est discontinue sur une surface chargée.

Par substitution de l'équation (II-11) dans l'équation (II-7), nous obtenons :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_l} - e_{kij} \frac{\partial E_k}{\partial X_j} \dots\dots\dots (II-15)$$

L'induction électrique obéit à la loi de Poisson : où ρ_e est la densité de charges électriques libres par unité de volume. ρ_e est nul pour un matériau isolant.

$$\text{div}(\vec{D}) = \rho_e \dots\dots\dots (II-16)$$

Par substitution de l'équation (II-12) dans l'équation (II-16), nous obtenons :

$$e_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_l} + \epsilon_{ik} \frac{\partial E_k}{\partial X_j} = 0 \dots\dots\dots (II-17)$$

La propagation des ondes élastique en admettant que le champ électrique est statique (approximation quasi-statique), le champ \vec{E} dérive d'un potentiel scalaire Φ [11,18].

$$\vec{E} = -\text{Grad} \Phi \dots\dots\dots (II-18)$$

$$\Phi = U_4 \Rightarrow E_k = -\frac{\partial U_4}{\partial X_k} \quad k= 1, 2, 3 \dots\dots\dots (II-19)$$

U_4 : Potentiel électrique.

En intégrant l'équation (II-19) dans les équations (II-15) et (II-17), nous aurons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_l} + e_{kij} \frac{\partial^2 U_4}{\partial X_k \partial X_j} \dots\dots\dots (II-20) \\ e_{ikl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_j \partial X_l} - \varepsilon_{ik} \frac{\partial^2 U_4}{\partial X_k \partial X_j} = 0 \dots\dots\dots (II-21) \end{array} \right.$$

L'expression (II-20) est l'équation fondamentale de dynamique appliquée au cristal piézo-électrique. L'expression (II-21) est l'équation de couplage électro élastique. Ces deux expressions (II-20) et (II-21), sont les équations phénoménologiques tensorielles piézoélectriques, c'est à partir de ces deux équations qu'on pourra modéliser la propagation des ondes acoustiques dans un milieu anisotrope.

II.4- Propagation des ondes acoustiques

II.4.1- Ondes acoustiques

Le terme le plus répandu pour parler des ondes se propageant dans un solide piézoélectrique est "ondes acoustiques" (ou élastique), utilisé dans le sens où l'onde considérée est une onde de matière (qui ne peut pas se propager dans le vide). Les ondes élastiques se propageant dans les milieux matériels sont caractérisées par une direction de propagation (définie par le vecteur d'onde) et une polarisation (direction dans laquelle s'effectuent les déplacements de matière). Les propriétés physiques (anisotropie, symétrie cristalline, ...) et les dimensions du milieu de propagation peuvent permettre la propagation d'une grande variété d'ondes élastiques que nous allons décrire dans ce qui suit.

L'étude de la propagation des ondes permet de montrer que tous les types d'ondes sont la combinaison de deux types fondamentaux (fig.II-3) [13].

- les ondes longitudinales, résultant d'une oscillation dans la direction de propagation et qui peuvent se propager dans les fluides et dans les solides.
- les ondes transversales, qui résultent d'une oscillation perpendiculaire à la direction de propagation. Elles ne se propagent que dans les solides et dans les fluides très visqueux.

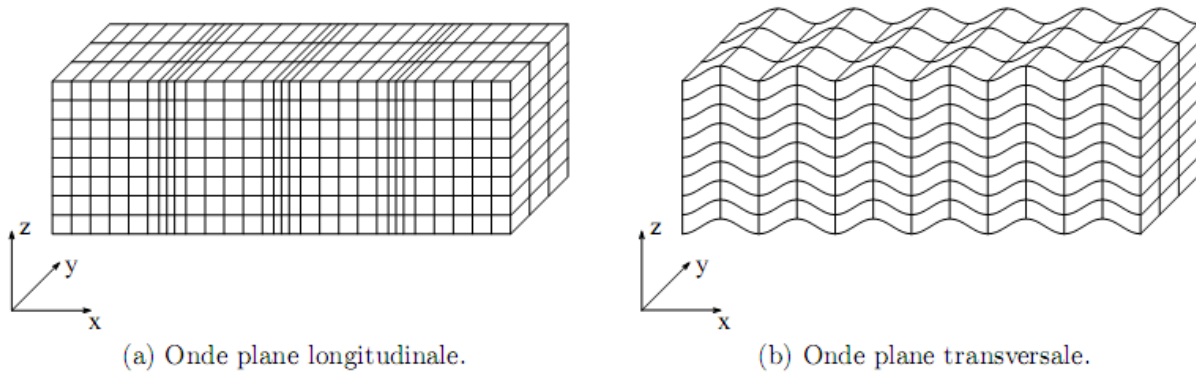


Figure II-3: Propagation d'ondes planes dans un solide [13].

Pour une direction de propagation \vec{n} (colinéaire à la vitesse de phase) donnée, ces ondes sont caractérisées par les vecteurs déplacements \vec{u}^1 , \vec{u}^2 et \vec{u}^3 respectivement associés à l'onde longitudinale, transverse horizontale et transverse verticale. Ces vecteurs sont orthogonaux entre eux (fig. II-4).

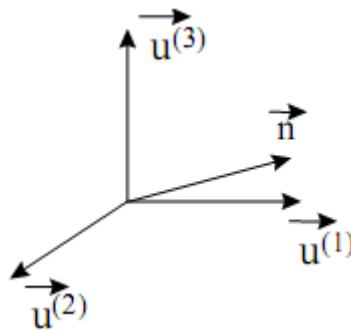


Figure II-4 : Polarisation des ondes susceptibles de se propager suivant \vec{n} (milieu anisotrope).

Dans le cas général, la direction de propagation \vec{n} fait un angle aigu avec le vecteur déplacement \vec{u}^1 : on parle d'ondes quasi-longitudinales et d'ondes quasi-transverses. Pour les milieux isotropes, ainsi que pour certaines coupes cristallographiques de matériaux anisotropes, \vec{n} et \vec{u}^1 sont colinéaires : on parle d'ondes de polarisation pure [13].

Pour décrire les différents types d'ondes, on peut différencier la propagation dans les solides illimités (dont les dimensions latérales sont grandes devant l'étendue du faisceau d'ondes élastiques) et celle dans les solides limités dans lesquels des conditions aux limites sont imposées. On fera alors la distinction entre :

- les ondes planes dans un milieu infini (ondes de volume)
- les ondes guidées :
 - ✓ par la surface libre (milieu semi-infini) ;
 - ✓ dans une plaque (solide limité dont les interfaces sont distantes d'une longueur de l'ordre de la longueur de l'onde guidée λ , ou de quelques 10λ) ;
 - ✓ dans un milieu inhomogène.

II.4.2- Principe de génération d'ondes acoustiques

Le principe de génération d'ondes acoustiques est fondé sur les propriétés électroacoustiques de certains matériaux dits piézoélectriques tels que (le Quartz (SiO_2), le Niobate de Lithium (LiNbO_3), l'Oxyde de Zinc (ZnO), etc.). Les matériaux possédant cette propriété transforment l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement, avec un coefficient de conversion qui dépend du facteur de couplage électro-acoustique (ou coefficient de couplage électromécanique) K^2 , très variable d'un matériau à l'autre.

Cette propriété permet de générer des ondes acoustiques dans le matériau par application d'un potentiel électrique alternatif [16]. Suivant le type d'onde généré, on peut classer les dispositifs à ondes acoustiques en quatre groupes :

- Les dispositifs à ondes de volume (BAW, pour Bulk Acoustic Waves) ;
- Les dispositifs à ondes de surface (SAW, pour Surface Acoustic Waves) ;
- Les dispositifs à modes de plaque ;
- Les dispositifs à ondes guidées dans une structure hétérogène.

Dans le premier groupe, c'est tout le volume du matériau qui se déforme, la polarisation peut être longitudinale ou transversale. Dans le second groupe, l'onde est guidée à la surface du matériau : la fig. II-5 (gauche) représente une onde de Rayleigh (polarisation longitudinale et transversale verticale déphasées de 90°), la fig. II-5 (droite) représente une onde de Bleustein-Gulwev (polarisation transverse horizontale).

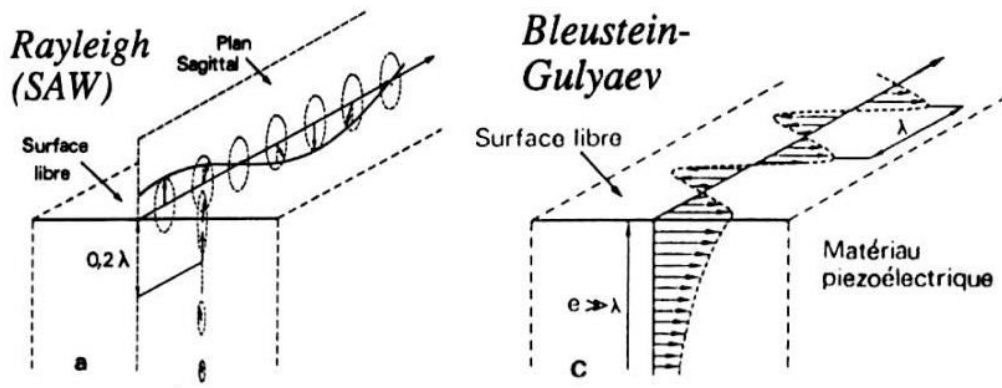


Figure II-5 : Gauche, déplacement des particules au passage d'une onde de Rayleigh. Droite, déplacement des particules lors de la propagation d'une onde de Bleustein-Gulyaev [18,19].

Dans le troisième groupe l'onde se propage dans le volume du matériau, soit sous la forme de deux ondes de Rayleigh (une par face) pour une onde de Lamb (fig II-6 à gauche) ou sous la forme d'une onde transverse horizontale subissant des réflexions aux faces du matériau (onde SH-APM fig II-6 à droite).

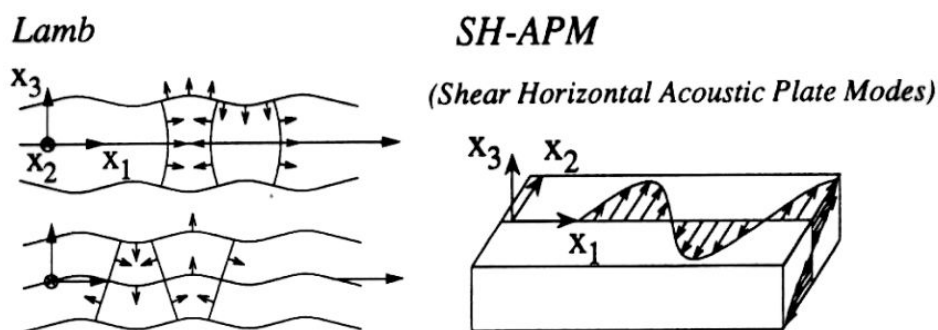


Figure II-6 : Gauche : déplacement des particules au passage d'une onde de Lamb (haut : mode symétrique, bas : mode antisymétrique) [13]. Droite : déplacement des particules au passage d'une onde SH-APM (mode d'ordre 1) [20].

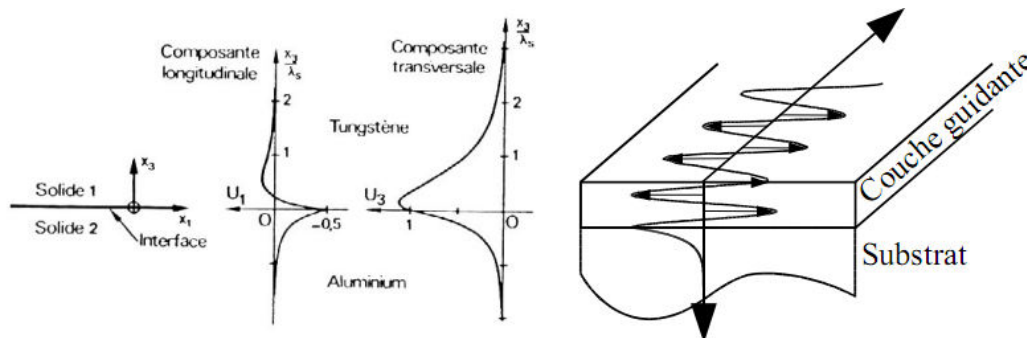


Figure II-7 : *Gauche, amplitude des composantes longitudinales et transverses verticales dans le cas de la propagation d'une onde de Stoneley. Droite, déplacement dans le cas de la propagation d'une onde de Love [13].*

Enfin, le quatrième groupe implique des structures dans lesquelles il y a au moins deux solides rigidement liés entre eux : l'onde de Stoneley qui est une onde de Rayleigh se propageant à l'interface entre deux solides (fig II-7 à gauche) et l'onde de Love dans laquelle l'onde se propage essentiellement dans la couche guidante (fig II-7 à droite). L'anisotropie des cristaux a pour effet de coupler mécaniquement certaines polarisations, on a alors des polarisations quasi-longitudinales et/ou quasi-transverses, dans lesquelles le déplacement n'est ni colinéaire ni orthogonal au vecteur d'onde. On nomme alors la polarisation d'après l'importance de chacune des projections du déplacement de la particule sur un repère lié au vecteur d'onde [21].

La propagation des différents modes des ondes élastiques dans les solides se fait sous des conditions bien déterminées qui dépendent de la nature du solide [11].

II.5- Ondes acoustiques de surface SAW

Les ondes acoustiques de surface SAW sont des ondes qui se propagent en parallèle de la surface d'un solide (le vecteur d'onde et le vecteur de flux d'énergie sont parallèles à la surface) avec une amplitude, en terme de longueur d'onde, qui décroît avec la profondeur du solide. Plusieurs modes de propagation des ondes acoustiques de surface existent. Ces modes se divisent principalement en trois parties : Ondes de Rayleigh, les ondes de Bleustein-Gulyaev (SH-SAW: shear Horizontal SAW), les ondes STW (Surface Transverse Wave).

Parmi ces trois types, les deux premiers sont à différencier du troisième. En effet, les ondes de Rayleigh et de Bleustein-Gulyaev se propagent librement le long de la surface, alors que les ondes STW sont guidées au moyen de sillons gravés ou de bandes métalliques déposées sur la surface [22,13].

II.5.1- Ondes de Rayleigh

Découvertes par Lord Rayleigh en 1885, se propagent dans un milieu semi-infini. La profondeur de pénétration de ce type d'onde dans le substrat, c'est-à-dire la distance à laquelle les déplacements acoustiques sont nuls, est de l'ordre de 2λ (sont guidées le long de la surface du matériau et leur amplitude décroît fortement avec la distance à la surface). C'est pourquoi les ondes de Rayleigh sont aussi connues sous le nom d'ondes de surface SAW [26,13].

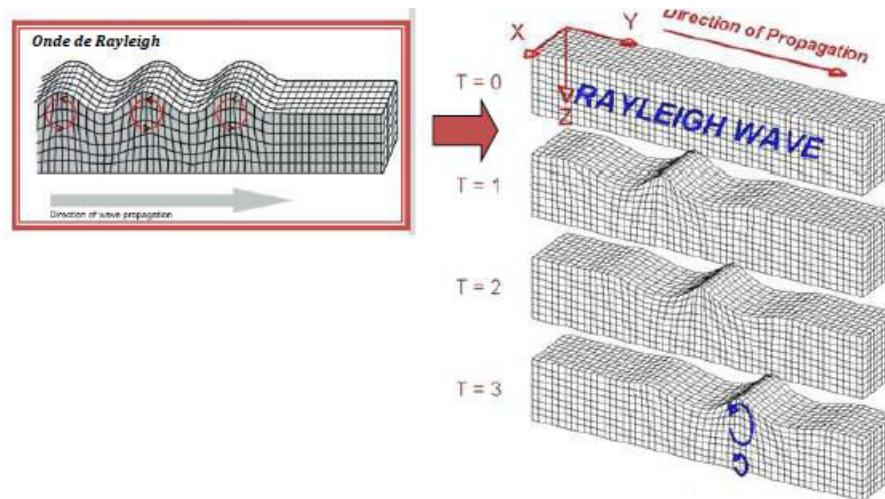


Figure II-8 : *Onde de Rayleigh [24].*

Dans un milieu isotrope la polarisation des ondes de Rayleigh est "elliptique" : les déplacements acoustiques, contenus dans le plan sagittal (plan contenant le vecteur d'onde et la normale à la surface), résultent de la superposition d'une composante longitudinale et d'une composante transversale déphasées de $\pi/2$ (fig. II-8). Dans un milieu anisotrope, les déplacements acoustiques se font dans un plan incliné par rapport au plan sagittal, la polarisation est dite "quasi-elliptique".

II.5.2- Ondes de Bleustein-Gulyaev

Un matériau fortement piézo-électrique possédant certaines symétries peut guider une onde de surface purement transverse horizontale appelée onde de Bleustein-Gulyaev [28]. La pénétration en profondeur est plus importante que dans le cas d'une onde de Rayleigh, de l'ordre de 100λ . De plus, plus le matériau est piézo-électrique, plus l'onde de Bleustein-Gulyaev est confinée en surface (fig II-5) [18]. Ces ondes sont également connues sous le nom de "SH-SAW" (Shear Horizontal – Surface Acoustic Wave), pour "onde acoustique transverse horizontale de surface".

II.5.3- Ondes STW (Surface Transverse Wave)

Les ondes STW sont à différencier des autres types d'ondes, dans la mesure où leur propagation nécessite un piégeage en surface. Il est parfois possible de générer une onde purement transverse horizontale, notamment dans un substrat de quartz de coupe simple rotation [16]. Cette onde, qui a tendance à se diriger vers le volume du matériau, est appelée onde SSBW (Surface Skimming Bulk Wave), pour "onde de volume rampant sous la surface" (fig. II-9). Il ne s'agit donc pas strictement d'une onde de surface, cependant, il est possible de la piéger en surface si le chemin de propagation comporte un motif périodique composé de

sillons gravés dans le substrat ou de bandes métalliques déposées sur celui-ci. On obtient alors un guidage en surface de l'onde qui devient une onde STW.

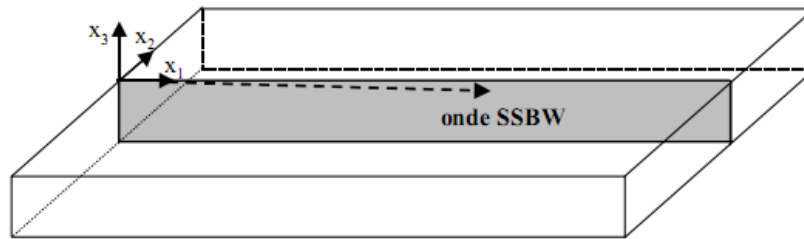


Figure II-9: Onde SSBW (Surface Skimming Bulk Wave).

II.6- Capteurs à ondes acoustiques de surface SAW

Les capteurs SAW peuvent être utilisés pour déterminer la présence de molécules spécifiques dans l'environnement. Ils sont fabriqués par la technique de photolithographie semblable à celle utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs [25].

II.6.1- Principe de fonctionnement des (IDT)

La génération d'ondes acoustiques se fait au moyen de deux électrodes parallèles et coplanaires déposées à la surface du substrat piézoélectrique. Un effet cumulatif peut être obtenu à partir d'un ensemble interdigité constituant le transducteur (fig. II-10). En appliquant une tension alternative au niveau du transducteur d'entrée, on génère une alternance de compressions et d'expansions qui peuvent se propager le long du substrat.

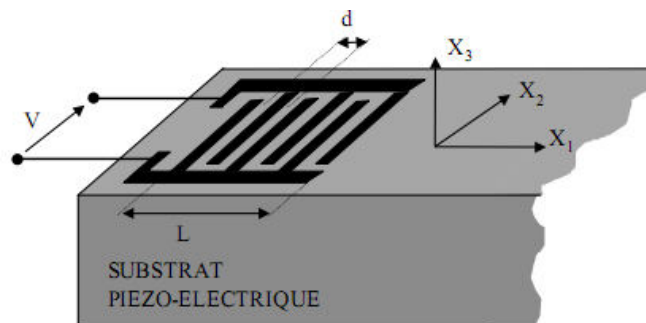


Figure II-10 : Electrode interdigité déposée à la surface d'un substrat piézoélectrique.

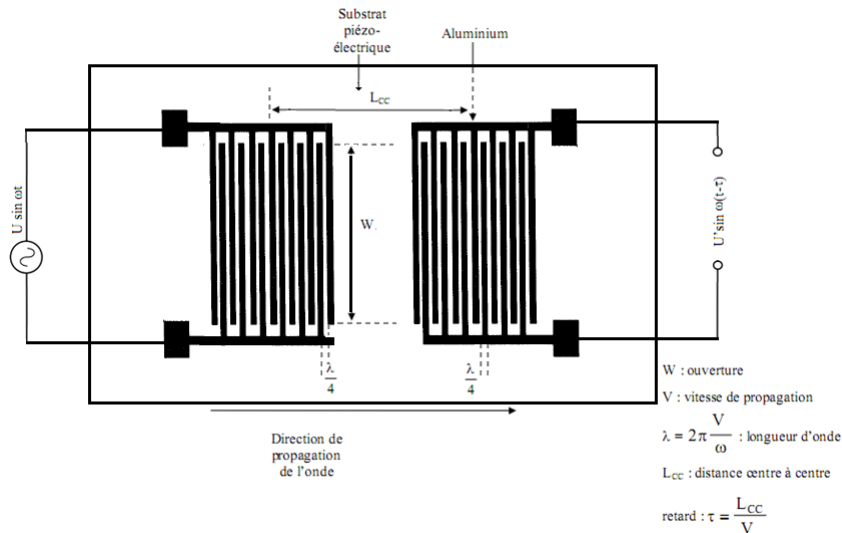


Figure II-11 : Principe et caractéristiques d'un dispositif à ondes acoustiques.

Le système étant réversible, un ensemble identique sert de récepteur et permet de recueillir le signal sous forme électrique. Le signal reçu est retardé et atténué par rapport au signal émis, d'où l'appellation de ligne à retard. Il est possible d'augmenter le coefficient de qualité Q du système, en augmentant le nombre de doigts constituant chaque électrode, dans la limite de la faisabilité technologique. La distance entre les doigts est déterminée de façon à obtenir un phénomène cumulatif d'ondes constructives à une fréquence donnée. La fig. II-11 donne les caractéristiques principales d'un dispositif à ondes acoustiques de surface [16].

II.6.2- Principe de détection

Nous venons de voir comment on peut générer une onde acoustique dans un substrat piézoélectrique. Nous allons maintenant nous intéresser à la manière de détecter des espèces chimiques à partir de ce principe de base. Le type d'onde acoustique se propageant dans un cristal piézoélectrique dépend de paramètres tels que la coupe cristallographique du cristal, les caractéristiques du milieu et le mode considéré. Une variation de ces paramètres perturbe l'onde et en change ses caractéristiques, telles que la vitesse et l'amplitude de propagation. Parmi les paramètres d'influence, on peut citer les propriétés des matériaux (la masse volumique, l'élasticité, la viscosité ou l'épaisseur des couches), ainsi que des paramètres extérieurs tels que la température ou la pression. Dans le cadre de l'application des dispositifs à ondes acoustiques à la détection d'espèces chimiques, nous nous intéressons en premier lieu à la masse volumique. En effet, l'étude des dispositifs à ondes acoustiques montre que les caractéristiques de propagation de l'onde sont fortement liées à la masse volumique des matériaux intervenant dans la structure considérée (substrat, couche sensible). Sous certaines

conditions cet effet appelé effet de masse est prépondérant par rapport aux effets induits par les autres paramètres. L'ajoute d'une couche mince (couche sensible) sur le chemin de propagation perturbe l'onde par effet de masse dû au dépôt, sa vitesse de phase est modifiée. Si la couche est choisie pour ses affinités avec une espèce chimique particulière, lorsque l'espèce est présente dans l'atmosphère du capteur, elle interagit avec la couche sensible principalement par sorption, induit une variation de sa masse, et modifie à nouveau l'onde acoustique. La mesure précise de ces perturbations nous permet de détecter des espèces chimiques spécifiques et de remonter à leur concentration (fig. II-12) [20,26].

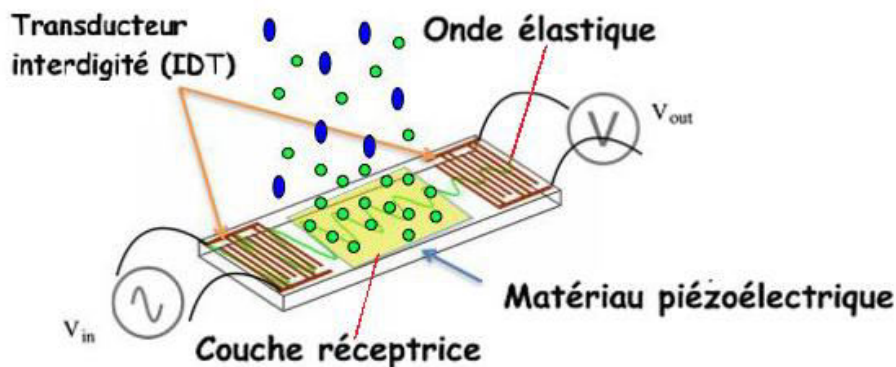


Figure II-12 : Principe de détection par capteur à ondes acoustiques.

II.6.3- Sensibilité du dispositif à ondes acoustiques

Le dispositif à ondes acoustiques est avant tout sensible à l'effet de masse, ce qui lui procure un large spectre d'applications, contrairement à un dispositif à fibre optique, par exemple, qui nécessiterait la variation d'un paramètre bien spécifique, comme l'indice optique. Ainsi, toute immobilisation de matière se traduit par une variation de masse, éventuellement accompagnée de la variation d'autres paramètres (comme quoi par exemple). Parmi les mécanismes de transduction, l'effet de masse est mis en jeu, de façon souvent prépondérante, dans les dispositifs à ondes acoustiques [21]. Aussi, le paramètre usuel pour qualifier et comparer entre elles ces structures est la « sensibilité à l'effet de masse », encore appelée fréquemment sensibilité gravimétrique (le terme de sensibilité inertielle serait mieux adapté, s'agissant d'un effet de masse), l'expression de cette sensibilité est donnée par [28,27].

$$S = \frac{\Delta f}{f_0} \frac{A_s}{\Delta m} \dots\dots\dots (II-22)$$

Où $\Delta f = f_{(\Delta m)} - f_0$.

f_0 et $f_{(\Delta m)}$ sont respectivement les fréquences de résonance de l'onde acoustique, pour le dispositif avant et après modification de masse surfacique.

Dans le cas de la détection d'un capteur chimique, l'interaction couche sensible-espèce cible peut-être modélisée par l'effet de masse Δm [20]:

$$\frac{\Delta m}{A_s} = b \cdot \rho \dots\dots\dots (II-23)$$

Avec b qui est l'épaisseur de la couche sensible et ρ la masse volumique de gaz dans la couche sensible.

Donc la sensibilité à l'effet de masse est:

$$S = \frac{\Delta f}{f_0} \frac{1}{b \cdot \rho_{(DCM, PIB)}} \dots\dots\dots (II-24)$$

Où $\rho_{(DCM, PIB)}$ est la masse volumique partielle de DCM dans la couche sensible PIB qui est calculé par l'expression suivante :

$$\rho_{(DCM, PIB)} = K \cdot M \cdot C \dots\dots\dots (II-25)$$

Où $K = 10^{1.4821}$, est le coefficient de partage air / PIB pour DCM, M est la masse molaire de DCM [24].

C : concentration de gaz DCM dans l'air, qui est donné par :

$$C = 100 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{p}{(R \cdot T)} \dots\dots\dots (II-26)$$

Où p : la pression atmosphérique de l'air, R : constante de gaz, T : la température ambiante de l'air [33,38].

II.7- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les notions théoriques sur le phénomène de piézoélectricité et les principaux matériaux piézoélectriques, ainsi que sa mise en équation. Puis, nous avons présenté les concepts de base sur la propagation des ondes acoustiques notamment les ondes acoustiques de surfaces et la description des dispositifs à ondes acoustiques de surface SAW. Après, nous avons développé le principe de fonctionnement des transducteurs interdigités IDT et le principe de détection à l'effet de masse.

Chapitre III

Résultats de la simulation

II.1- Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation de la simulation d'un dispositif SAW, sous environnement COMSOL Multi physiques. Cette étude nous permet de déterminer la réponse du capteur et d'en déduire les effets des paramètres d'influence géométriques sur les performances du capteur.

La structure d'un capteur à onde acoustique SAW est composée d'un transducteur interdigité (IDT) gravé sur un substrat piézoélectrique, recouvert d'une couche mince Poly-Iso Butylène (PIB) comme le montre la fig. III-1. Cette couche sensible capable d'absorber les espèces à détecter, produit un effet de masse (augmentation de la masse volumique) et modifie la vitesse de phase de l'onde acoustique.

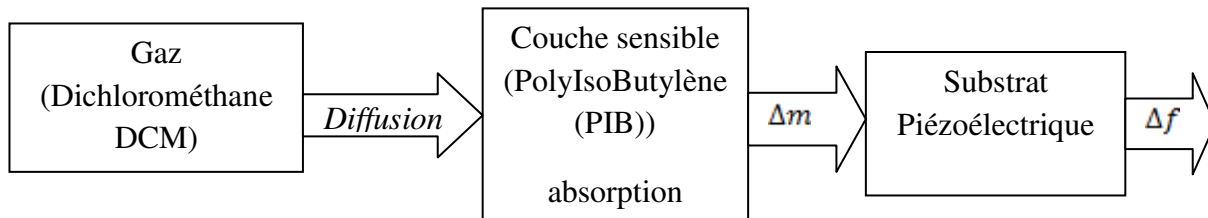


Figure III-1 : Principe de fonctionnement du capteur ''effet de masse'.

Après avoir établi l'équation de la dispersion des ondes acoustiques le long de la surface de la structure (SAW), nous allons maintenant aborder l'étude du mécanisme de détection des capteurs à ondes acoustiques. Autrement dit, nous allons aussi s'intéresse à l'étude de l'influence des paramètres géométriques sur la réponse du capteur.

III.2- Description du modèle

Le comportement d'un capteur à onde acoustique de surface est régit par le couplage des équations électromécaniques (II-20, II-21). La résolution de ces équations, par la méthode des éléments finis, permet de déterminer la réponse fréquentielle du dispositif en fonction de la masse.

Notre travail est basé sur l'étude des phénomènes à deux dimensions, c'est-à-dire, que l'analyse des phénomènes de propagation des ondes acoustiques de surface sera posée dans une section du dispositif supposée identique à elle-même le long de sa direction verticale.

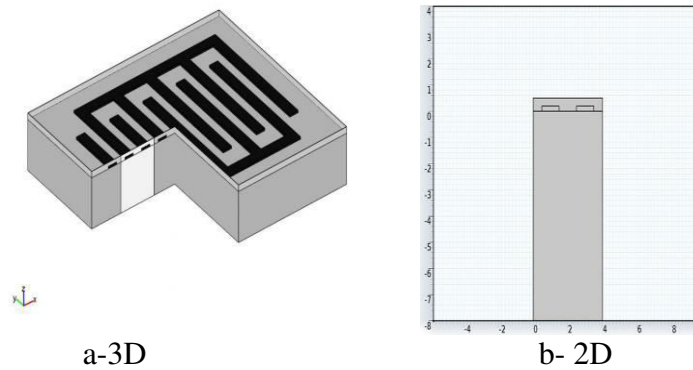


Figure III-2: Géométrie de la structure 3D/2D.

Cette restriction permet une bonne approximation car la plupart des phénomènes peuvent être analysés correctement, dans cette hypothèse bidimensionnelle, comme le montre la fig. III-2. Les dimensions de chaque couche de la structure 2D sont représentées dans le tableau III-1.

Matériau	Epaisseur	Largeur [µm]
PIB	500 nm	4
Al(IDT)	200 nm	1
LiNbO ₃	22 µm	1

Tableau III-1 : Valeurs moyennes des dimensions du dispositif.

III.2.1- Propriétés de matériau

Le substrat piézoélectrique constitue le matériau usuellement utilisé dans la réalisation des capteurs [4]. Parmi ces matériaux on peut citer, le Quartz (SiO₂), le Niobate de Lithium (LiNbO₃), le Tantalate de Lithium (LiTaO₃), qui présentent les propriétés électromécanique suivantes:

⚡ Matrice de rigidité élastique (c)

$$c = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & (c_{11} - c_{12})/2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-1)$$

Matrice piézoélectrique (e)

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & -e_{22} \\ -e_{22} & e_{22} & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-2)$$

Matrice diélectrique (ε)

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-3)$$

Les valeurs des différents coefficients des matériaux sont résumées dans le tableau III-2 :

Coefficients		Matériaux		
		LiNbO ₃	LiTaO ₃	Quartz
Constantes élastiques (10 ¹¹ N/m ²)	C ₁₁	2.03	2.33	0.867
	C ₁₂	0.573	0.47	0.070
	C ₁₃	0.752	0.80	0.119
	C ₁₄	0.085	0.11	0.179
	C ₃₃	2.424	2.75	1.07
	C ₄₄	0.595	0.94	0.579
Constantes des piézoélectriques (C/m ²)	e ₁₅	3.7	2.6	e ₁₁ = 0.171 e ₁₄ = 0.0406
	e ₂₂	2.5	1.6	
	e ₃₁	0.23	0.0	
	e ₃₃	1.33	1.9	
Constantes des diélectriques (10 ⁻¹¹ F/m)	ε ₁₁	85.2	51	3.92
	ε ₃₃	28.7	45	4.1
Densité (kg/m ³)	ρ	4700	7450	2650

Tableau III-2 : Diverses constantes des matériaux [13-29].

III.2.2- Etude paramétrique (orientation cristallographique)

La vitesse d’ondes dans un substrat piézoélectrique dépend de la direction de propagation considérée par rapport à l’orientation de la coupe cristallographique du matériau. Pour mettre en évidence l’influence de l’orientation de la coupe cristallographique des matériaux, nous avons envisagé une étude paramétrique en fonction de l’élasticité, de la piézo-électricité et d’électrique

du substrat LiNbO₃ YZ. Pour cela nous commençons notre étude par la définition de ces transformations géométriques, couramment appelées les angles d'Euler (θ, ψ, φ), où les deux premiers angles caractérisent la coupe du substrat et le troisième la direction de propagation. [22,30]

a) Angles d'Euler

- **La précession ψ** : première rotation autour de l'axe OZ. Donnée par :

$$[a]_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-4)$$

- **La nutation θ** : seconde rotation autour de l'axe OY. Que l'on exprime par :

$$[a]_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-5)$$

- **La rotation propre φ** : dernière rotation autour de l'axe OX, exprimée par :

$$[a]_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-6)$$

La transformation des coordonnées est donnée par le produit des 3 matrices [a]_x [a]_y [a]_z, tel que :

$$[a] = [a]_x [a]_y [a]_z$$

$$[a] = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \cos \theta \sin \psi & -\sin \varphi \cos \psi - \cos \varphi \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \sin \psi \\ \cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \theta \cos \psi & -\sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta \cos \psi \\ \sin \varphi \sin \theta & \cos \varphi \sin \theta & \cos \varphi \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-7)$$

Les nouvelles valeurs des matrices, d'élasticité, piézo-électricité et diélectrique sont respectivement [c'], [e'] et [ε'].

$$[\varepsilon'^T] = [a] [\varepsilon^T] [a]^T \dots\dots\dots(III-8)$$

$$[c'] = [M][c][M'] \dots\dots\dots(III-9)$$

$$[e'] = [a][e] [M]^T \dots\dots\dots(III-10)$$

La matrice [M] (matrice de Bond), est donnée par :

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m^2 & n^2 & 2mn & 0 & 0 \\ 0 & n^2 & m^2 & -2mn & 0 & 0 \\ 0 & -mn & mn & m^2 - n^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m & -n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & n & m \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III-11)$$

Avec $m = \cos \varphi$ et $n = \sin \varphi$.

Dans le tableau III-3, on regroupe les différentes valeurs des paramètres de substrat LiNbO₃ d'un capteur SAW utilisé dans notre travail pour la simulation COMSOL multi physiques.

Matériaux	Coupe et direction de propagation	Vitesse des ondes [m/s]	Coefficient de couplage k ² %
LiNbO ₃ [31,32]	YZ	3488	4.82
	128° YX	3992	16

Tableau III-3 : Diverses valeurs des paramètres utilisés.

III.3- Simulation COMSOL multi physiques d'un capteur SAW

Les étapes essentielles de la simulation d'un capteur SAW sous environnement COMSOL sont :

III.3.1- Choix de la dimension du modèle

Le choix de la dimension s'effectue à partir du menu de la fig. III-3, où on sélectionne la rubrique « model wizard » qui permet de prendre la dimension du modèle dans notre cas 2D.

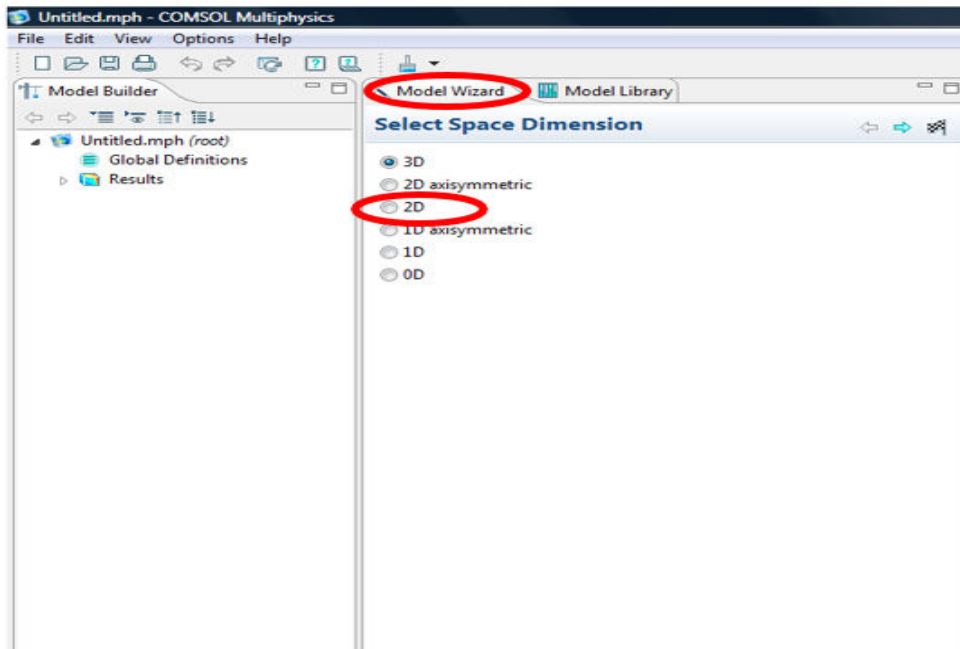


Figure III-3 : Choix de la dimension.III.3.2- Choix du modèle physique

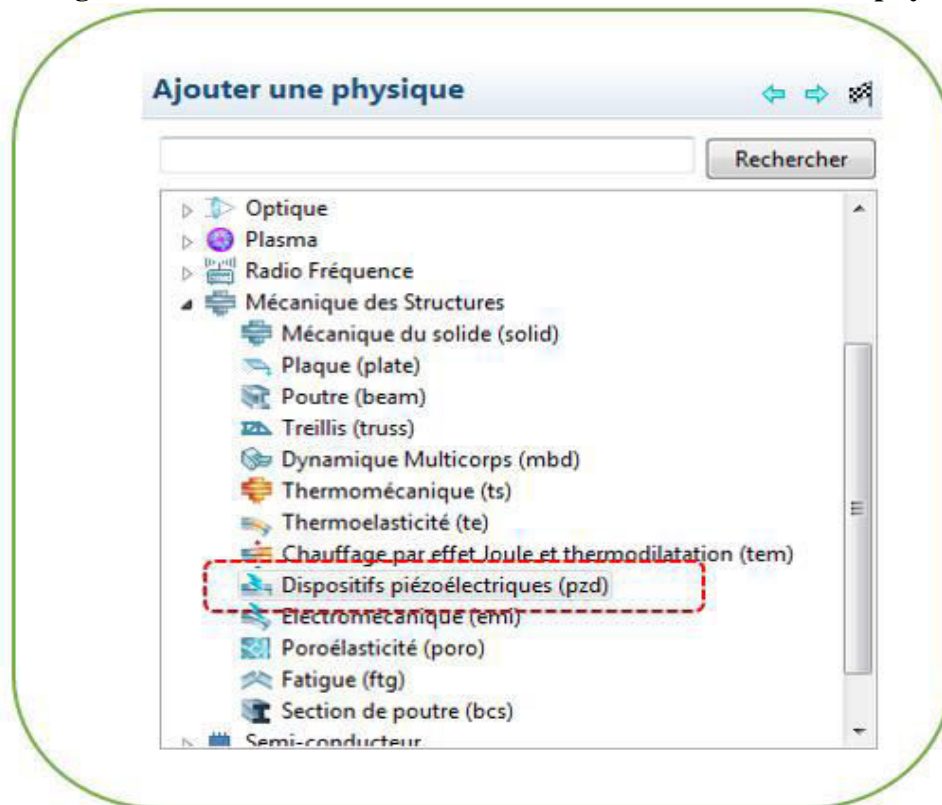


Figure III-4 : Fenêtre du Navigateur de modèles : choix du modèle.

Le choix du modèle s'effectue à partir du menu de la fig. III.4, où on sélectionne la rubrique « Dispositifs piézoélectriques » qui permet d'introduire les équations à dérivées partielles régissant le couplage électromécanique (II-20, II-21).

III.3.3- Saisie des données

Dans la rubrique « définitions globales », on introduit toutes les constantes et toutes les expressions nécessaires à la simulation du capteur, que nous résumons dans la fig. III-5.

Nom	Expression	Valeur	Description
p	101.325[kPa]	1.0133E5 Pa	Air pressure
T	25[degC]	298.15 K	Air temperature
R	8.3145[Pa*m ³ /(K*mol)]	8.3145 J/(mol-K)	Gas constant
c_DCM_air	100e-6*p/(R*T)	0.0040874 mol/m ³	DCM concentration in air
M_DCM	84.93[g/mol]	0.084930 kg/mol	Molar mass of DCM
K	10 ^{1.4821}	30.346	PIB/air partition consta...
rho_DCM_PIB	K*M_DCM*c_DCM_air	0.010534 kg/m ³	Mass concentration of ...
rho_PIB	0.918[g/cm ³]	918.00 kg/m ³	Density of PIB
E_PIB	10[GPa]	1.0000E10 Pa	Young's modulus of PIB
nu_PIB	0.48	0.48000	Poissons ratio of PIB
eps_PIB	2.2	2.2000	Relative permittivity of ...

Figure III-5 : Saisie des paramètres - Constantes – expressions.

III.3.4- Dessin de la géométrie

Dans cette étape, on représente la géométrie bidimensionnelle du modèle étudié comme le montre la fig. III-6.

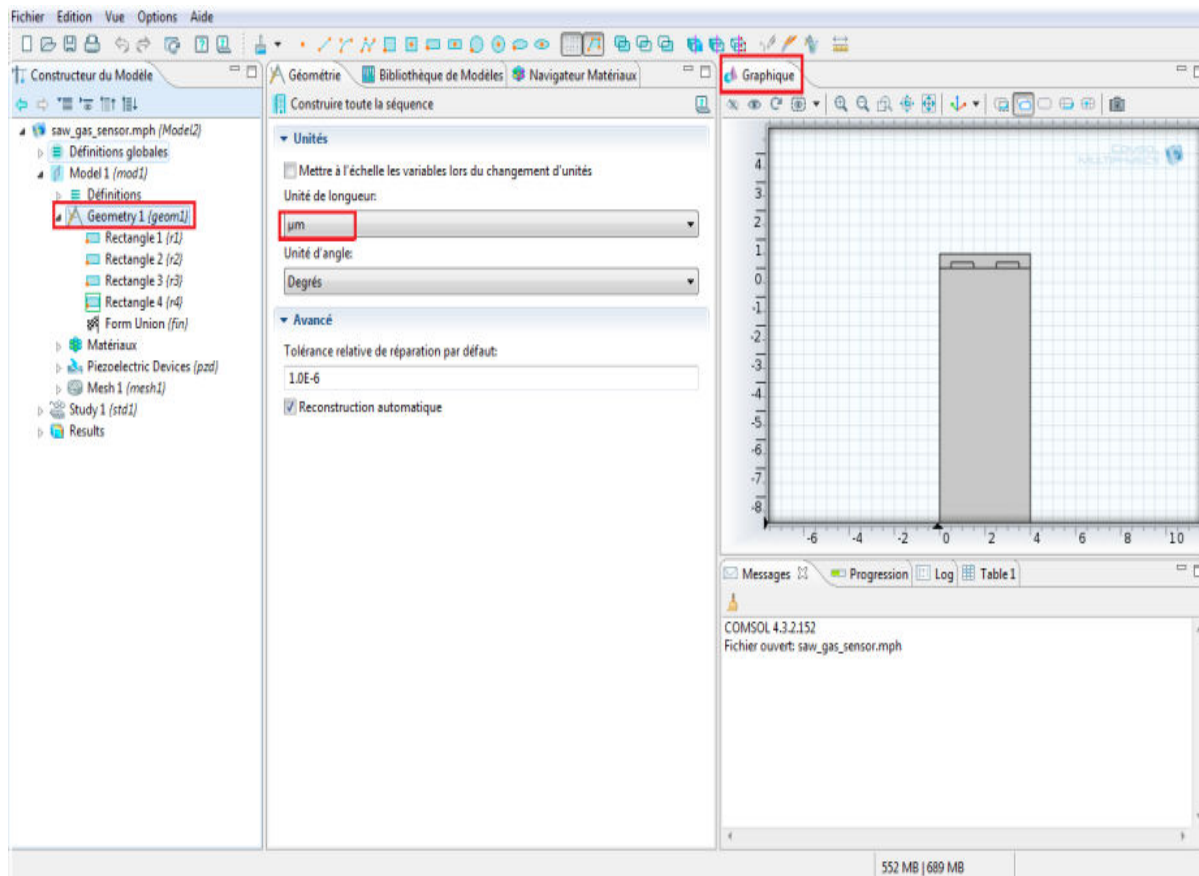


Figure III-6 : Dessin de la géométrie.

III.3.5- Propriétés des matériaux

Dans la rubrique « matériel », on charge les propriétés électromécaniques des matériaux. Leurs valeurs sont résumées dans le tableau III-4.

Property	Name	Value
Elasticity matrix (Ordering: xx, yy, zz, yz, xz, xy)	cE	{2.424e11, 0.752e11, 2.03e11, 0.752e11, 0.573e11, 2.03e11, 0[Pa], 0[Pa], 0[Pa], 0.752e11, 0.085e11, -0.085e11, 0[Pa], 0.595e11, 0[Pa], 0[Pa], 0[Pa], 0.085e11, 0[Pa], 0.595e11}
Coupling matrix (Ordering: xx, yy, zz, yz, xz, xy)	eES	{1.33, 0, 0, 0.23, 0, -2.5, 0.23, 0, 2.5, 0, -2.5, 0, 0, 0, 3.7, 0, 3.7, 0}
Relative permittivity	epsilonR	{28.7, 85.2, 85.2}
Density	rho	4647

Tableau III-4 : Propriétés des matériaux.

III.3.6- Propriétés physique des domaines

✚ **Matériau élastique linéaire** : On introduit les équations mécaniques des structures en définissant le matériau comme matériau élastique linéaire (voir fig. III-7).

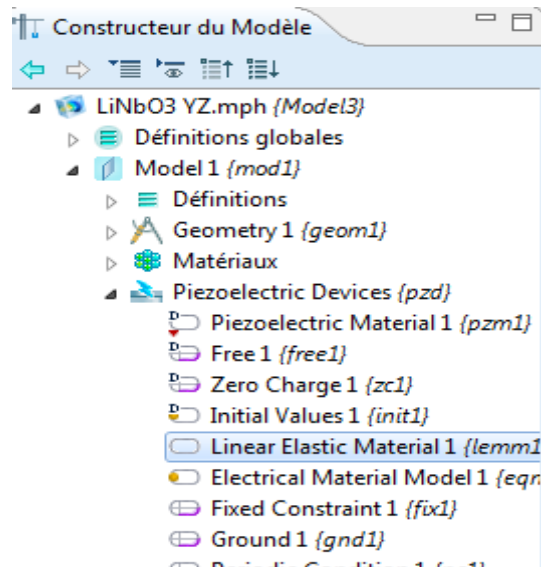


Figure III-7 : Matériau élastique linéaire.

- Propriété électrique (mise à la masse de la structure) :** La rubrique « Masse » permet de relier le potentiel de l'électrode fixe à la valeur 0, $V=0$. Comme le montre la fig. III-8.

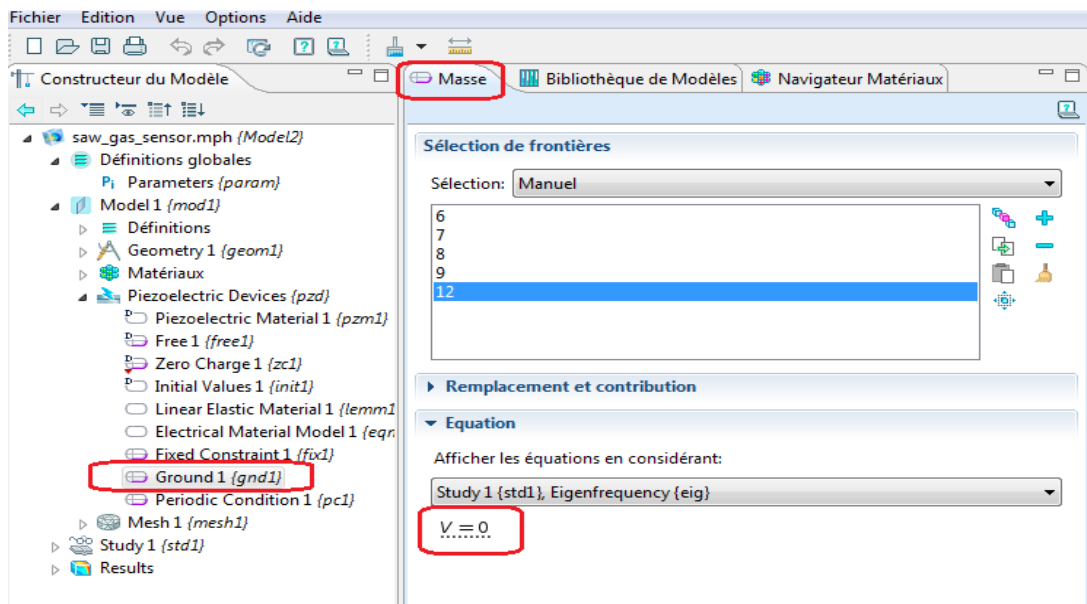


Figure III-8 : Propriété électrique.

- Conditions aux limites :** Dans la rubrique « Piezoelectric Devices », nous choisissons « periodic condition 1 » qui permet d'imposer les conditions de continuité sur les frontière sélectionnée (1, 3,16 et 17) (voir fig. III-9).

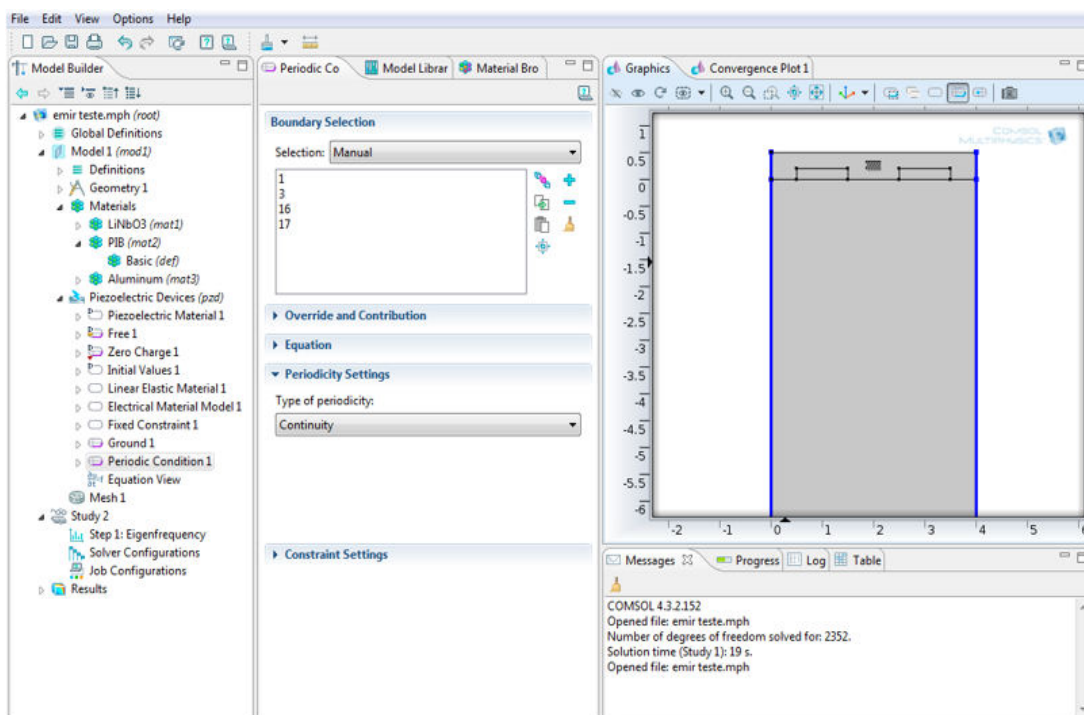


Figure III-9 : Conditions aux limites.

III.3.7- Maillage

Le maillage est une étape importante dans la résolution des équations aux dérivées partielles (EDP). Il consiste à la discrétisation du problème, par la méthode des éléments finis.

La fig. III-10 représente la structure maillée.

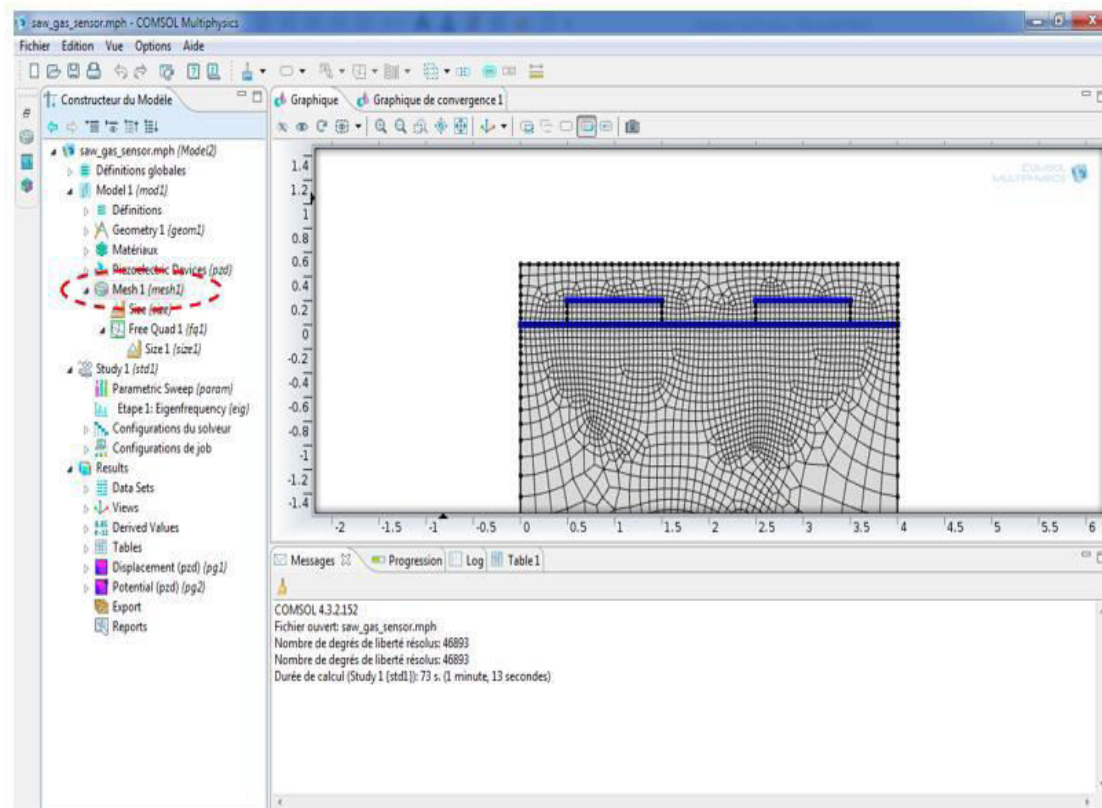


Figure III-10 : Maillage de la structure.

III.4- Résolution du problème

À partir de la rubrique « Résoudre » nous procédons à la résolution du problème, la fig. III.11 représente, le résultat de cette simulation. Cet affichage constitue la dernière étape de notre simulation qui est ou l’affichage des résultats de la simulation (Post-traitement). Le résultat de cette simulation, est représenté par la courbe de variation de la déformation en fonction de la fréquence de résonance (838.70 MHz), dans le cas du substrat LiNbO_3 YZ. Cette figure, montre que cette déformation est localisée superficielle et elle est dû essentiellement à l’absorption des molécules de gaz, au niveau de la couche sensible (PIB).

Afin de validé notre modèle, nous procédons à la comparaison de notre résultat à celui établi dans la littérature figure (III.11) [33]. Cette comparaison montre bien que les résultats sont similaires, ce qui permet la validation de notre modèle pour une épaisseur égale à $0.2\mu\text{m}$ et une largeur de $1\mu\text{m}$.

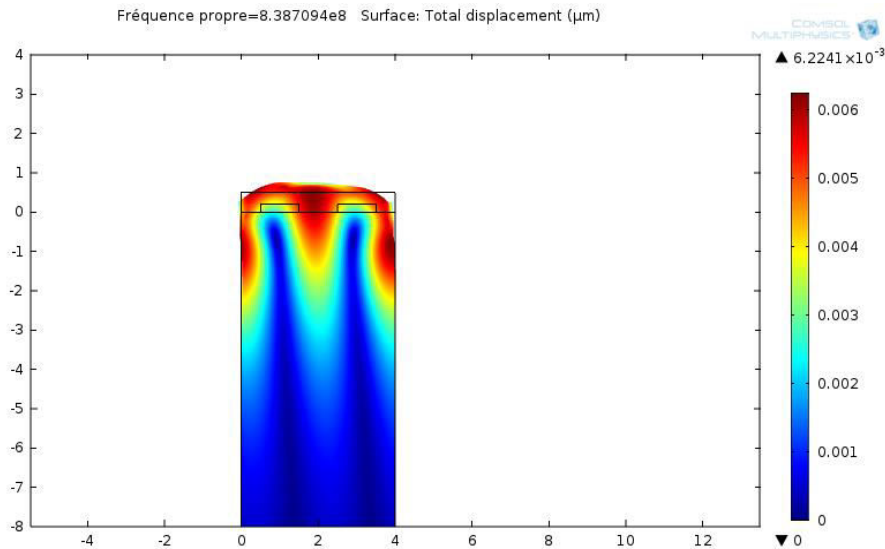


Figure III-11.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (838.70 MHz) pour l'épaisseur égal à $0.2\mu\text{m}$ et Largeur de $1\mu\text{m}$.
- substrat LiNbO_3 YZ-

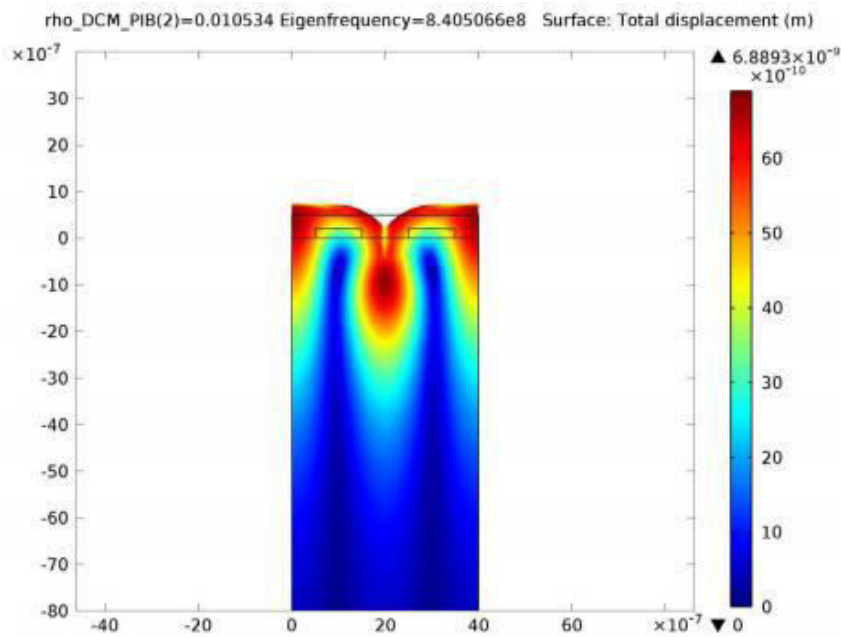


Figure III-11.b : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (840.50MHz).
- substrat LiNbO_3 YZ- [33]

III.4.1- Etude de l'effet de l'épaisseur de l'interdigité sur la réponse du capteur

Afin de déterminer l'influence de l'épaisseur de l'interdigité sur la réponse du capteur à base d'un substrat de LiNbO_3 YZ, nous allons simuler notre modèle pour différents valeurs de l'épaisseur : tels que $0.15\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}$ et $0.35\mu\text{m}$ avec une largeur de l'interdigité égale à $1\mu\text{m}$. Les variations du déplacement total en fonction de la fréquence constituent les résultats de nos simulation que l'en représente sur les fig. suivent :

➤ *Épaisseur égale à 0.15 μm*

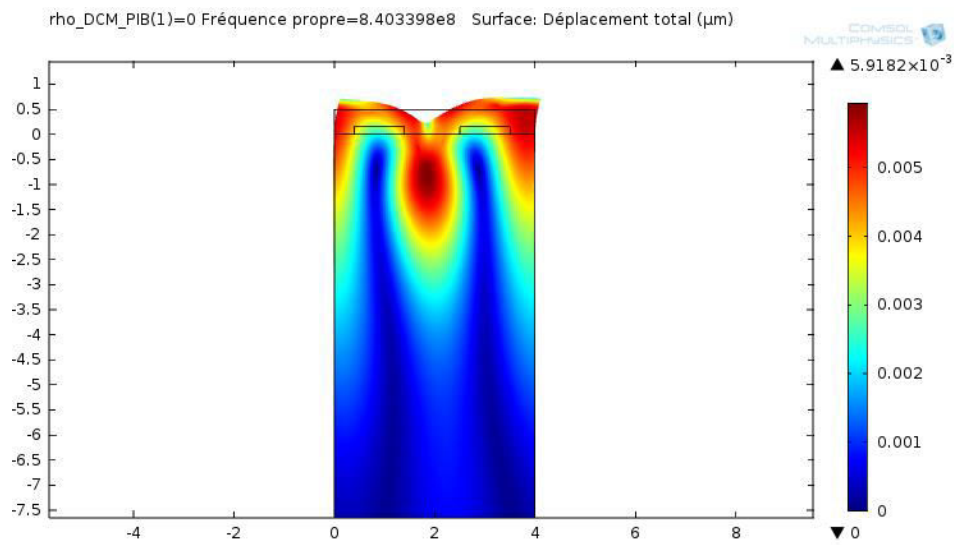


Figure III-12.a : *Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (840.33 MHz).*

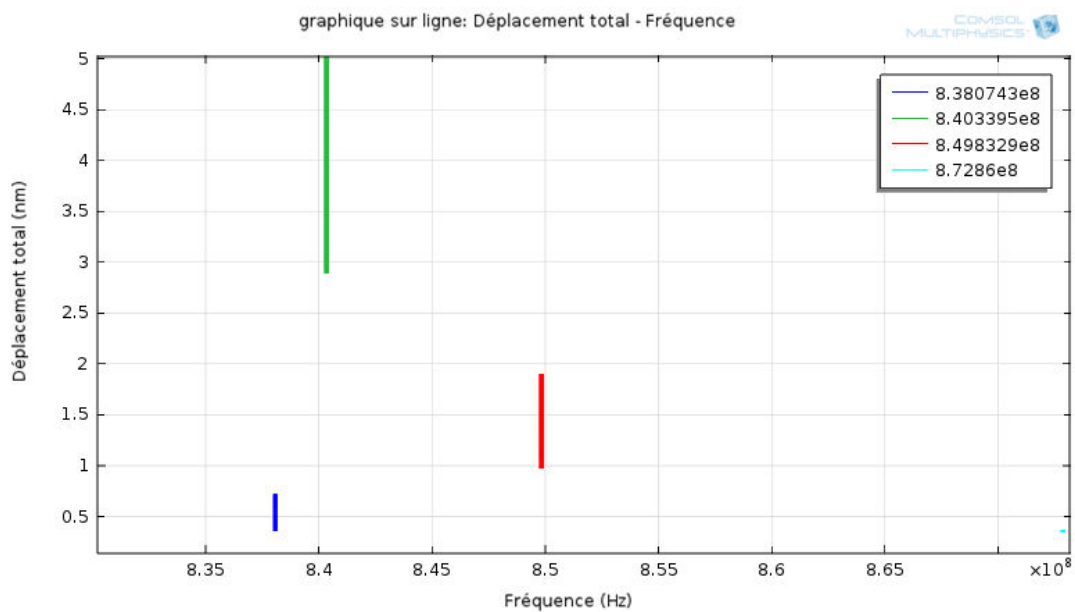


Figure III-12-b : *Variation de déplacement total en fonction de la fréquence.*

➤ *Épaisseur égale à 0.2 μm*

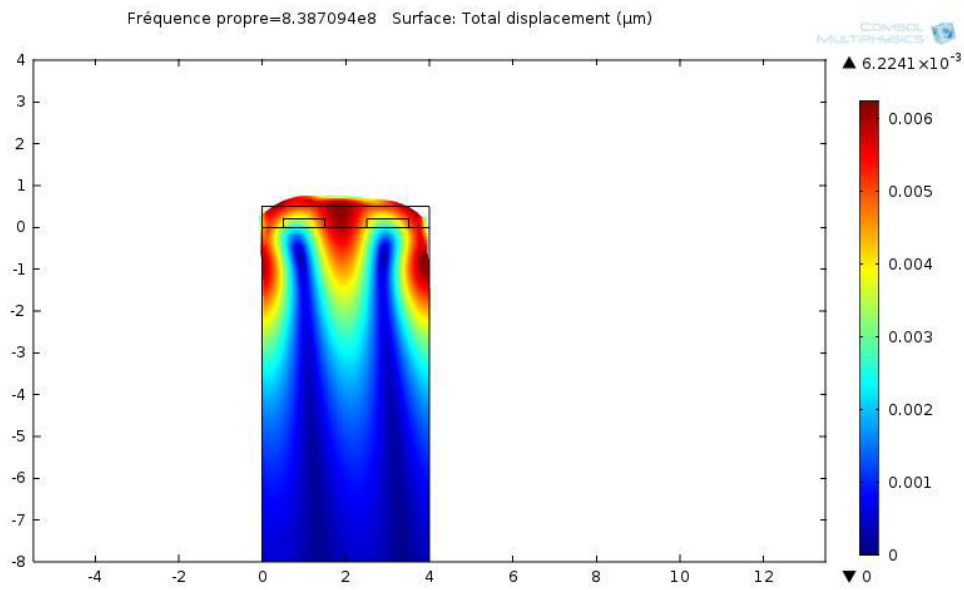


Figure III-13.a : *Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (838.7 MHz).*

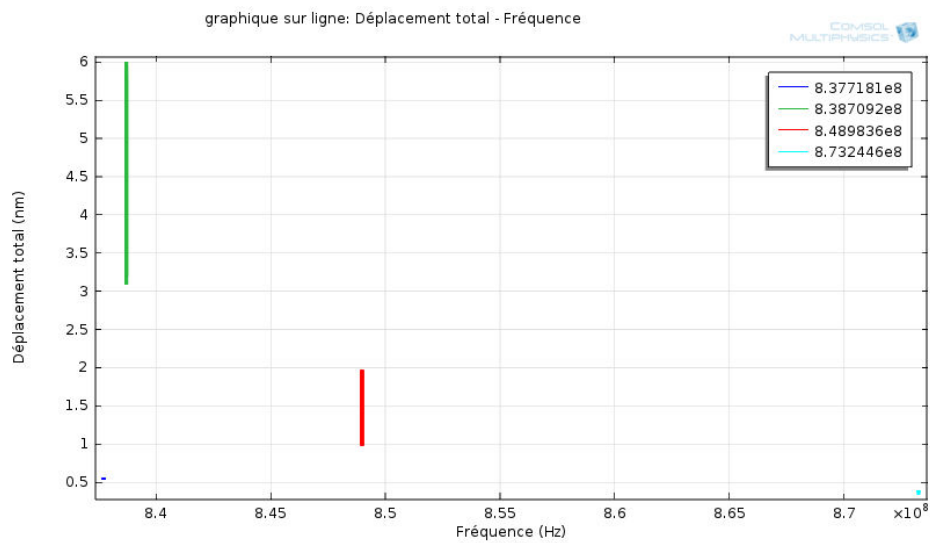


Figure III-13.b : *Variation de déplacement total en fonction de la fréquence.*

➤ *Épaisseur égale à 0.35 μm*

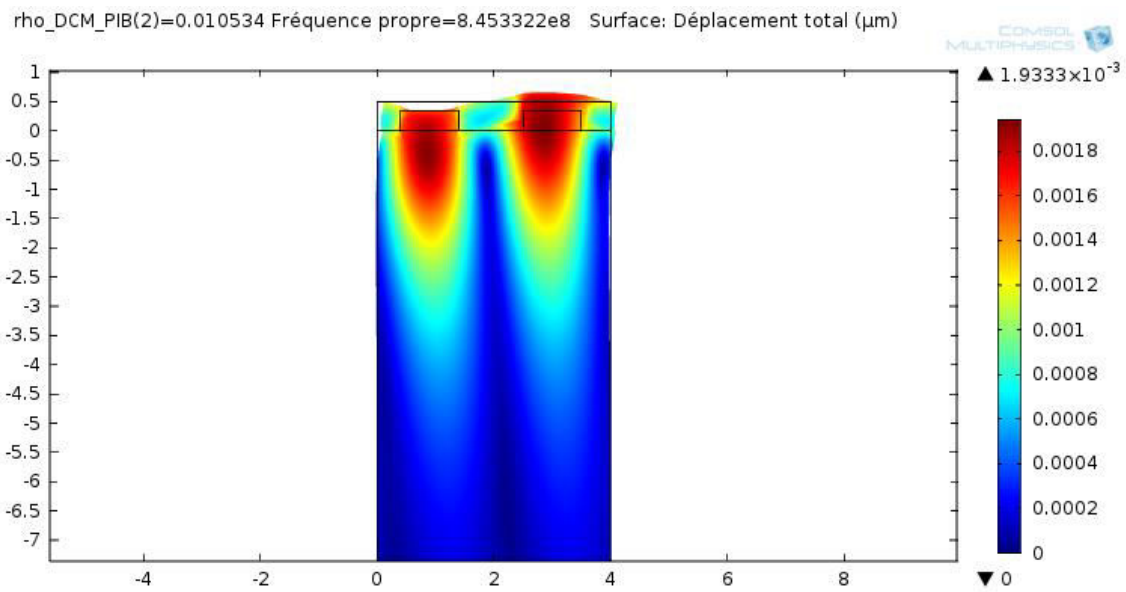


Figure III-14.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (845.33 MHz).

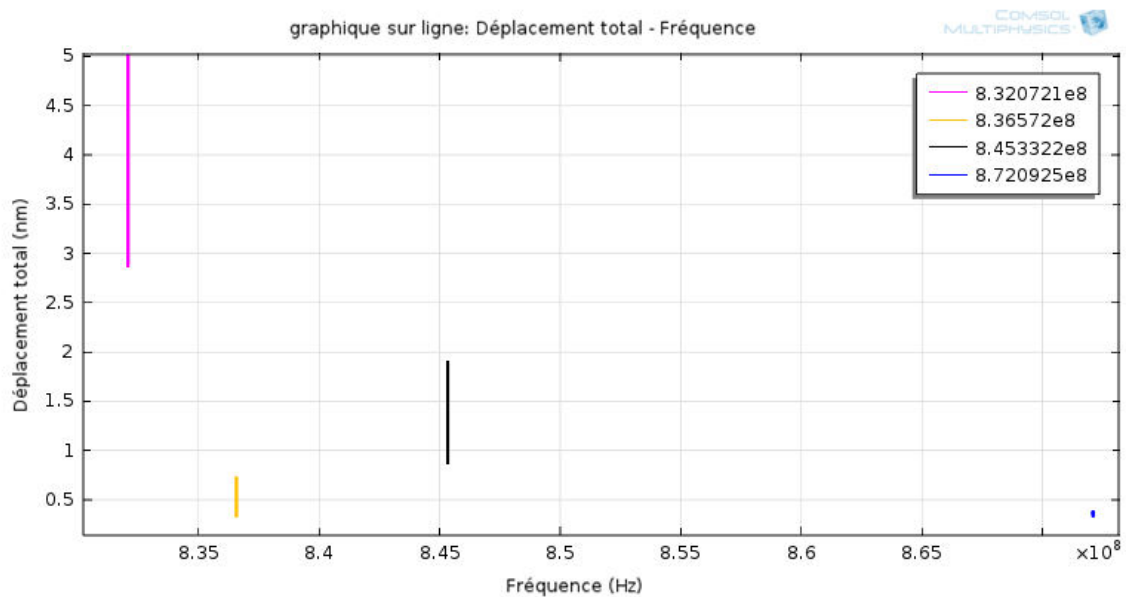


Figure III-14.b : Variation de déplacement total en fonction de la fréquence.

Les fig. III-12.b jusqu'à III-14.b, représentent les variations du déplacement total pour différentes épaisseurs (0.15 μm, 0.2 μm et 0.35 μm) en fonction de la fréquence. À partir de ces fig. on relève les valeurs maximales des fréquences de résonance pour des valeurs de déplacement total.

Tous les résultats de notre simulation sont regroupés dans le tableau III-5, où on représente la fréquence de résonance avant et après l'absorption de gaz DCM et le décalage de fréquence de résonance Δf .

Où, f_0 et f sont respectivement, les fréquences de résonance avant et après la modification de la masse volumique.

L'absorption du gaz DCM par la couche sensible engendre une légère augmentation de sa masse volumique. Cette augmentation entraîne, à son tour, un changement des fréquences.

Substrat LiNbO ₃ YX	Masse volumique $\rho_{(DCM, PIB)}$	Fréquence de résonance f (MHz)	$ \Delta f = f - f_0$ (Hz)
Epaisseur = 0.15 μm	Sans la masse	840.3398345050267	300
	Avec la masse	840.3395345050267	
Epaisseur = 0.2 μm	Sans la masse	838.7094143701544	220.647
	Avec la masse	838.7091937230192	
Epaisseur = 0.35 μm	Sans la masse	845.3322786145351	110.751
	Avec la masse	845.3321678625631	

Le tableau III-5 : *Le décalage de fréquence par rapport à chargement de masse pour différent l'épaisseur de l'interdigité.*

à chargement de l'épaisseur du substrat.

Ces résultats de tableau III-5, montrent que la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'interdigité.

III.4.2- Etude de l'effet de la largeur de l'interdigité sur la réponse du capteur

Pour déterminer l'influence de la largeur de l'interdigité sur la réponse du capteur SAW à base d'un substrat de LiNbO₃ YZ, nous allons simuler notre modèle pour différents valeurs de la largeur : tels que 0.9 μm , 1 μm et 1.2 μm avec une épaisseur de l'interdigité égale à 0.2 μm . Les variations du déplacement total en fonction de la fréquence constituent les résultats de nous simulation que l'en représente sur les fig. suivent :

➤ *Largeur égale à 0.9 μm*

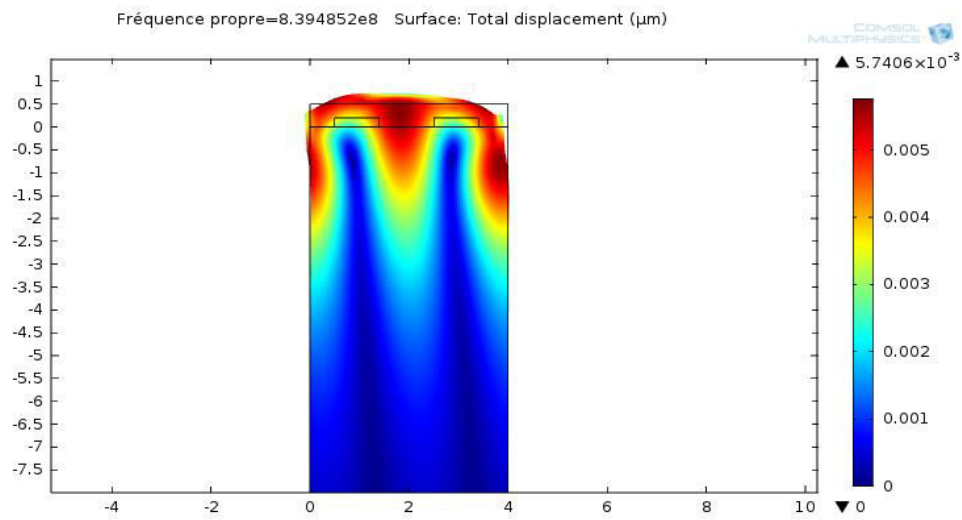


Figure III-15.a : *Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (839.48 MHz).*

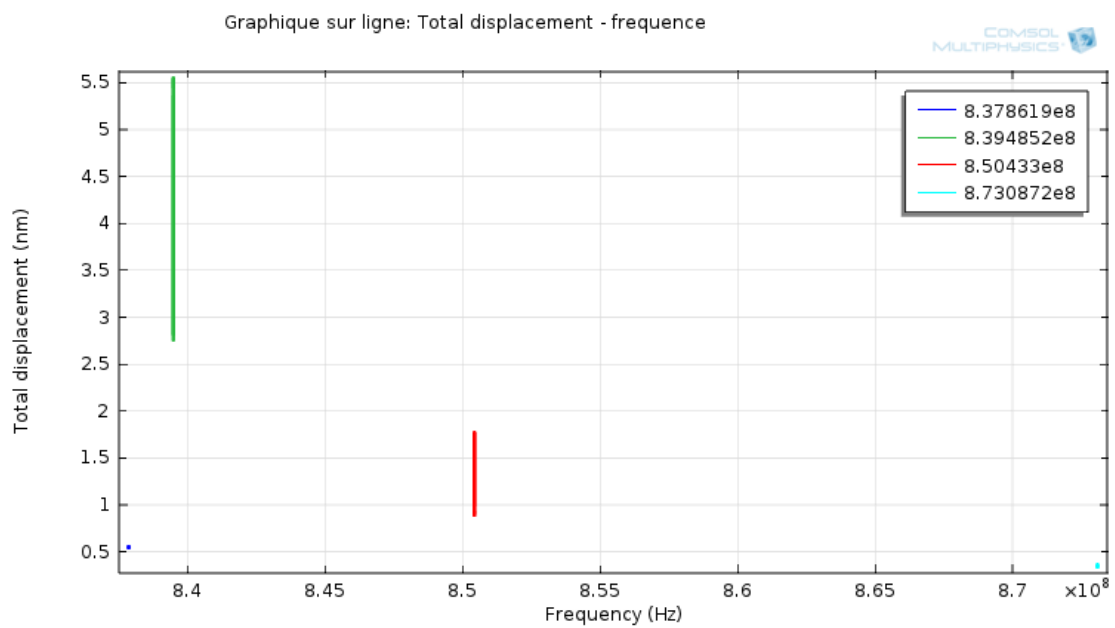


Figure III-15.b : *Variation de déplacement total en fonction de la fréquence.*

➤ *Largeur égale à 1 μm*

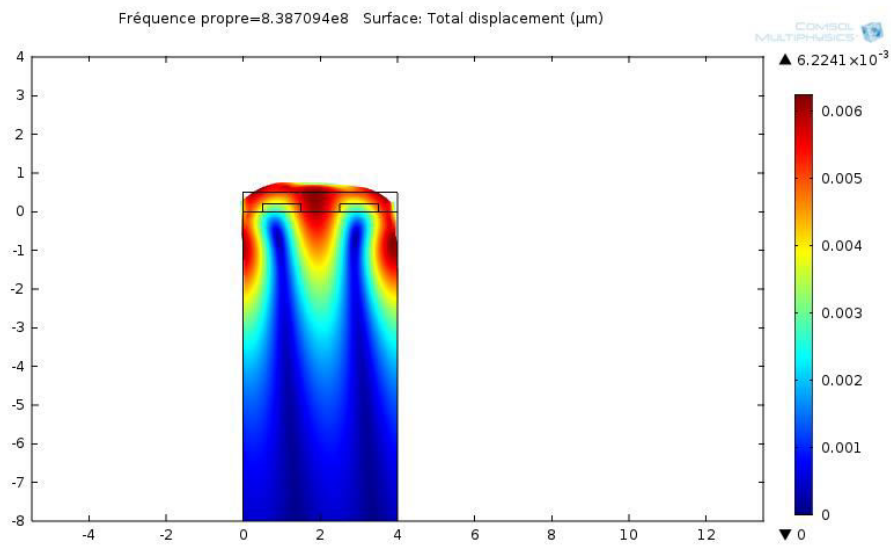


Figure III-16.a : *Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (838.7 MHz).*

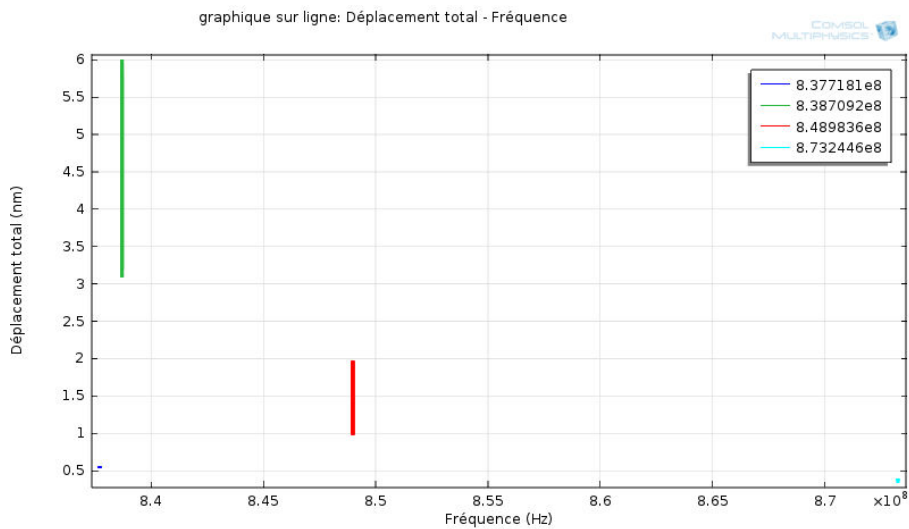


Figure III-16.b : *Variation de déplacement total en fonction de la fréquence.*

➤ *Largeur égale à 1.2 μm*

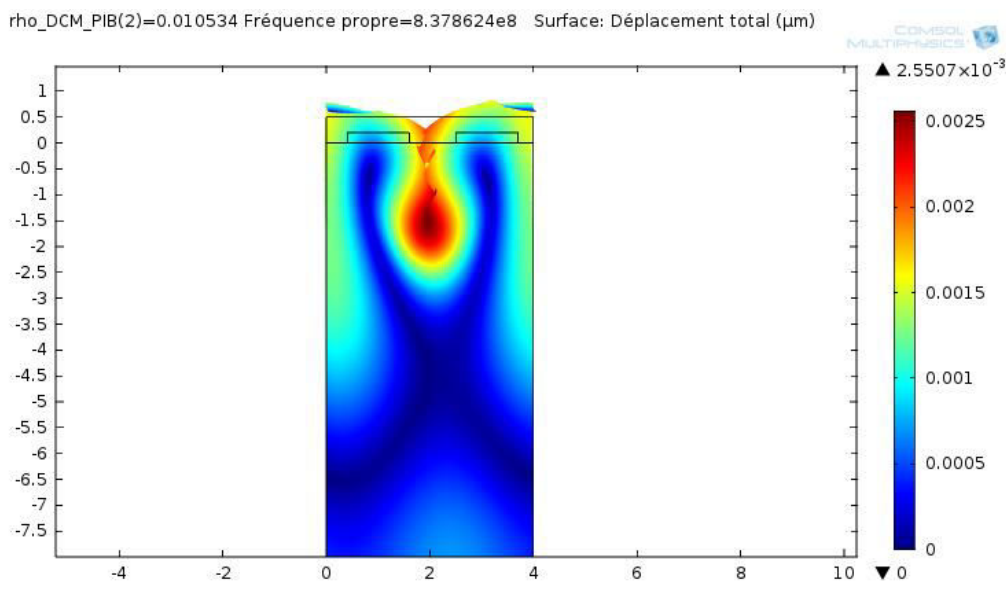


Figure III-17.a : *Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (837.68 MHz).*

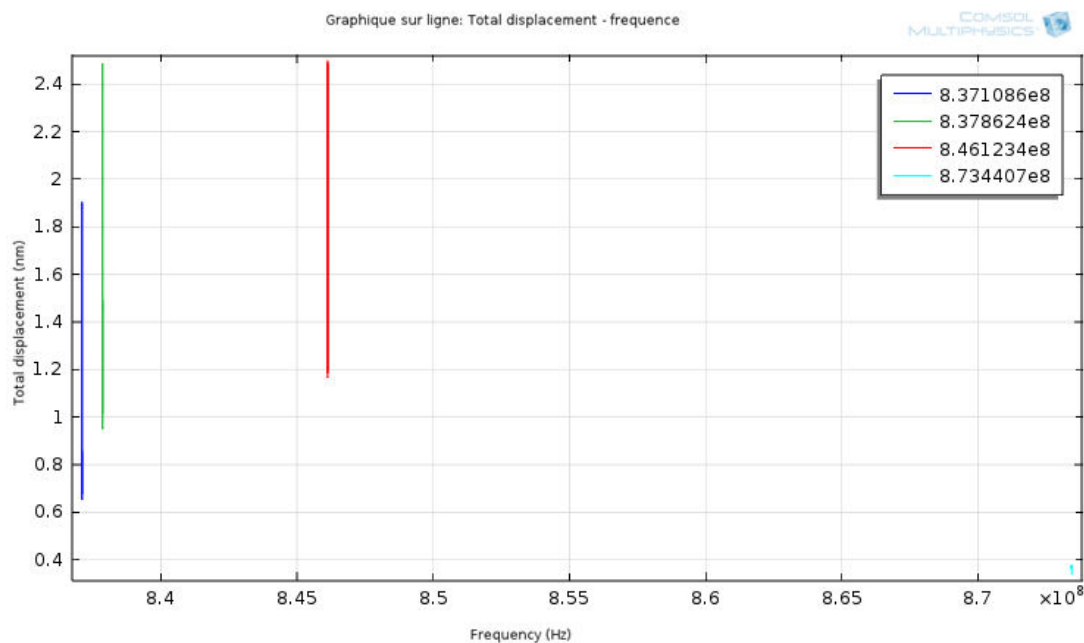


Figure III-17.b : *Variation de déplacement total en fonction de la fréquence.*

Les fig. III-15.b jusqu'à III-17.b, montrent les variations du déplacement total pour différentes largeurs (0.9 μm, 1 μm et 1.2 μm) en fonction de la fréquence. À partir de ces fig. on relève les valeurs maximales des fréquences de résonance pour des valeurs de déplacement total.

Le tableau III-6 regroupe les valeurs de décalage de la fréquence par rapport aux chargements de masse pour différentes valeurs de la largeur de l'interdigité, où on représente la fréquence de résonance avant et après l'absorption de gaz DCM et le décalage de fréquence de résonance Δf .

Où, f_0 et f sont respectivement, les fréquences de résonance avant et après la modification de la masse volumique.

L'absorption du gaz DCM par la couche sensible engendre une légère augmentation de sa masse volumique. Cette augmentation entraîne, à son tour, un changement des fréquences.

Largeur de l'interdigité	Masse volumique $\rho_{(DCM, PIB)}$	Fréquence de résonance f (MHz)	$ \Delta f = f - f_0$ (Hz)
0.9 μm	Sans la masse	839.4854506108927	224.316
	Avec la masse	839.4852262948078	
1 μm	Sans la masse	838.7094143701544	220.647
	Avec la masse	838.7091937230192	
1.2 μm	Sans la masse	837.862525698049	140.673
	Avec la masse	837.8623850242041	

Le tableau III-6 : Le décalage de fréquence par rapport à chargement de masse pour différentes largeurs de l'interdigité.

Ces résultats de tableau III-6, montrent que la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la largeur de l'interdigité.

III.5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé la procédure de simulation sous environnement COMSOL multi physiques. Et nous avons réalisé la simulation 2D d'un capteur SAW. Qui constitue une bonne approximation de la résolution du problème. Les résultats obtenus sont similaires à ceux établis dans la littérature, ce qui a permis la validation de notre modèle. Afin d'optimiser les performances de notre dispositif, nous avons effectué une étude géométriques

de notre capteur et voir ces influences sur le décalage de la fréquence de résonance. Cette dernière montre que l'augmentation de l'épaisseur et la largeur de l'interdigité entraîne une diminution de la fréquence de résonance de notre capteur SAW.

Conclusión Générale

conclusion générale

Dans ce manuscrit, nous avons réalisé la simulation du comportement électromécanique des capteurs chimiques en milieu gazeux, sous environnement COMSOL multi physiques. Nous avons entamé ce travail par un résumé succinct sur les capteurs de gaz à ondes acoustiques, notamment la sorption de molécule de gaz par une surface solide. Nous avons aussi donné les principaux fondements théoriques nécessaires à la compréhension de leur principe de fonctionnement ainsi que leurs principales caractéristiques. Notre contribution, s'est focalisée sur la détermination des effets des paramètres géométriques sur la réponse d'un capteur SAW à base de LiNbO_3 .

En premier temps, nous avons rappelé les notions théoriques des capteurs chimiques de gaz. Ce qui nous a permis de bien cerner les mécanismes de diffusion d'un gaz dans un solide tel que : adsorption, absorption et la désorption. Nous avons développé des généralités sur le phénomène de piézoélectricité, sa mise en équation, les principaux matériaux piézoélectriques et la propagation des ondes acoustiques de surface dans les matériaux piézo-électriques. Nous avons aussi présenté la description des dispositifs à ondes acoustiques de surface SAW. Puis nous avons développé le principe de fonctionnement des transducteurs interdigités IDT et le principe de détection à l'effet de masse.

Après avoir rappelé la procédure de simulation sous environnement COMSOL multi physiques, nous avons réalisé la simulation 2D d'un capteur SAW. Qui constitue une bonne approximation de la résolution du problème. Les résultats obtenus sont similaires à ceux établis dans la littérature, ce qui a permis la validation de notre modèle. Puis nous avons effectué une étude géométrique de la structure du capteur SAW pour différents valeurs de l'épaisseur et de largeurs. Cette étude montre que le capteur SAW à base LiNbO_3 une augmentation de l'épaisseur et la largeur de l'interdigité entraîne une diminution de la fréquence de résonance de notre capteur SAW.

Comme perspectives, il serait intéressant de faire une étude au paramétrage des substrats et la nature de gaz absorbé dans le but d'optimiser les performances du capteur SAW.

Bibliographiques

- [1]. **F. Ménil**, « Livre micro capteurs de gaz », Lavoisier, 2008.
- [2]. **N. GUERMAT**, « Élaboration des couches minces sensibles à la présence de vapeur d'eau
- [3]. **N. YOBOUE, Pamela Marie Josèphe**, Thèse doctorat de l'université de Toulouse « Etude technologique pour l'amélioration des performances d'un capteur de gaz à oxyde métallique », 2010.
- [4]. **P. MENINI**, « Du Capteur de Gaz à Oxydes Métalliques vers les Nez Electroniques sans Fil » Habilitation à diriger des recherches de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2011.
- [5]. **L. FADEL**, Thèse doctorat de l'université de bordeaux i « contribution à l'utilisation de microcapteurs chimiques à base de micropoutres résonantes pour la détection d'espèces chimiques en milieu gazeux », 2004.
- [6] **Bouharouat Ali**, «*Élaboration d'un capteur pour la détection des composés organiques volatils à base d'une microbalance à quartz*», Thèse de Doctorat, Université de Constantine 1,(2013).
- [7]. **S. LE DREN**, Thèse doctorat de l'université de l'institut national des sciences appliquées de Lyon, « Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques », 2000.
- [8] **Francis Ménil**, «*Microcapteurs de gaz*», Lavoisier 75008, Paris,(2008).
- [9] **R. M. White et F. W. Voltmer**, «*Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves* », Applied Physics Letters, Vol. 7, no. 12, p. 314, (1965).
- [10] **R. Salut**, «*étude des moyens de lithographie haute résolution pour la fabrication de résonateurs a ondes élastiques de surface : application aux sources embarquées* », Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, (2011)
- [11] **A. Kateb**, «*Analyse du signal micro-onde acoustique via la transformée en ondelettes* », Mémoire de Magister, Université de Batna, (2013).
- [12]. **R. M. White et F. W. Voltmer**, « Direct Piezoelectric Coupling to Surface Elastic Waves », Applied Physics Letters, vol. 7, no. 12, p. 314, 1965.
- [13]. **D. Royer et E. Dieulesaint** : « Ondes élastiques dans les solides, Propagation libre et guidées » Tome 1, Masson, 1996.
- [14]. **O. Mareschal**, Thèse doctorat de Université Paris-Est Ecole Doctorale Mstic, « Étude d'un résonateur piézoélectrique à ondes acoustiques de volume en technologie film mince », 2011.

- [15]. **D.S. Ballantine, R.M. White, S.J. Martin et al.**, "Acoustic wave sensors – Theory, design and physico-chemical applications", Academic Press, 1997.
- [16]. **C. ZIMMERMANN**, Thèse doctorat de l'université de BORDEAUX I, « conception réalisation et études de microcapteurs a ondes de love pour applications en milieu gazeux cas de la détection de composes organophosphorés», 2002.
- [17]. **I. A. Victorov**. « Rayleigh and Lamb Wave », plenum Press, New York, 1967.
- [18]. **L. BLEUSTEIN**, « A new Wave in piézoélectrique mat »rials, Applied Physics Letters, vol.13, p.412-413, 1968.
- [19]. **Y.V. GULYAEV** « Electroacoustic surface waves in solids », JEPT Letters, vol. 9, P 37-38, 1969.
- [20]. **C. DEJOURS**, « Capteurs acoustiques à modes de plaque transverses horizontaux. Application à la détection en milieux liquides et gazeux », thèse doctorat, université bordeaux 1, 1994.
- [21]. **P. MAZEIN**, Thèse doctorat de l'université de BORDEAUX I, « Étude de dispositifs à ondes de Love par modélisation numérique de la propagation d'ondes acoustiques. Application à l'optimisation de structures et à la caractérisation de matériaux en vue de la réalisation de capteurs chimiques», 2005.
- [22]. **B.A. Auld**, "Acoustic fields and waves in solids", 2 volumes, Krieger, 1990.
- [23]. **L. Rayleigh**: « On waves propagated along the plane surface of elastic solid », Proc. Lond. Math. Soc., 17, 1885).
- [24] <http://fr.lamit.ro/systeme-avertissement-seisme.htm>. [En ligne].
- [25]. **M. Mohamed, El Gowini and Walied A. Moussa**, « A Reduced Three Dimensional Model for SAW Sensors Using Finite Element Analysis », Sensors, 9, 9945-9964, 2009.
- [26]. **D. REBIÈRE**, Thèse de doctorat Université Bordeaux 1, « Capteurs à ondes acoustiques de surface. Application à la détection des gaz », 1992.
- [27]. **H. WOHLTJEN**, « mechanism of operation and design considerations for surface acoustic wave device vapour sensors », Sensors and Actuators, 5, 307- 325, 1984.
- [28]. **F. Anne AZAN**, Thèse doctorat de l'université de BORDEAUX I, « Etude de microcapteurs à ondes acoustiques dédiés à la détection fine de produits chimiques à l'échelle laboratoire et industrielle. Application à la détection de monomères résiduels et à la mesure de cinétique en réacteurs. », 2005.
- [29]. **S. Ahmadi. F. Hassani, C. Korman, M. Rahaman and M. Zaghloul** « Characterization of Multi- and Single-layer Structure SAW Sensor », Sensors, Proceedings of IEEE, vol. 3, pp. 1129–1132, 2004.

[30]. **L. Walter Bond**. « The mathematics of the physical properties of crystals », the bell System Technical Journal, vol XXII, 1943.

[31]. **K. Han**, « Mass sensitivity evaluation and device design of a LOVE wave device for bond rupture biosensors using the Finite Element Method», IEEE Sensors Journal, 2014.

[32]. **A .H. Fahmy**, E.L. Adler, « Transformation of tensor constants of anisotropic materials due to rotations of the co-ordinate axes », ROC. IEE, Vol. 122, No. 5, 1975.

[33]. **K. Srinivasa Rao**, « Design and analysis of saw gas sensor », Scholars Research Library European Journal of Applied Engineering and Scientific Research, 2012.

<u>Figure I-1 : Principe de fonctionnement des capteurs chimiques [1].</u>	3
<u>Figure I-2 : Description d'un capteur à onde acoustique de surface (SAW) [7].</u>	6
<u>Figure I-3 : Procédé de gravure et développement d'interdigité [1].</u>	7
<u>Figure I-4 : Descriptions du cristal à quartz.</u>	8
<u>Figure I-5 : Vue d'une coupe transversale d'un quartz [7].</u>	8
<u>Figure I-5 : Schéma de principe de la résonance de plasmon [2].</u>	9
<u>Figure I-6 : Schéma de structure d'électrodes interdigitées.</u>	11
<u>Figure I-7 : Représentation du temps de montée d'un capteur chimique.</u>	12
<u>Figure I-8 : Absorption, adsorption et désorption d'un gaz dans un solide.</u>	13
<u>Figure I-9 : Principe de la physisorption d'une molécule sur une surface [2].</u>	14
<u>Figure I-10: Principe de la chimisorption d'une molécule sur une surface [2].</u>	15
<u>Figure I-11 : Différence entre la chimisorption moléculaire et dissociative [2].</u>	15
<u>Figure I-1 : L'effet piézoélectrique pour un matériau piézoélectrique [Bou].</u>	16
<u>Figure II-2 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité [ref].</u>	17
<u>Figure II-3: Propagation d'ondes planes dans un solide [ref].</u>	26
<u>Figure II-4 : Polarisation des ondes susceptibles de se propager suivant \vec{n} (milieu anisotrope).</u>	27
<u>Figure II-5 : Gauche, déplacement des particules au passage d'une onde de Rayleigh. Droite, déplacement des particules lors de la propagation d'une onde de Bleustein-Gulyaev [28,29].</u>	28
<u>Figure II-7 : Gauche, amplitude des composantes longitudinales et transverses verticales dans le cas de la propagation d'une onde de Stoneley. Droite, déplacement dans le cas de la propagation d'une onde de Love [17].</u>	29
<u>Figure II-8 : Onde de Rayleigh</u>	30
<u>Figure II-9: Onde SSBW (Surface Skimming Bulk Wave).</u>	31
<u>Figure II-10 : Electrode interdigité déposée à la surface d'un substrat piézoélectrique.</u>	32
<u>Figure II-11 : Principe et caractéristiques d'un dispositif à ondes acoustiques.</u>	32

<u>Figure II-12 : Principe de détection par capteur à ondes</u>	33
<u>Figure III-1 : Principe de fonctionnement du capteur 'effet de masse'</u>	36
<u>Figure III-2: Géométrie de la structure 3D/2D.</u>	37
<u>Figure III-3 : Choix de la dimension.</u>	41
<u>Figure III-4 : Fenêtre du Navigateur de modèles : choix du modèle.</u>	41
<u>Figure III-5 : Saisie des paramètres - Constantes – expressions.</u>	42
<u>Figure III-6 : Dessin de la géométrie.</u>	43
<u>Figure III-7 : Matériau élastique linéaire</u>	44
<u>Figure III-8 : Propriété électrique.</u>	45
<u>Figure III-9 : Conditions aux limites.</u>	45
<u>Figure III-10 : Maillage de la structure.</u>	46
<u>Figure III-11.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (838.70 MHz) pour l'épaisseur égal à 0.2µm et Largeur de 1µm.</u>	47
<u>- substrat LiNbO₃ YZ-</u>	47
<u>Figure III-11.b : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (840.50 MHz). - substrat LiNbO₃ YZ- [33]</u>	47
<u>Figure III-12.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (840.33 MHz).</u>	48
<u>Figure III-13.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (838.7 MHz).</u>	49
<u>Figure III-13.b : Variation de déplacement total en fonction de la fréquence</u>	49
<u>Figure III-14.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (845.33 MHz).</u>	50
<u>Figure III-14.b : Variation de déplacement total en fonction de la fréquence</u>	50
<u>Figure III-15.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (839.48 MHz).</u>	52
<u>Figure III-15.b : Variation de déplacement total en fonction de la fréquence</u>	52

Figure III-16.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (838.7 MHz). 53

Figure III-16.b : Variation de déplacement total en fonction de la fréquence..... 53

Figure III-17.a : Variation de la déformation en fonction de fréquence de résonance (837.68 MHz). 56

RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous avons réalisé la simulation 2D d'un micro-capteur à ondes acoustique de surface SAW sous environnement COMSOL multi- physique™. Un capteur SAW est constitué d'un transducteur interdigité (IDT) gravé sur un matériau piézoélectrique et recouvert par une couche sensible polyisobutylène (PIB). Cette couche sensible est choisie pour ses affinités particulières avec les espèces à détecter CH₂Cl₂ dichlorométhane (DCM). Notre contribution, s'est focalisée sur la détermination des effets des paramètres géométriques sur la réponse d'un capteur SAW à base de LiNbO₃. Cette étude montre que l'augmentation de l'épaisseur et la largeur de l'interdigité entraîne une diminution de la fréquence de résonance de notre capteur SAW.

Mots clés : Fréquence propre, SAW, COMSOL Multi physique.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بمحاكاة ثنائية الأبعاد من سطح موجة الاستشعار الصوتية الصغيرة SAW باستخدام COMSOL Multiphysique. يتكون جهاز استشعار SAW من محول بين الأصابع (IDT) محفور على مادة كهروضغطية مغطاة بطبقة حساسة (PIB). يتم اختيار هذه الطبقة الحساسة للتقارب خاص مع الأنواع ليتم الكشف عن ثنائي كلورو ميثان (CH₂Cl₂ (DCM)). وقد ركزت مساهمتنا في تحديد آثار المعايير الهندسية على استجابة جهاز استشعار SAW على أساس LiNbO₃. وتبين هذه الدراسة أن الزيادة في سمك وعرض بين الأصابع ينطوي على انخفاض في وتيرة الرنانة من هذا الاستشعار SAW.