



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université - BLIDA 1**

**Faculté de Technologie  
Département d'Electronique**

**Mémoire de fin d'étude**  
Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER 2**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Microélectronique, Microsystèmes et conception de circuits

Presenté par : IKHLEF Oussama

**Thème**

**Etude et simulation d'une structure à  
peignes inter-digités (IDC)**

Devant le jury composé de :

Mme	ASSAD Zakia	C. Cours	Président
M.	BOUNEMRI	MA	Examineur
M.	KHALES Hammouche	Ingénieur Principal chez CDTA	Encadreur
Mme	BOUGHERIRA Hamida	MA	Co-encadreur

2014-2015

*Je dédie ce mémoire,*

*à tous ceux et toutes celles  
qui m'ont accompagné et soutenu  
durant cette année de formation*

## **Remerciements**

Ce travail a été réalisé au sein de l'équipe MEMS & Sensors de la Division Microélectronique et Nanotechnologie du CDTA.

J'adresse tout d'abord mes remerciements les plus sincères, au Mme Bougherira Hamida, qui a très volontiers accepté d'être le promoteur de ce mémoire et m'a donné de précieux conseils.

Je remercie également Mr KHALES Hammouche pour sa grande connaissance dans le domaine, ainsi que son expérience qui a joué un rôle très important dans le déroulement de ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à tout l'équipe MEMS & sensors de la Division Microélectronique et Nanotechnologie du CDTA pour leurs encouragements et pour l'ambiance agréable tout au long de ce stage

Je tiens à remercier la direction du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), ainsi que la Faculté des Sciences et Techniques de l'université Blida 1

Je tiens à remercier tous les gens qui ont contribué à la réussite de ce travail

IKHLEF Oussama

# Table des matières

## Introduction

---

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : La structure inter-digitée

---

I Introduction .....	2
I.1 Etat de l'art .....	2
I.2 Structure inter-digitée .....	2
I.3 Principe de fonctionnement de capteurs inter-digités.....	4
I.4 Domaines d'applications des capteurs inter-digités .....	8
I.4.1. Capteurs de Gouttelettes micro-fluidiques.....	8
I.4.2. Micro filtre intelligent.....	9
I.4.3. Le super-condensateur inter-digité.....	10
I.4.4. Condensateurs interdigitaux planaire.....	10
I.5 Conclusion .....	11

## Chapitre II : Méthodes analytiques

---

II Introduction .....	12
II.1 Paramètres fondamentales.....	12
II.2 Méthodes analytiques.....	14
II.2.1 Transformation conforme (Conformal Mapping).....	14
II.2.1.1 Définition.....	14
II.2.1.2 Limites d'applications.....	17
II.2.2 Modèle de Chen.....	17
II.2.2.1 Définition.....	17
II.2.2.2 Limites d'applications.....	18
II.2.3 Modèle de Igreja et Diaz.....	18

II.2.3.1 Définition.....	18
II.3 Influence des paramètres géométriques et physiques sur une structure IDC.....	20
II.3.1 Influence de la variation de la largeur des électrodes W.....	20
II.3.2 Influence de la variation de l'espace entre-électrode S.....	21
II.3.3 Influence de la variation de la longueur des électrodes L.....	22
II.3.4 Influence de la variation de nombre des électrodes N.....	22
II.3.5 Influence de la variation de la permittivité du matériau sous test $\epsilon_{mst}$ .....	23
II.4 Conclusion.....	23

## **Chapitre III : Méthodes numériques**

---

III.1 Introduction.....	24
III.2 Simulation sous Comsol multiphysiques.....	24
III.3 Exemple de simulation d'un IDC en 2D.....	25
III.4 Exemple de simulation d'un IDC en 3D.....	26
III.5 La fréquence optimale pour mesurer une capacité IDC.....	27
III.6 Test expérimentale sous PCB.....	27
III.6.1 Logiciel EAGLE.....	28
III.6.2 Test des Structures réalisés.....	29
III.7 Conclusion.....	30

## **Conclusion générale**

---

IV Conclusion générale .....	31
Bibliographie	
Annexes	

# Introduction Générale

## I. Introduction générale

Dans un monde qui vit une avancée technologique sans précédent, il y a une forte demande pour la miniaturisation. Afin de produire des dispositifs moins chers, fiables, maniables, de faible consommation d'énergie et de mesures en temps réel.

Les microsystèmes sont définis comme étant des objets complexes hautement intégrés, qui peuvent exécuter des tâches intelligents. Ces dispositifs peuvent faire appel à différents domaines physiques mécanique, optique, chimie, fluide, biologie, etc. Leur taille varie du centimètre à la dizaine de micromètres et peuvent être intégrés dans des systèmes plus grands. Ils sont utilisés dans différentes disciplines : électronique, informatique, traitement de l'information, énergie. Ils sont appelés selon l'appellation Américaines MEMS (Micro – Electro - Mechanical - Systems) vue qu'au départ ils incluent des parties mobiles (ressorts poutres, rotors, etc.). Avec le développement et l'insertion de nouvelles fonctionnalités suivant le domaine d'applications, on a des nouvelles nominations telles : pour l'optique (MOEMS), pour les communications (RF-MEMS) et le secteur biomédical (BIO-MEMS).

Dans un microsystème, un capteur constitue le premier élément de la chaîne qui assure le contact direct avec l'environnement physique. L'extraction de la mesure d'une propriété physique qui peut être une concentration, humidité, température, vitesse, accélération ou autre est traduite en un signal électrique suivant une transduction capacitive, résistive, piézorésistive, piézoélectrique. Il existe une forte demande pour des capteurs à faible coût de fabrication, à mesure rapide et continue et aussi non-destructif, Parmi ces capteurs on trouve les capteurs capacitifs à peignes inter-digités IDC. Ces derniers, sont basés sur les structures inter-digitées qui sont utilisés dans les composants à ondes de surfaces (SAW), capteurs d'humidité, capteurs à gaz et capteurs biologiques, etc....

Nous cherchons à réaliser un capteur pour application de détection de gaz, détection de concentration dans un fluide ou biologiques, avec une technologie disponible, pas coûteuse, et peut être a forte intégration.

Les détecteurs capacitifs planaires sont le bon candidat. Comment les concevoir ?

Dans ce travail nous avons étudié et simulé une structure a peignes inter-digités (IDC). Nous avons aussi, réalisés et testés des structures IDC sur PCB. Ce présent rapport est divisé en trois parties. La première partie concerne la présentation des structures IDC. En deuxième partie sont exposées les modèles mathématiques utilisés. Dans la troisième partie nous avons présentés la méthode de simulation suivie sous Comsol Multiphysiques, la partie expérimentale de réalisation des structures IDC sur PCB et la mesure capacitive.

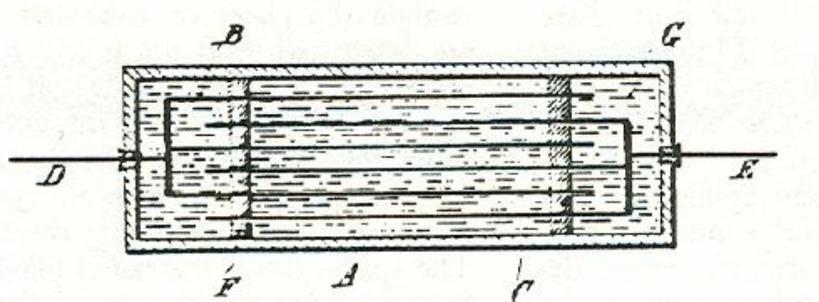
Chapitre I :  
La structure  
Inter-digitée

## I Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter le principe d'opération des capteurs inter-digités et les différents types de détection lié à sa. Ces capteurs sont de type planaire avec une structure simple. Le principe de fonctionnement derrière ce capteur est basé sur l'interaction du champ électrique engendré par le capteur avec un matériau sous test (MST). Les capteurs Planaires Inter-digités ont été choisis pour l'estimation de la permittivité sans altérer les propriétés physiques du matériau sous test (tests non destructifs et non invasive). Dans ce qui suit, nous montrerons l'interaction de ces capteurs avec un matériau diélectrique.

### I.1 Etat de l'art

Historiquement, on peut dire que la première conception d'électrodes inter-digitées a été présentée dans le brevet de N. Tesla, publié en 1891 [1]. Cette conception a été faite pour augmenter la longueur effective des électrodes, et donc augmenter la valeur de la capacitance entre les électrodes afin d'obtenir une capacité importante.



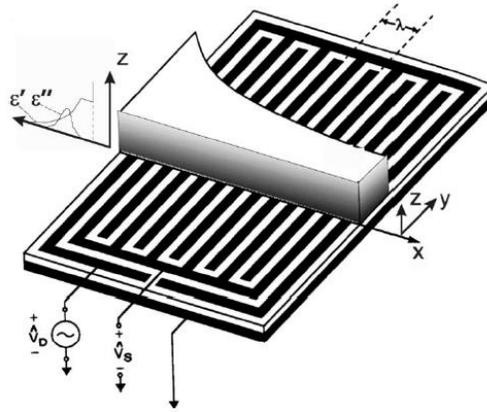
**Figure 2 :** Schéma d'une structure à peignes inter digités présenté dans le brevet de N. Tesla, délivré en 1891.

La figure 2 [1], illustre la structure proposée par N Tesla, qui consiste en une plaque rectangulaire, qui contient un nombre de "Doigts", immergée dans un isolant liquide. La capacité totale du "condensateur Électrique" proposé par N Tesla augmente linéairement avec le nombre de doigts.

### I.2 Structure inter-digitée

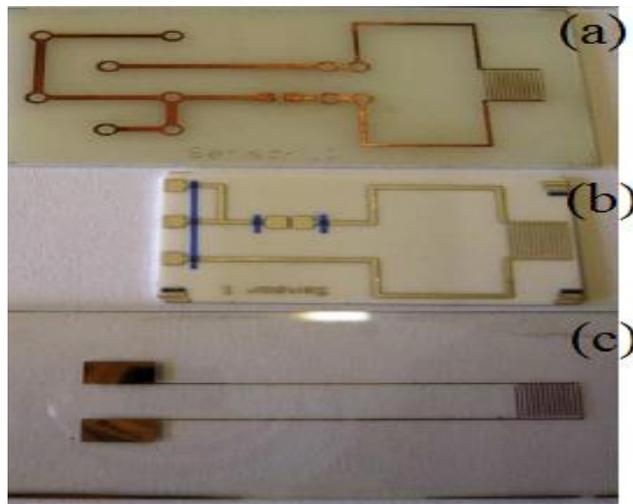
Un condensateur à peignes inter-digités, illustré sur la figure 3 [2], est un motif périodique placé sur un substrat diélectrique. Ce motif est constitué par une paire d'électrodes inter digitées mise dans le plan (x y), chaque électrodes est constituée de (N/2) doigts, avec N le nombre totale de doigts. Chaque

doigt possède une longueur ( $L$ ), une largeur ( $W$ ) et un espacement ( $S$ ) entre chaque paire des doigts adjacents. La périodicité de la structure d'électrode est représentée par la longueur d'onde spatiale  $\lambda$ .

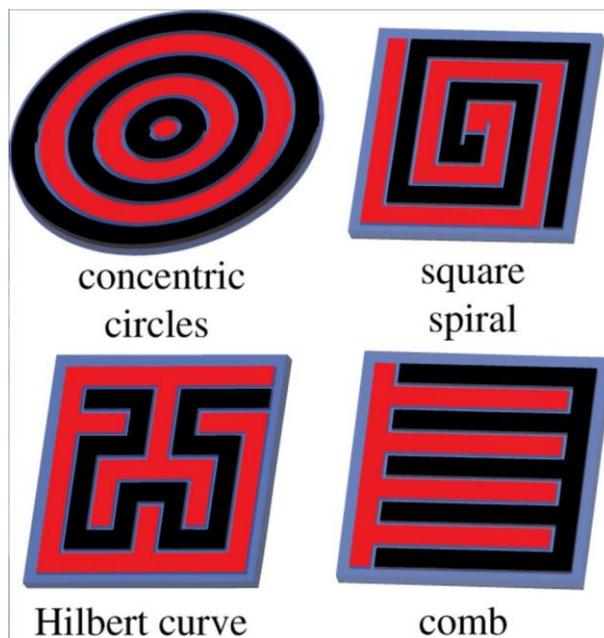


**Figure 3 :** Exemple de schéma de structure d'un capteur IDC

Différents type de capteurs à peignes inter digités ont été utilisés dans divers applications, tels que ceux représentés dans la figure ci-dessous [5], et sont réalisés sur différents type de substrats. Ces derniers peuvent être opaque, transparent ou poreux, par exemple : FR-4 [3], AD260A[4], silicium [3] ou verre [3]. Les électrodes sont en contact intime en dessous du matériau de test avec un substrat soutenu par un plan de masse isolant. Aussi les motifs périodiques inter digités sont de différentes formes, et ne sont pas limités à la forme simple de peignes et peuvent être de formes diverses circulaires, spirale, courbe de Hilbert ou autres (Voir figure 5 [6]).



**Figure 4** : illustrations de capteurs IDC déposés sur différent substrats, en **a)** substrat Fr-4 (PCB), **b)** Alumine (oxyde d'aluminium) et en **c)** Verre technologie MEMS

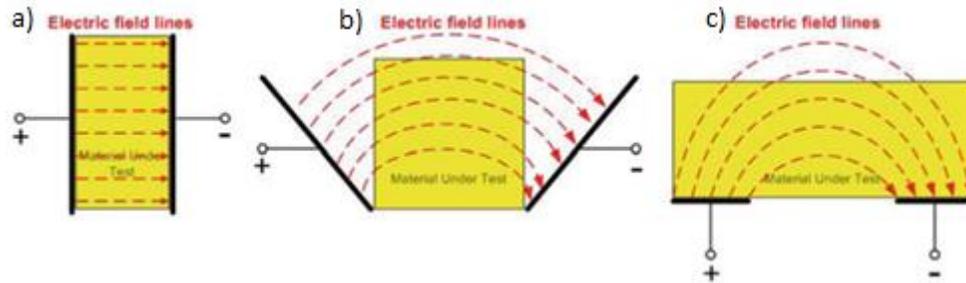


**Figure 5** : illustration des différentes motifs pour les IDCs :peigne, spiral, circulaire et courbe d'Hilbert

### I.3 Le principe de fonctionnement de capteurs inter-digités

Le principe de fonctionnement de capteurs interdigitées rassemble à un condensateur plan parallèle [3,4,7]. La figure 6 [3] montre la conversion d'un condensateur vers un capteur , et exprime cette transition comme une variation d'angle d'inclinaison . Dans un condensateur un champ électrique

est généré entre les électrodes positifs et négatifs (polarité Instantanée), tels que présentées sur la figure : 6.a et 6.b . Quand un matériau est mis sur le capteur (figure 6.c), les lignes de champ électrique traverse le matériau sous test et les propriétés diélectriques du matériau ainsi que sa géométrie affectent la capacitance et la conductance entre les deux électrodes. Cette perturbation dans le champ électrique peut être utilisé pour déterminer les propriétés du matériau suivant l'application voulue.



**Figure 6:** présentation de disposition d'une paire d'électrodes suivant la variation de l'angle d'inclinaison

Dans une structure IDC , un ensemble des électrodes est connecté à une tension alternative source et acte comme des électrodes d'excitation. Les électrodes restantes sont connecté à la masse (gnd). Lorsqu'on place un matériau entre les électrodes, les lignes de champs électrique des électrodes d'excitations traversent la majorité du matériau sous test en direction des électrodes de détection. La profondeur de pénétration (T) des lignes de champ électrique du capteur dépendent de la distance entre deux électrodes (s) avec polarité opposée. Les lignes du champ électrique sont affectés par les propriétés diélectriques du MST [8,2,9].

L'avantage principal des IDC est que le champ électrique est seulement produit sur la surface de test; cela limite les interférences des lignes du champs électrique en dehors de la zone de test et les concentrent vers le MST .

Dans la figure 7 [8] , la structure IDC typique est représentée. Une électrode est connectée à une source de Tension AC (Terminal '+') aussi appelée comme excitation et l'autre électrode est connectée à la masse (Terminal '-'). La Source de tension alternative est fourni par un générateur de fréquences .

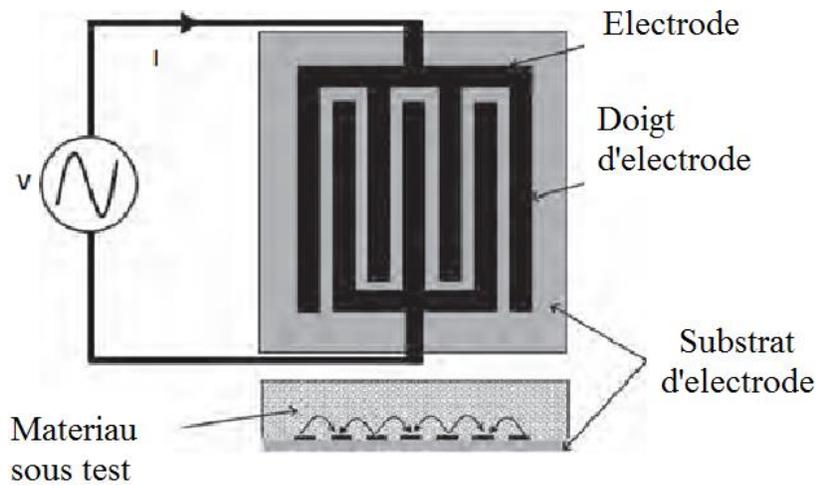


Figure 7: capteur Inter-digité

L'amplitude du champ électrique peut être variée en changeant la distance entre électrodes. Le flux de lignes de champ électrique entre électrodes pour longueurs variables sont montrés dans la figure 8 [3]. Les lignes du champ électrique correspondant à un minimum de distance de séparation entre les électrodes positif et négatif sont notés **I1** où les électrodes alternatif sont en contre polarités (+, -, +, -, +, -). Pour la distance maximum de séparation note **I3** où la structure d'électrodes est encore la même mais avec un grand espacement. Les couleurs bleu, rouge et vert correspondent à : faible, moyen et élevé profondeur de pénétration, respectivement. Suivant l'application désirée, il faut varier l'espacement inter-électrodes afin de couvrir l'ensemble du matériau sous test.

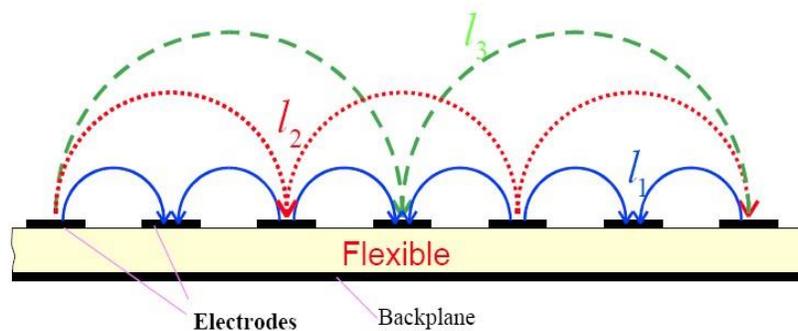
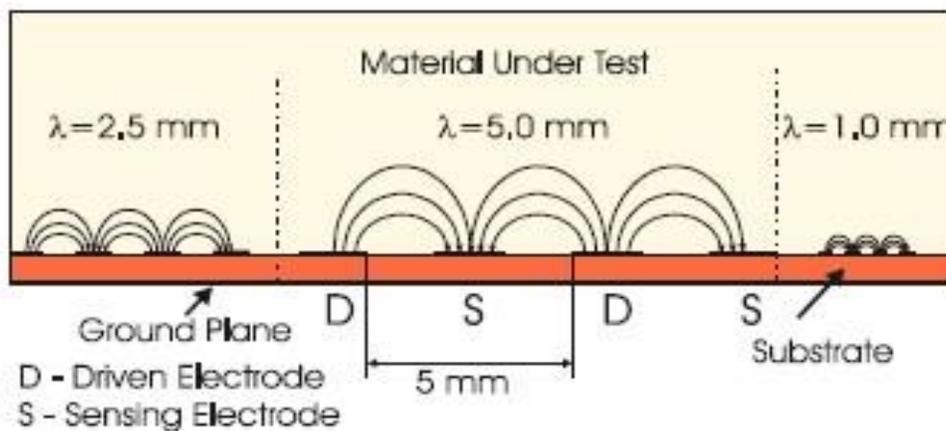


Figure 8: champ électrique formé entre les deux électrodes pour différents longueurs d'ondes

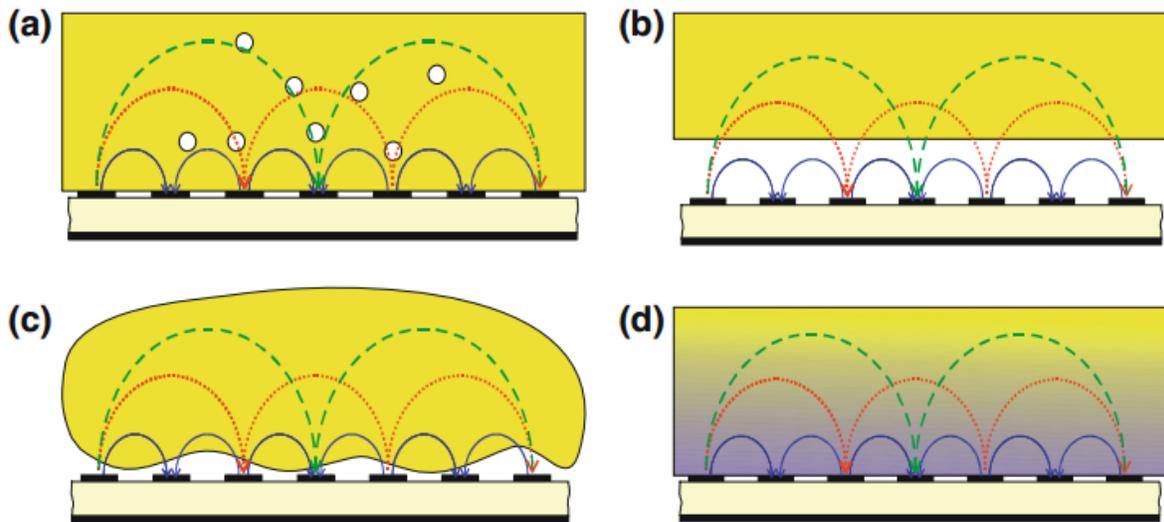
La distance entre les deux électrodes adjacentes de même polarité est appelée longueur d'onde spatiale ( $\lambda$ ). Idéalement, la profondeur de pénétration est égale à un quart de la longueur d'onde spatiale [2]. Pour la longueur d'onde spatiale de 1 mm comme le montre la figure 9 [7], la profondeur de pénétration est de 250 $\mu$ m. La longueur d'onde spatiale augmente avec une augmentation de la profondeur de pénétration de façon linéaire.

Sur la figure ci-dessous, D est l'électrode d'excitation ou la source de Tension AC, et S est l'électrode de détection. Les profondeurs de pénétration variables peuvent être obtenues en ajustant la longueur d'onde spatiale entre les électrodes.



**Figure 9 :** Présentation de différentes profondeurs de pénétrations suivant le changement de la longueur d'onde spatiale

Les capteurs inter-digités peuvent être employés dans diverses formes de détections en fonction des exigences (figure 10 [3]). Ils pourraient être utilisés pour mesurer la densité du matériau comme montré dans figure 10 (a), la distance entre le matériau sous test et capteur pourrait être mesurée à l'aide de champs d'excitation variables comme dans figure 10 (b). Il est également possible d'identifier les matières non uniforme ou avec forme irrégulière en utilisant les capteurs inter-digités comme représenté à la figure 10 (c) et ils sont aussi très bons capteurs d'humidité, comme le montre la figure 10 (d). Ainsi un capteur inter-digité peut non seulement mesurer les propriétés diélectriques d'un matériau, mais aussi la densité, la forme, ...etc. de la matière [7,3].



**Figure 10 :** Présentation des différentes formes de détections à l'aide des capteurs inter-digités, en a) mesure de densité, en b) mesure de distance, en c) mesure de texture et en d) mesure d'humidité.

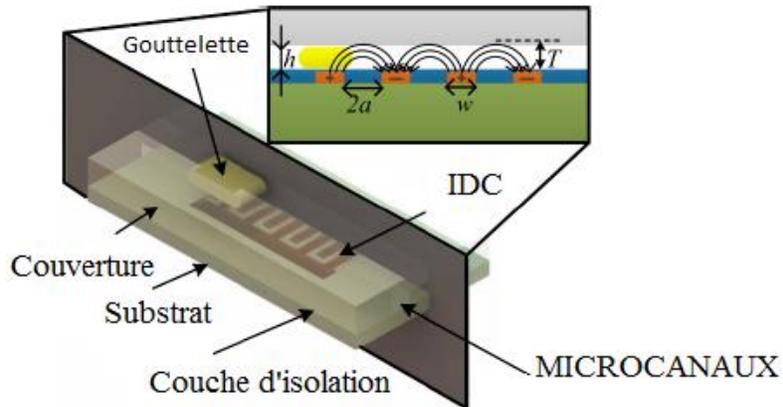
#### I.4 Domaines d'applications des Capteurs inter-digités

L'utilisation Extensive des électrodes inter-digitées pour les applications de détection a commencé en 1960 [10] avec d'autres formes d'électrodes coplanaires [11]. Par la suite, des études indépendantes de diélectrométrie avec une seule [12], et multiple profondeurs de pénétration à l'aide des IDCs . Les capteurs inter-digités sont vraiment populaire pour leur détection d'un seul coté et leur capacité pour un essai non destructif (NDT). Le contrôle Non Destructif ou NDT est défini comme l'utilisation des techniques non invasives pour déterminer l'intégrité d'un matériau, d'un composant ou d'une structure ou mesurer quantitativement certaines caractéristiques d'un objet [7].

##### I.4.1. Capteurs de Gouttelettes micro-fluidiques [9]

Les Gouttelettes micro-fluidiques sont caractérisés par la présence de deux fluides non miscibles : l'une est continue tandis que l'autre est discret ; pour des cas, les gouttelettes d'huile en l'eau continu gouttelettes d'eau dans l'huile continu. Si les fluides impliqués (phases) ont des permittivités relatives

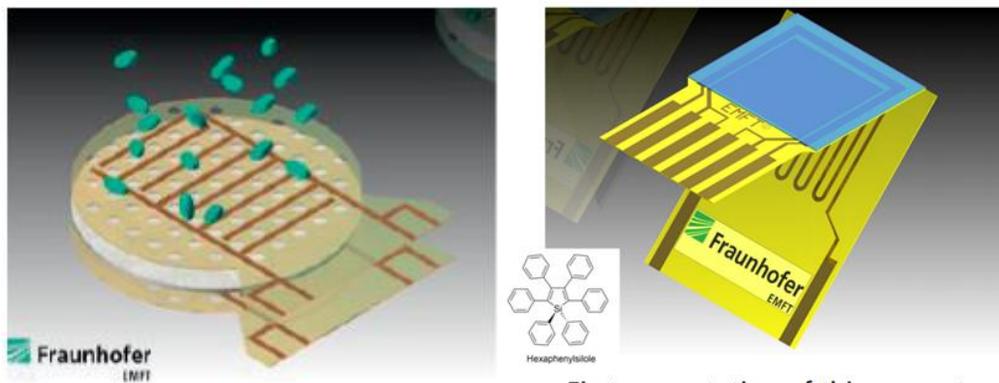
distinctes, la détection des gouttelettes deviennent possible utilisant une détection capacitive. Le détecteur capacitif IDC des gouttelettes comprend le verre comme substrat, couche d'isolation et le couvercle de micro-canaux, comme illustré schématiquement sur la figure 11 .



**Figure11** : Capteurs de Gouttelettes micro-fluidiques

#### I.4.2. Micro filtre intelligent [13]

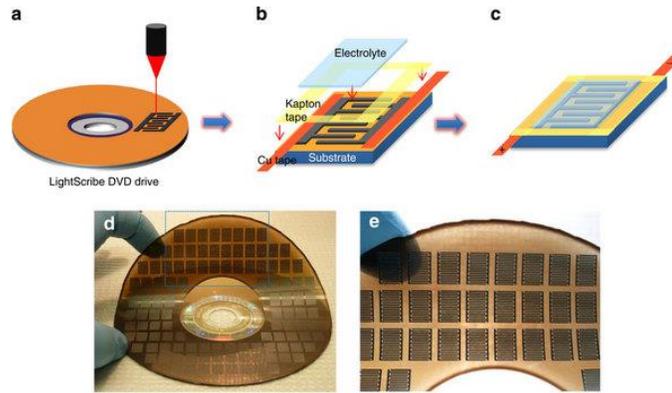
Un micro système de filtration (filtre-capteur) (figure 12) permet la détection autonome de son propre statut d'empilement et le suivi de filtrat. Ce filtre-capteur se compose de deux feuilles-capteurs micro-perforées contenant des condensateurs inter-digites (IDC) et une membrane de filtrage placée entre les deux. La détection capacitive du filtrat (cellules ou particules) est possible par l'intermédiaire de la modification de la permittivité du fluide qui influe l'IDC "supérieur". L'IDC "inférieur" sert à compenser la température et / ou des variations de la conductivité du fluide lui-même.



**Figure12** : Micro filtre intelligent

### I.4.3. Le super-condensateur inter-digité [22]

Le développement rapide des appareils électroniques miniaturisés a augmenté la demande pour le stockage d'énergie. Le super condensateur fabriqué à l'échelle microscopique a un grand potentiel pour



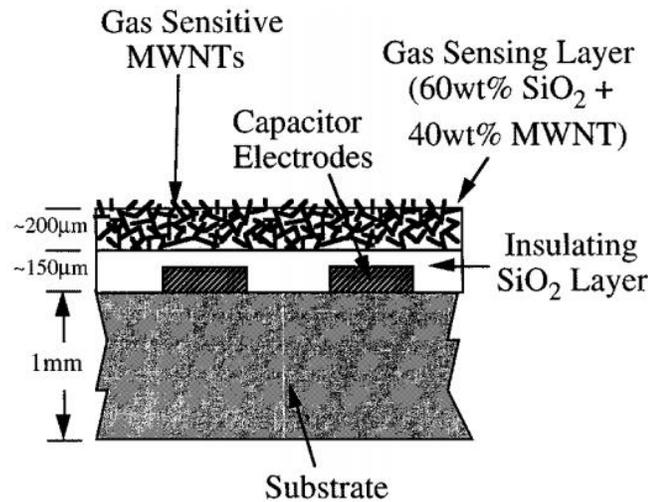
**Figure 13 :** Micro filtre intelligent

compléter ou remplacer les batteries et les condensateurs électrolytiques dans une variété d'applications.

La figure 13 démontrent une fabrication évolutive de micro-super-condensateurs à base de graphène par laser d'écriture directe sur des films d'oxyde de graphite à l'aide d'un graveur DVD standard. Remarquablement, la miniaturisation des dispositifs à l'échelle microscopique faire accroître la capacité de stockage de charges électriques. Ces micro-super-capacités montrent une densité de puissance de  $200 \text{ W/cm}^3$ , ce qui est parmi les plus hautes valeurs obtenues pour les super-condensateurs.

### I.4.4. Condensateurs interdigitaux planaire [15]

Les condensateurs interdigitaux planaires montrés dans la figure 14, constitué à base d'un film mince de H ou Pt ont été étudiés pour les hydrocarbures tels que le butane.



**Figure 14 :** Vue en coupe transversale du condensateur inter-digité

Le temps de réponse est dépendant de l'épaisseur de la couche de zéolite et la température de fonctionnement. Un inducteur en spirale carrée et un condensateur inter-digité sur un circuit imprimé revêtu d'une couche de protection électriquement isolante SiO<sub>2</sub> suivie d'une couche de détection de gaz fabriquée en multiplies nanotube de carbone (MWNT) - dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) est utilisé en tant que capteur pour la détection de le dioxyde de carbone.

## I.5 Conclusion

Nous avons présentés dans ce chapitre le principe de fonctionnement des capteurs inter-digités, les différents types de détections possibles et les différents motifs de ces structures. Il existe plusieurs types de capteurs à base de doigts inter-digités, qui sont utilisés dans différentes applications des microsystèmes.

Par la suite de ce travail, nous allons décrire les différentes méthodes de calculs et de simulation en vue d'avoir les propriétés électriques de la structures IDC.

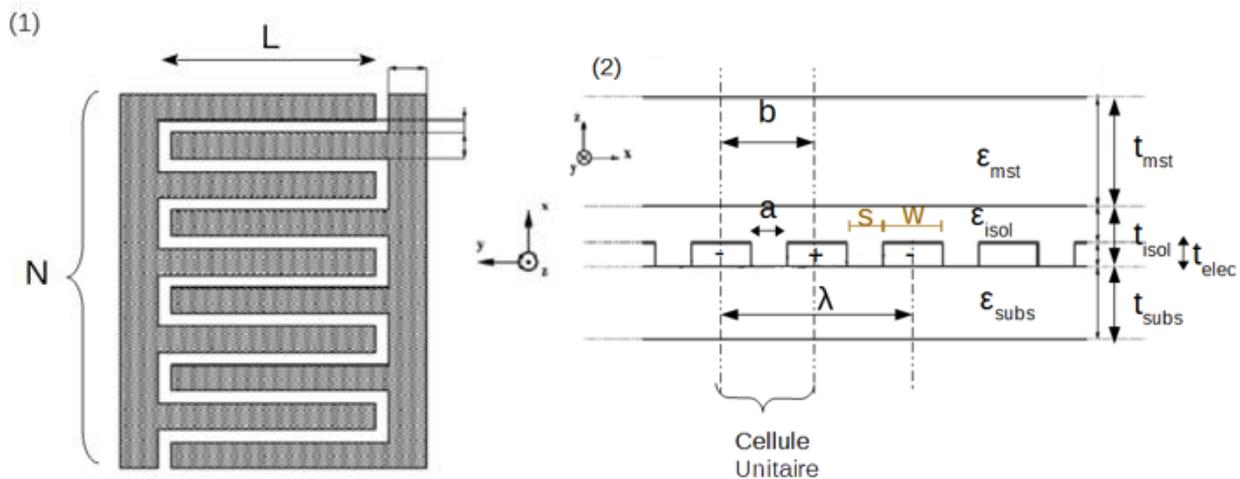
Chapitre II :  
Méthodes analytiques

## II. Introduction

Le paramètre essentielle dans un capteur capacitif à peignes interdigités est la valeur de la capacité totale  $C_{\text{idc}}$  et la capacitance entre une paire de doigts périodiques  $C_{\text{cu}}$ . Il existe plusieurs méthodes de calcul pour ces structures tel que : méthode par éléments finis, méthodes analytiques et les méthodes empiriques [8]. Dans ce chapitre nous allons présenter quelques méthodes analytiques les plus citées dans la littérature [3,4,7,8,16-21]. Nous définissons les modèles mathématiques pour chaque méthode, leurs limite d'utilisation et la programmation de ceux-ci sous Matlab. Les résultats de comparaison seront illustrées à la fin de ce chapitre.

### II.1 Paramètres fondamentales :

Chaque structure IDC est bien déterminé à l'aide d'un ensemble de paramètres : géométriques, physiques, etc. La figure 13, montre les paramètres géométriques et diélectriques pour un IDC. Chaque doigt possède une longueur ( $L$ ), une largeur ( $W$ ) et un espacement ( $S$ ) entre chaque paire des doigts adjacents. La périodicité de la structure d'électrode est représentée par la longueur d'onde spatiale  $\lambda$ . Le nombre totale des doigts est égale à  $N$ . Pour la permittivité des matériaux utilisés, elle est notée comme suit :  $\epsilon_{\text{subs}}$  pour la permittivité du substrat,  $\epsilon_{\text{isol}}$  pour la permittivité de la couche d'isolation et  $\epsilon_{\text{mst}}$  pour la permittivité du matériau sous test.



**Figure 13 :** Les paramètres pour un IDC en (1) vue de dessus et en (2) vue de coupe

Notation	Définition	Equation
S (a) [mm]	distance inter-électrode (distance séparant les doigts)	$S = a$
W (b-a) [mm]	Largeur des électrodes	$W = b - a$
L[mm]	Longueur des électrodes	Exemple: 21 [mm]
Rapport a/b		$\frac{a}{b} = \frac{S}{W + S}$
N	Nombre des électrodes	Exemple: N fixé à 20 électrodes
$\epsilon_{mst}$	Permittivité du matériau sous test	Exemple: $\epsilon_{mst} = 1$
$\epsilon_{isol}$	Permittivité de couche d'isolation	Exemple: $\epsilon_{isol} = 1$
$\epsilon_{subs}$	Permittivité du substrat	Exemple: $\epsilon_{subs} = 4.3$
$t_{mst}$	Epaisseur du matériau sous test	
$t_{elec}$ [ $\mu$ m]	Epaisseur des électrodes	Exemple: $t_{mst} = 35$ [ $\mu$ m]
$t_{subs}$ [mm]	Epaisseur du substrat	Exemple: $t_{subs} = 1.6$ [mm]
$\lambda$	Longueur d'onde spatiale du réseau périodique	$\lambda = 2 * b$
$\eta$	rapport de métallisation	$\eta = \frac{W}{W + S} = \frac{2 * W}{\lambda}$

**Tableau 1:** Notations et équations des paramètres géométriques et physiques pour un IDC

La plupart de ces paramètres (diélectriques/géométriques) restent difficilement modifiables telles que les épaisseurs des diélectriques, électrodes et les permittivités relatives du substrat. Ceux-ci dépendent des substrats utilisés, donc de la technologie de fabrication et sont imposées par le fabricant pour un processus technologique bien déterminé. Le tableau 1, résume les notations et équations des différents paramètres géométriques et physiques pour une structure IDC.

## **II.2 Méthodes analytiques**

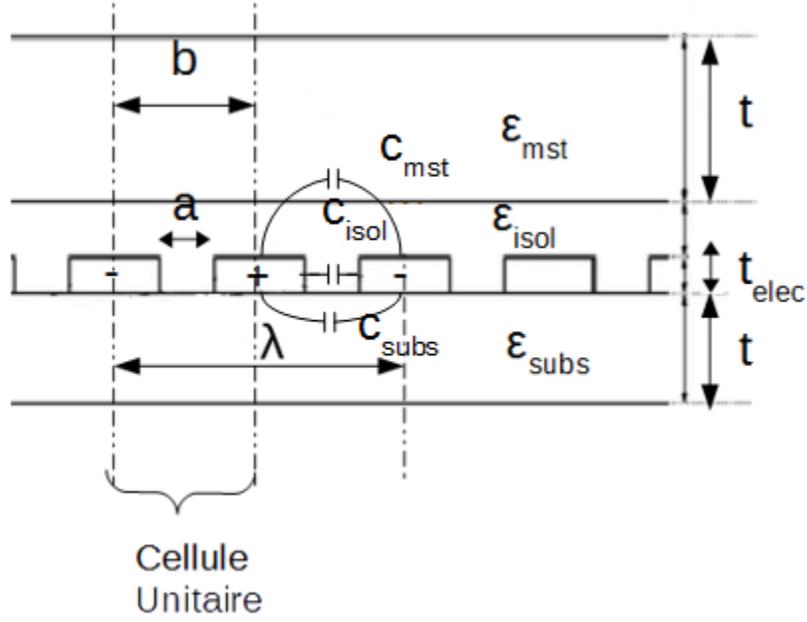
Tout capteur capacitif est caractérisé par deux facteurs principaux : la distribution des lignes des champs électriques  $E$ , la valeur de la capacité électrique  $C$ . Ces deux éléments contrôlent : la sensibilité, la réponse et les performances des capteurs IDC. Donc, pour assurer le fonctionnement optimal d'un IDC, il faut identifier l'influence des différents paramètres : géométriques (longueur, largeur, épaisseur, espacement, ...) et physiques (permittivité, ...). Dans ce qui suit on présentera l'influence de ces paramètres en utilisant les méthodes analytiques: transformation conforme, modèle de Chen et le modèle de Igreja et Diaz.

### **II.2.1 Transformation conforme (Conformal Mapping)**

Plusieurs chercheurs ont étudié et développé structures IDC basées sur la technique de la transformation conforme et ont fourni des expressions pour le calcul de la capacité des électrodes IDC. D'après Jun Wan Kim [17], en 1977 Wei a évalué la capacité d'un IDC avec une couche supérieure infinie basée sur la technique de la transformation conforme. Ce modèle a été développé et amélioré par Veyres Hanna. Ce dernier a évalué la capacité d'un capteur ayant une structure de couche finie en 1980. Depuis, le modèle utilisé par Veyres et al a joué un rôle important dans l'analyse de la structure IDC dans une variété d'applications scientifiques.

#### **II.2.1.1 Définition**

La transformation conforme (conformal mapping) consiste en une série de transformations spatiales pour amener la structure à électrodes coplanaires en forme de condensateur plat à électrodes parallèles, où la capacité est une fonction linéaire de la constante diélectrique. La capacité totale est la somme des capacités partielles de chaque couche de la structure IDC [16].



**Figure 14 :** Capacités partielles suivant la technique de transformation conforme

Pour déterminer la capacité totale  $C_{idc}$  tel que représenter dans la figure 14, il faut sommer les capacitances des cellules unitaires  $C_{cu}$  le long de la longueur  $L$ . Chaque capacitance  $C_{cu}$  représente l'ensemble des capacitances partielles  $C_{mst}$ ,  $C_{isol}$  et  $C_{subs}$ , ces capacités sont données comme suivant [4,18]:

$$k = \frac{a}{b} \quad (1)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2)$$

$$C_{mst} + C_{subs} = \epsilon_0 * \frac{\epsilon_{mst} + \epsilon_{subs}}{2} * \frac{K(k')}{K(k)} \quad (3)$$

$$C_{isol} = \epsilon_0 * \epsilon_{isol} * \frac{t_{elec}}{a} \quad (4)$$

$$C_{cu} = C_{mst} + C_{subs} + C_{isol} \quad (5)$$

$$C_{2d} = C_{cu} * (N - 1) \quad (6)$$

$$C_{idc} = C_{2d} * L \quad (7)$$

Tel que :

$\epsilon_0$  : constant dielectric du vide ,est égale à :  $8.854 \times 10^{-12}$  (F/m),

K : intégral elliptique du premier type,

k : argument de K , est egale au rapport  $\frac{a}{b}$  ,

$C_{mst}$  : capacitance du matériau sous test,

$C_{isol}$  : capacitance du matériau d'isolation,

$C_{subs}$  : capacitance du substrat,

$C_{cu}$  : capacitance du cellule unitaire.

L'intégrale elliptique du premier type  $K[k]$  peut être programme sous le logiciel Matlab par la fonction « ellipke ». Nous avons utilisé Matlab pour calculer la capacitance d'une cellule unitaire  $C_{cu}$  et la capacité totale  $C_{idc}$  pour six échantillons de test. Le programme de calcul est donné dans l'annexe 1. Tous les résultats du calcul sont donnés dans le tableau 2.

Echantillons	1	2	3	4	5	6
S[mm]	1	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25
W[mm]	1	0.5	1	0.25	0.25	0.5
Ccu [pF/m]	31.20	31.51	39.10	32.13	25.46	39.72
Cidc [pF]	11.86	11.98	14.86	12.21	9.68	15.09

**Tableau 2** : Les résultats suivant la méthode conformal mapping.

### II.2.1.2 Limites d'applications

Les limites d'application pour ce modèle sont citées par [19] comme suivant:

- Ce modèle analytique est valable pour les structures IDC simple sans couches additives. Il n'est pas utilisable pour les structures multicouches.
- Ce modèle considère que les cellules unitaires sont identiques quel que soit leur position dans le motif, or en réalité les cellules unitaires des extrémités ont leurs propres valeurs de capacité due aux interférences imposées par les frontières du motif.
- Ce modèle ne prend pas en compte les interférences entre les cellules unitaires.
- Difficultés de programmation des fonctions spéciales (intégrale elliptique  $K(k)$ ) qui ne sont pas toujours simple à programmer.

### II.2.2 Modèle de Chen

Chen et al [21], ont étudiés et développés des dispositifs micro-fluidiques basées sur une structure IDC pour la détection capacitive de la position, la taille des gouttelettes, composition et le pourcentage de l'absorption d'eau pour les liquides hygroscopiques avec une meilleure résolution et temps de réponse très rapide. Ils ont utilisés la méthode dite cosinus inverse pour le calcul de la capacité des électrodes IDC.

#### II.2.2.1 Définition

La transformation du cosinus- inverse repose sur l'équation (8) pour calculer la capacitance d'une cellule unitaire  $C_{cu}$ . Les capacités  $C_{2d}$  et  $C_{idc}$  sont évaluées par la même procédure des équations (6) et (7).

$$C_{cu} = \left( 2 * \epsilon_0 * \frac{\epsilon_{mst}}{\pi} \right) * \ln \left[ 1 + \left( 2 * \frac{w}{s} \right) + \sqrt{\left( 1 + 2 * \frac{w}{s} \right)^2 - 1} \right] \quad (8)$$

Nous avons utilisé Matlab pour calculer la capacitance d'une cellule unitaire  $C_{cu}$  et la capacité totale  $C_{idc}$  pour six échantillons qui sont donnés dans le tableau 3. Le programme de calcul est donné en annexe 2. Tous les résultats du calcul sont donnés dans le tableau 3.

Echantillons	1	2	3	4	5	6
S[mm]	1	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25
W[mm]	1	0.5	1	0.25	0.25	0.5
Ccu [pF/m]	36.76	36.76	47.81	36.76	27.47	47.81
Cidc [pF]	13.97	13.97	18.17	13.97	10.44	18.17

**Tableau 3 :** Résultats de calcul suivant la méthode Chen .

### II.2.2.2 Limites d'applications

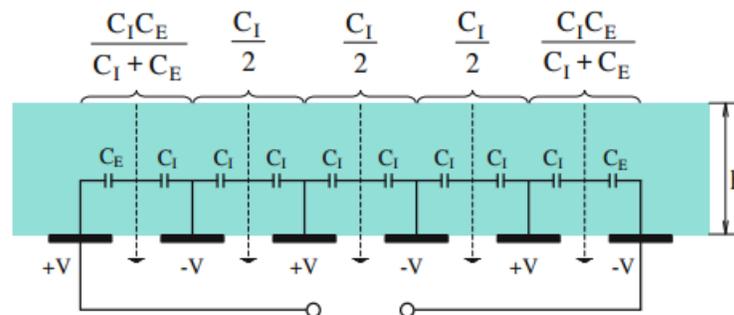
La méthode du consensus inverse est valable pour les dispositifs où :

- la longueur des électrodes est beaucoup plus grande que l'épaisseur des électrodes  $L \gg W$ ,
- la largeur des électrodes est beaucoup plus grand que la moitié de leur espacements  $\frac{2W}{s} \gg 1$ .

### II.2.3 Modèle de Igreja et Diaz

En 2004, Igreja et Diaz [20] ont proposé un modèle général applicable à n'importe quelle structure multicouche avec des électrodes coplanaires inter-digitées. Ils ont démontré que la transformation conforme et la méthode des capacités partielles peuvent être utilisés pour déterminer la capacitance des électrodes inter-digités dans les structures multicouche (finis ou infini). Ils ont constaté que leurs résultats corrélés beaucoup mieux avec des simulations numériques par éléments finis.

#### II.2.3.1 Définition



**Figure 15:** Cette figure représente un circuit équivalent pour évaluer la capacitance d'une coupe latérale d'un IDC à six électrodes [18]

Le modèle de Igreja et Diaz repose sur les équations (9) et (10) pour calculer la capacitance d'une cellule unitaire  $C_{cu}$  et puis la capacité totale  $C_{ide}$ .

$$C_{I/E} = 2 * C_{air} + (\varepsilon_{subs} - 1) * C_{subs} \quad (9)$$

$$C_{2d} = 2 * (C_I * C_E)/(C_I + C_E) + (N - 3) * C_I/2 \quad \text{pour } N > 3 \quad (10)$$

Les valeurs de capacités  $C_I$  et  $C_E$  sont données par Igreja [20] dans le tableau ci-dessous.

	Interior electrodes	Exterior electrodes
Finite layer	$C_I = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}$	$C_E = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{K(k_E)}{K(k'_E)}$
	$k'_1 = \sqrt{1 - k_1^2}$	$k'_E = \sqrt{1 - k_E^2}$
	$k_1 = t_2 \sqrt{\frac{t_4^2 - 1}{t_4^2 - t_2^2}}$	$k_E = \frac{1}{t_3} \sqrt{\frac{t_4^2 - t_3^2}{t_4^2 - 1}}$
	$t_2 = \text{sn}(K(k)\eta, k)$	$t_3 = \cos h\left(\frac{\pi(1 - \eta)}{8r}\right)$
	$t_4 = \frac{1}{k}$	$t_4 = \cos h\left(\frac{\pi(\eta + 1)}{8r}\right)$
	$k = \left(\frac{v_2(0, q)}{v_3(0, q)}\right)^2$	
	$q = \exp(-4\pi r)$	
Infinite layer	$C_I = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{K(k_{1\infty})}{K(k'_{1\infty})}$	$C_E = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{K(k_{E\infty})}{K(k'_{E\infty})}$
	$k_{1\infty} = \sin\left(\frac{\pi}{2}\eta\right)$	$k_{E\infty} = \frac{2\sqrt{\eta}}{1 + \eta}$

**Tableau 4** : Equations utilisées pour le calcul des capacités CI et CE

Nous avons utilisé Matlab pour calculer la capacitance d'une cellule unitaire  $C_{cu}$  et la capacité totale  $C_{ide}$  pour six échantillons qui sont donnés dans le tableau 3. Le programme de calcul est donné en annexe 2. Tous les résultats du calcul sont donnés dans le tableau 3.

Echantillons	1	2	3	4	5	6
S[mm]	1	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25
W[mm]	1	0.5	1	0.25	0.25	0.5
Ci [pF/m]	48.45	47.03	62.53	46.93	35.65	61.81
Ce[pF/m]	78.99	77.22	85.82	72.18	67.63	84.38
C2d [pF/m]	471.9	458.3	603.8	455.8	349.7	596.8
Cidc [pF]	9.44	9.17	12.08	9.12	6.99	11.94

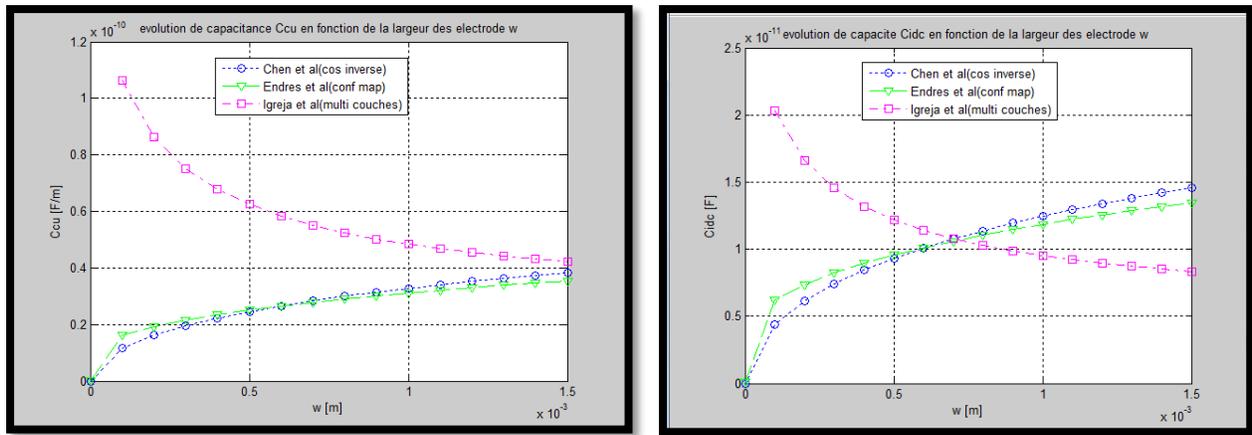
**Tableau 4 :** Résultats de calcul suivant le modèle de Igreja et Diaz

### II.3 Influence des paramètres géométriques et physiques sur une structure IDC

Dans cette section, nous allons nous intéresser sur l'effet de changement des paramètres géométriques ( $W, S, N, L$ ) et physiques ( $\epsilon_{mst}$ ) sur le fonctionnement d'un capteur basé sur les IDC. Ce qui est indispensable pour concevoir un capteur optimal. Pour atteindre ce but, nous allons représenter l'évolution de la capacitance d'une cellule unitaire  $C_{cu}$  et la capacité totale  $C_{idc}$  en fonction de ces paramètres .

#### II.3.1 Influence de la variation de la largeur des électrodes $W$

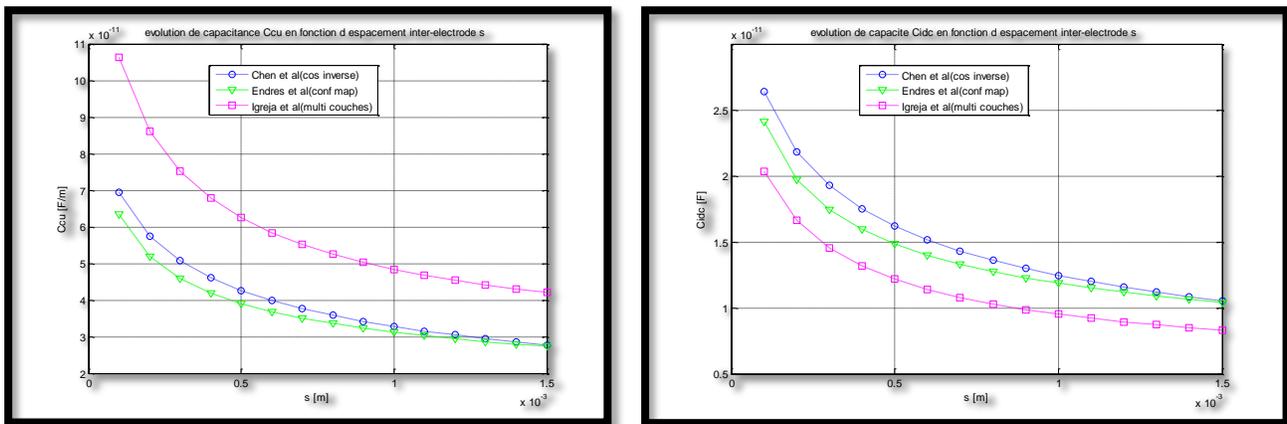
La figure 16 montre l'évolution de  $C_{cu}$  et  $C_{idc}$  en fonction de la largeur des électrodes  $W$ , avec les trois méthodes analytiques citées précédemment. On constate qu'on a une augmentation de la valeur des capacités  $C_{cu}$  et  $C_{idc}$  avec les deux méthodes cosinus inverse (Chen et al) et Conformal mapping. Par contre le modèle Multi couches (Igreja et al) on a une allure inversement proportionnelle par rapport au deux autres méthodes.



**Figure 16 :** évolution des capacités en fonction de la largeur  $W$  en (a)  $C_{cu}$  et en (b)  $C_{idc}$

### II.3.2 Influence de la variation de l'espace entre-électrode $S$

La figure 17 montre l'évolution de  $C_{cu}$  et  $C_{idc}$  en fonction de la distance entre-électrode  $S$ . Pour les trois méthodes analytiques, on constate qu'on a une diminution de la valeur des capacités  $C_{cu}$  et  $C_{idc}$ .



**Figure 17 :** évolution des capacités en fonction de l'espace  $S$  en (a)  $C_{cu}$  et en (b)  $C_{idc}$

### II.3.3 Influence de la variation de la longueur des électrodes L

La figure 18 donne la variation de  $C_{idc}$  en fonction de la longueur des électrode L. Pour les trois méthodes analytiques, on constate qu'on a une croissance linéaire de la valeur de capacité  $C_{idc}$  avec une allure identique.

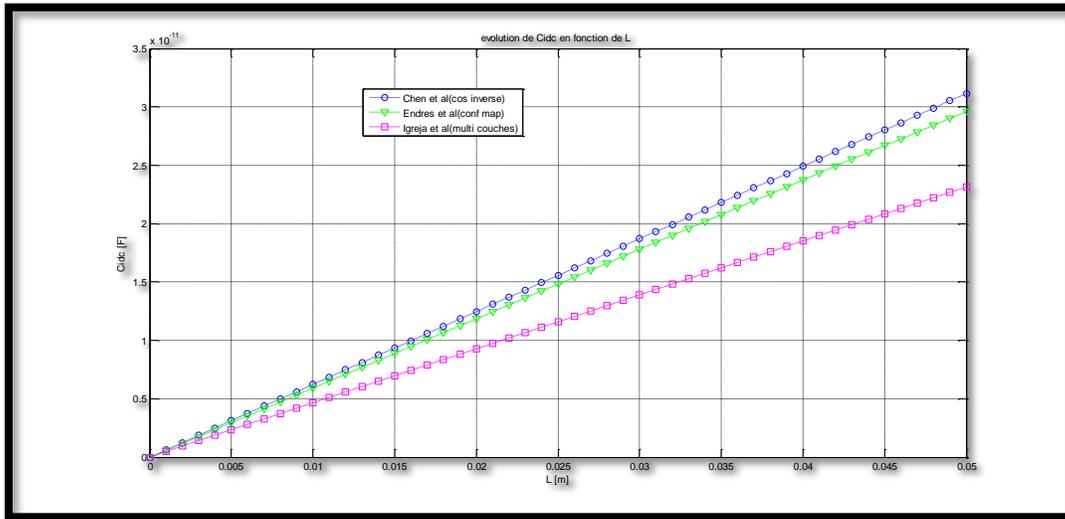


Figure 18: évolution de capacité totale  $C_{idc}$  en fonction de la longueur L

### II.3.4 Influence de la variation de nombre des électrodes N

La figure 19 montre l'évolution de capacité  $C_{idc}$  en fonction de nombre des électrode N. Pour les trois méthodes analytiques, on constate qu'on a une augmentation linéaire de la valeur de capacité  $C_{idc}$ .

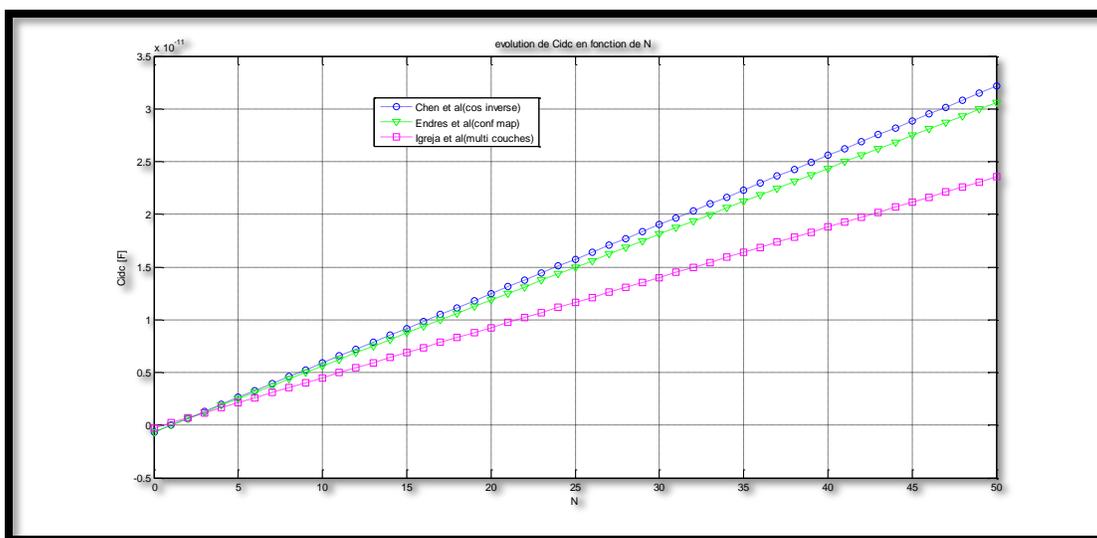
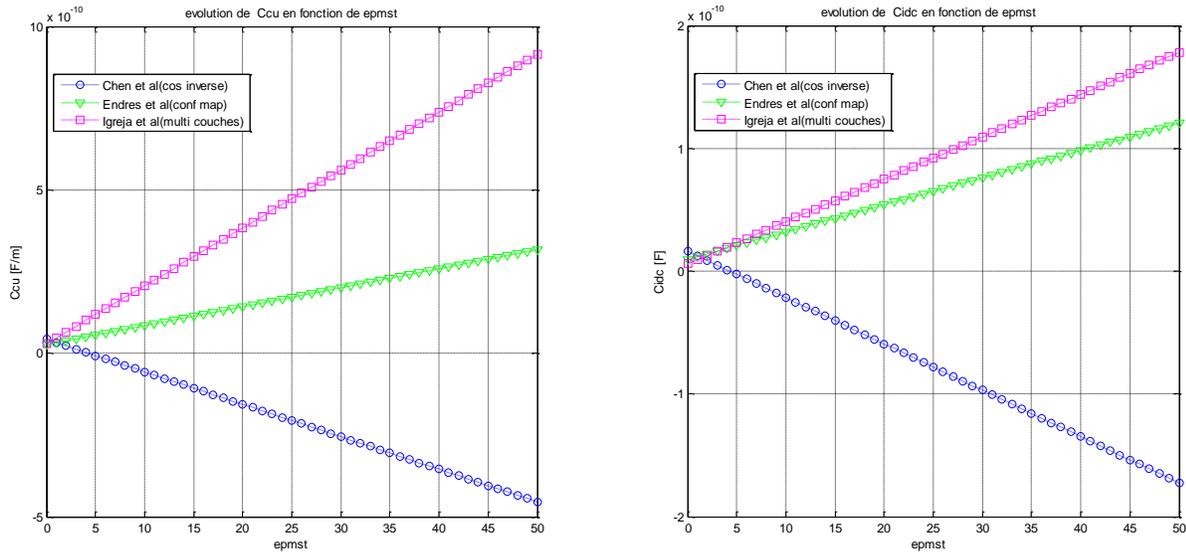


Figure 19: évolution de capacité totale  $C_{idc}$  en fonction de nombre des électrodes N

### II.3.5 Influence de la variation de la permittivité du matériau sous test $\epsilon_{mst}$

La figure 20 représente la variation de la capacité  $C_{idc}$  en fonction de la permittivité du matériau sous test  $\epsilon_{mst}$ . Pour les deux méthodes :, on constate qu'on a une augmentation linéaire de la valeur de capacité  $C_{idc}$ .



**Figure 20 :** évolution des capacités en fonction de la permittivité du matériau sous test  $\epsilon_{mst}$   
en (a)  $C_{cu}$  et en (b)  $C_{idc}$

### II.4 Conclusion

Les méthodes analytiques de calcul des capacités inter-digités ont été présentés dans ce chapitre nous avons présenté les méthodes de calcul analytique de la capacité de structures IDC.

Nous avons présenté les trois méthodes les plus cités dans la littérature qu'on a traité. Ces méthodes permettent de calculer la capacité d'une façon simple qui ont procédé a simplifier le calcul mathématique de ces structures en capacité équivalente. Chacune a été utilisé dans un contexte précis.

Nous les avons défini pour une éventuelle utilisation comme capteur de permittivité. L'effet des paramètres géométriques et physiques a été traité.

Par la suite de ce document, nous allons présenter la simulation avec les éléments finis en utilisant consol multi-physiques.

# Chapitre III : Méthodes numériques

### III.1 Introduction

La simulation avec les outils CAO joue un rôle important dans la conception et la fabrication de nouveaux composants, car elle permet de réduire le coût de et le temps de fabrication. Dans ce chapitre, nous allons présenter la simulation par éléments finis d'un capteur à peignes inter-digités. Nous avons utilisé Comsol multiphysiques, pour la simulation à deux dimensions et réalisé un exemple à trois dimensions d'uns structures à peignes inter-digitées.

Nous présentons aussi les résultats de mesure sur des structures réalisés sur substrat PCB de six échantillons, les mesures ont été effectués avec un LCR mètres.

### III.2 Simulation sous Comsol multiphysiques

Le logiciel Comsol est un environnement de simulation multiphysique repose sur la technique des éléments finis pour calculer une approximation de la solution d'un système d'équations aux dérivées partielles PDE. Il inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques: électromagnétisme, thermique, chimique, mécanique des structures, biologique, et optique à l'aide de plusieurs modules physiques intégrés avec la possibilité de coupler entre eux si nécessaire .Il couvre un champ d'application très vaste de macro au micro .

Tous ces points forts rendent Comsol un outil puissant pour simuler le comportement d'un système réel et prédire son évolution. Comsol possède un groupe de solveurs (linéaire, non linéaire, stationnaire, temporelle, modale, paramétrique,... )

La démarche à suivre pour résoudre tout problème physique sous Comsol est relativement simple; voici les étapes de cette méthode:

- Définition du modèle: il faut choisir la dimension (1D, 2D, 3D) et la nature du problème, soit par le choix d'une équation applicable à un phénomène quelconque, soit par le choix d'un phénomène physique ;
- Mise en place de la géométrie du problème: il s'agit de dessiner, à l'aide de la barre d'outils de dessin intégrée à Comsol, un modèle géométrique du problème. Les outils de dessin de Comsol étant tout de même limités, les géométries complexes devront être modélisées par des assemblages de formes simples ou en utilisant des logiciels de CAO ( exemple : solidworks ) ;
- Spécification des paramètres des équations aux dérivées partielles du problème
- Spécification des conditions aux limites: celles-ci peuvent être des constantes ou des équations (type Dirichlet, Neuman ou Fourier) ;
- Choix d'un maillage: celui-ci pouvant être défini automatiquement par Comsol ou être manuellement ajusté, par exemple pour obtenir une plus grande finesse de résolution.
- Résolution et visualisation des résultats: Comsol dispose d'un ensemble de solveurs (directs, itératifs, multi-grilles) pour résoudre les équations de bilan implantées et permet de faire de l'analyse linéaire, non-linéaire, temporelle, modale, paramétrée. Le résultat s'affiche spontanément après la résolution.

L'évolution du phénomène étudié peut être visualisé sous différentes formes: vue 3D, vecteurs, coupe en plan, dégradés de couleurs, etc.

### III.3 Exemple de simulation d'un IDC en 2D

Un modèle 2D a été adopté pour montrer :

- Les interférences entre les champs électriques associés pour chaque cellule unitaire,
- L'effet des extrémités physiques du système sur la distribution des lignes du champs électriques dans les cellules externes  $C_E$ .

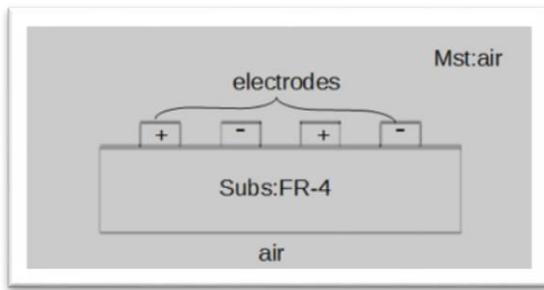
Le domaine physique qui reflète les phénomènes associés a une structure IDC est l'électrostatique ,pour cela il faut sélectionner «Electrostatique » dans le module physique AC/DC de Comsol pour le calcul de la capacitance.

Nous avons basé notre étude pour un capteur IDC sur les paramètres trouve dans [4] . Les dimensions du capteur IDC sont les suivant :  $h = 35 \mu\text{m}$ ,  $t = 5 \text{ cm}$ ,  $a = 1\text{mm}$ ,  $b = 2 \text{ mm}$ ,  $L = 20 \text{ mm}$  et  $N = 20$ . Le substrat utilisé est le PCB AD260A (voir ces propriétés en annexe 4), la permittivité de ce matériau est  $\epsilon_{\text{subs}} = 2.60$ . Ceux-ci sont présentés tel que inséré sous Comsol dans la figure ci-dessous.

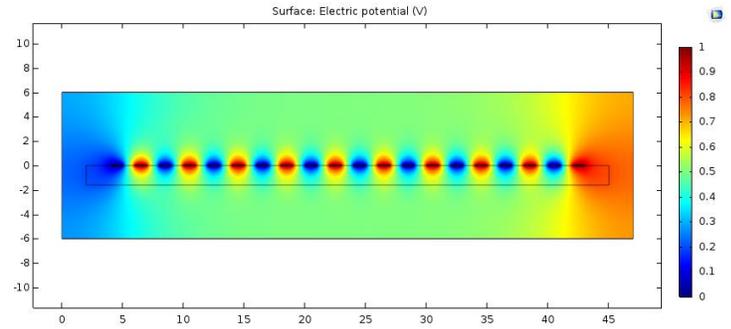
Parameters			
Name	Expression	Value	Description
S	1[mm]	0.001 m	Espacement inter-electrodes
W	1[mm]	0.001 m	Largeur des electrodes
t_elec	35[um]	3.5E-5 m	Epaisseur des electrodes
t_subs	1.6[mm]	0.0016 m	Epaisseur du substrat
t_air	5[cm]	0.05 m	Epaisseur du l'air
ep_air	1	1	Permittivité relative de l'air
ep_subs	2.57	2.57	Permittivité relative de substrat
N	20	20	Nombre des electrodes
L	20[mm]	0.02 m	Longueur des electrodes

**Figure 22:** montre les différents paramètres utilisés pour simuler le système en 2D sous Comsol

Après définition de la structure IDC en deux dimensions sous Comsol (figure 23 a),les résultats sont présentés sur la figure 23b. Celle-ci d'écrit les surfaces équipotentiels en fonction des électrodes du capteur IDC.



a)

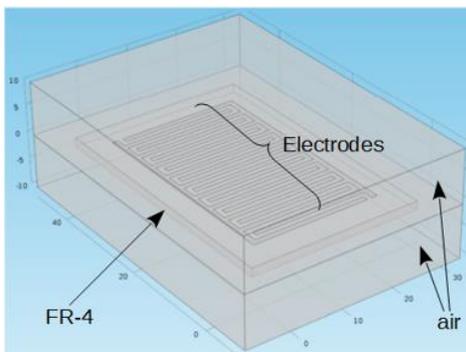


b)

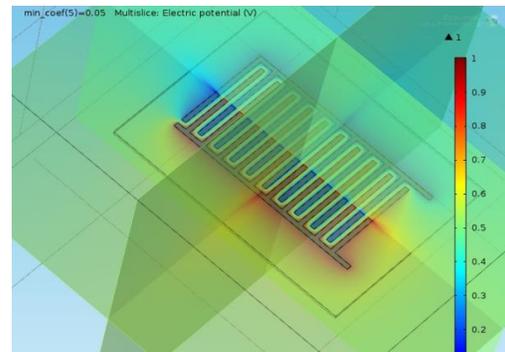
**Figure 23:** résultats de simulation sous consol, en a) coupe à 2D d'une structure IDC et en b) distribution des surfaces équipotentiels

### III.4 Exemple de simulation d'un IDC en 3D

Nous avons réalisé un exemple de capteur IDC en 3D avec les paramètres cités en dessus. Après sélection de la géométrie (voir figure 24 a) et des matériaux des différentes couches du capteur IDC, nous avons appliqué différents tailles de maillages. Ceci pour voir l'influence du maillage de notre exemple sur la valeur de la capacité totale de notre structure. L'allure du potentielle appliqué aux électrodes de capteur est présentée sur la figure 24 b.



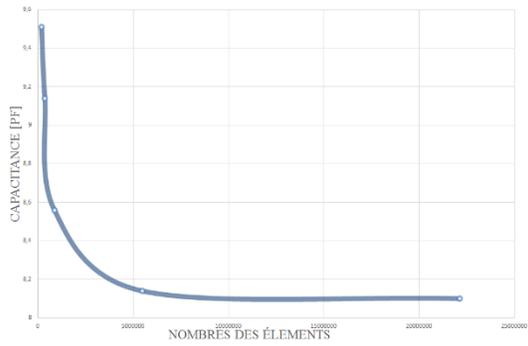
a)



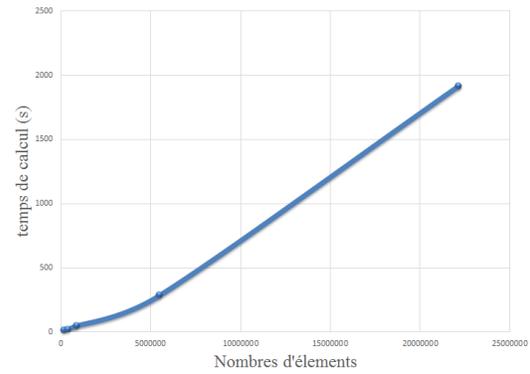
b)

**Figure 24:** Exemple de simulation en 3D du capteur IDC sous Consol, en a) structure du capteur IDC b) distribution du potentielle appliqué au électrodes du capteur simulé.

Les résultats de simulation paramétrique de l'influence du maillage sur la valeur de la capacité sont présentés sur les figures 25. On constate que l'augmentation des nombres d'éléments de maillage influe sur le résultat final. La valeur de la capacité tend vers 8.02pF trouvé dans l'article de [4] calculé à base de conformal mapping dans l'article, qui se vérifié sur la figure 25a. Aussi, l'augmentation des nombres d'éléments de maillage augment le temps de calcul tel que présenté dans la figure 25b.



a)



b)

**Figure 25:** résultats de simulation sous Comsol, en a) représentation 3D d'une structure IDC et en b) distribution des surfaces équipotentiels

### III.5 La fréquence optimale pour mesurer une capacité IDC

Les capteurs à peignes inter-digités ont été utilisées sur une large plage de fréquences à partir d'une fraction de hertz à plusieurs mégahertz. Le choix de la fréquence dépend d'un certain nombre de facteurs, y compris la composition de la matière à détecter. Alors que des fréquences plus élevées prouvent d'avoir plus de sensibilité, en particulier dans les matériaux à faible permittivité complexe. Dans certaines applications, les basses fréquences sont nécessaires en raison de la nature ionique de la matière [8].

L'étude des propriétés diélectriques des matériaux permet d'orienter le choix de la fréquence de fonctionnement  $F_f$  du capteur. Nous cherchons à obtenir une variation relative maximale de la capacité sensible  $C$  en présence d'un matériau sous test. C'est donc principalement la permittivité diélectrique de matériau sous test qui va conditionner le choix de la fréquence. Comme la capacité évolue dans le même sens que la partie réelle de la permittivité diélectrique  $\epsilon'$ , plus  $\epsilon'$  est élevée, plus la capacité sera grande. Dans ce sens, il est préférable de travailler à une fréquence  $F_f$  où  $\epsilon'$  du matériau sous test est maximale.

Jusqu'à une valeur de fréquence liée au nature et géométrie de matériau sous test, la partie réelle de la permittivité diélectrique  $\epsilon'$  ne varie pas. Au-delà de cette fréquence,  $\epsilon'$  chute brutalement. Il faut donc travailler à une fréquence inférieure à  $F_f$ . Nous cherchons également à obtenir des valeurs de capacité suffisamment grandes conduisant à un rapport Signal/Bruit acceptable. De plus, le comportement capacitif des diélectriques est maximal lorsque la partie imaginaire de la permittivité diélectrique  $\epsilon''$ , traduisant les pertes, est minimale [18].

### III.6 Test expérimentale sous PCB

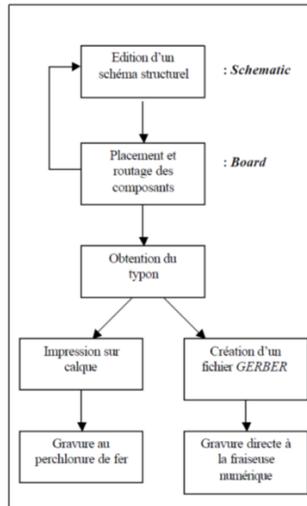
Nous avons choisi la technologie PCB pour fabriquer les circuits test, car elle offre :

- Cout moins cher, donc la possibilité de production de masse.
- Facile à faire, car elle n'a besoin qu'une plaque formée par un diélectrique revêtue par une couche fine de cuivre.
- Ressemblance entre la forme spatiale des IDC et PCB.
- Les propriétés diélectriques du PCB garantissent l'uniformité des champs électriques.

Afin de tester nos résultats nous avons réalisés six échantillons dont les paramètres ont été utilisés pour la calcul analytiques, présenté dans le chapitre 2. Le travail a consisté en la réalisation des masques PCB sous l’outil Eagle et la fabrication des structures sur PCB.

### III.6.1 Logiciel EAGLE

*EAGLE* (Easily Applicable Graphics Layout Editor) est un logiciel fourni par la société *CADSOFT*, qui permet la réalisation de typons en vue de construire une carte électronique. La version gratuite disponible sur le site de *CADSOFT* a pour seule limitation la taille des typons (8cm x 10cm). Le logiciel qui anciennement fonctionnait sous DOS travaille maintenant dans l’environnement WINDOWS sur PC (également sous LINUX et Mac OS X). La figure ci-dessous présente les diverses étapes de la conception d’une carte électronique.



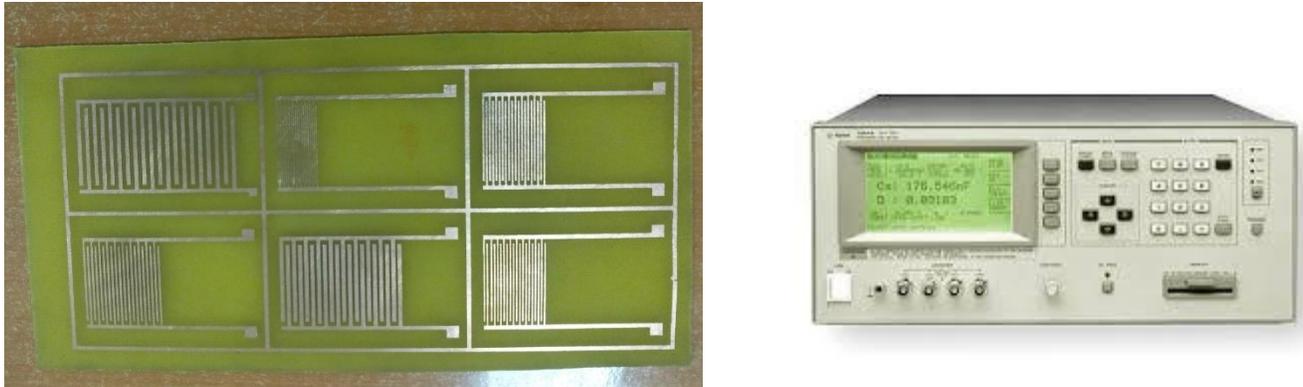
**Figure 26:** Etapes à suivre pour la conception de carte électronique

*EAGLE* prend en charge l’ensemble de la démarche.

- Edition de schéma structurel
- Elaboration du typon avec **chevelu** pour une cohérence totale entre schéma et typon
- Routage automatique possible
- Création de nouveaux composants relativement simple
- Génération possible d’un fichier *GERBER* pour une sous traitement éventuelle.

### III.6.2 Test des Structures réalisés

Nous réalisons nos échantillons sur FR4 PCB disponible chez les fabricants des circuits imprimés. Le circuit fabriqué est présenté sur la figure 27. Les paramètres des échantillons sont donnés sur le tableau 5.



**Figure 27:** Allure des échantillons réalisés sur PCB

Echantillons	1	2	3	4	5	6
W [mm]	1	0.5	1	0.25	0.25	0.5
Slot [mm]	1	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25
Valeur mesuré [pF]	17.71	18.88	20.18	19.88	17.95	27.73

**Tableau 5 :** résultats de mesure sur les échantillons avec le LCR mètre.

Echantillons		1	2	3	4	5	6
W [mm]		1	0.5	1	0.25	0.25	0.5
Slot [mm]		1	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25
Calcul analytique par les trois méthodes en [pF]	Conformal Mapping	11.86	11.98	14.86	12.21	09.68	15.09
	Chen et al	13.97	13.97	18.17	13.97	10.44	18.17
	Igreja et Diaz	09.44	09.17	12.08	09.12	06.99	11.94
Mesure expérimental en air [pF]		21.88	22.25	24.68	21.93	19.95	23.17

**Tableau 6 :** Comparaison entre les mesures et les résultats analytiques .

Pour la mesure de la valeur des capacités inter digitées nous avons utilisé le LCR mètre du CDTA, HP4284A. Les valeurs des capacités mesurés sont donné dans le tableau 5, celles-ci sont supérieurs a celle calculé d'une valeur moyenne de 10pF. Ceci peut avoir plusieurs explications, la première peut être due à l'intervalle de mesure fréquentielle du LCR mètre utilisé, qui est de 20Hz à 1MHz. La deuxième peut être due au interférences ajouté par les files de connections lors de la mesure.

Ce travail nécessite beaucoup plus de temps nous espérons le finir prochainement en utilisant l'analyseur de réseaux. Ce travail doit permettre la récupération des valeurs de la capacités en exploitant les paramètres S.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons montré le travail qui a été fait dans ce stage. Nous avons conçu deux exemples de simulations sous comsol pour le calcul des capacités IDC. Le premier est un exemple de simulation 2D et le deuxième est la simulation d'un capteur IDC 3D. Nous avons pris les données d'un capteur de la littérature, que nous avons simulé avec les éléments finis. Nous avons constaté que le maillage joue un rôle important dans la simulation. En effet, il permet d'optimisé le calcul mais prend un temps de calcule important.

Dans la deuxième partie de ce travail nous avons réalisé des échantillons de structures IDC. La partie de caractérisation a été faite avec le LCR Mètre HP4284A. Les premières mesures ont montrés que nous avons un shift de environs de 10pF par rapport au valeurs calculé analytiquement.

# Conclusion Générale

## IV. Conclusion générale

Nous avons présentés dans ce travail une introduction sur la détection capacitive avec une structure à peignes inter-digités. C'est une structure simple planaire, constituée d'un motif périodique de doigts séparés en deux électrodes d'excitation et de détection. Les propriétés diélectriques du matériau sous test déposé sur le capteur affectent la capacitance de la structure IDC. Ceux-ci sont en fonction de la géométrie, de la forme du motif périodique et des paramètres physiques du substrat et du milieu de mesure. Ce type de capteurs sont utilisés dans plusieurs applications, tel que : les capteurs de gouttelettes micro-fluidique, micro-filtre intelligent, capteurs nanométriques, ... etc. Ils ont l'avantage d'être simple à réaliser, moins encombrant, grande surface de mesure et permettent la détection sans destruction et sans altération du matériau sous test.

Dans l'objectif de la conception d'un capteur, IDC pour le futur, nous avons présenté trois méthodes analytiques de calcul de la capacitance les plus citées dans la littérature. Ces modèles analytiques sont : transformation conforme (conformal mapping), la méthode cosinus inverse (Chen et Al) et la méthode des structures multicouches (Igreja et Al). Nous avons défini chacune de ces méthodes, calculé, programmé sous matlab et présenté une comparaison avec les effets des paramètres géométriques sur la capacité totale de cette structure. Aussi nous avons utilisé une simulation élément finis avec comsol multiphysique. Nous avons réalisé deux exemples de simulation en 2D et 3D pour un capteur capacitif à peignes inter-digités simple. Nous avons pris les données d'un capteur de la littérature, que nous avons simulé avec les éléments finis.

Ce travail nous a permis de savoir le principe de fonctionnement, et de voir les méthodes de calcul analytique et simulation multiphysique (comsol) en vue de la conception d'une structure IDC. La partie de caractérisation a été faite avec le LCR Mètre HP4284A. Les premières mesures ont montré que nous avons un shift d'environ 10pF par rapport aux valeurs calculées analytiquement.

Nous espérons valider notre comparaison avec des structures réalisés en salle blanche ou sur PCB.

## V. Bibliographie:

- [1] Miloš D. Ercegovac , "Omnipresence of Tesla's Work and Ideas"
- [2] P.A. von Guggenberg\*, M.C. Zaretsky , "Estimation of one-dimensional complex-permittivity profiles: a feasibility study" .
- [3] Abdul Rahman , M.S., Mukhopadhyay, S.C., " Novel sensors for food inspection : Modelling , Fabrication and experimentation " .
- [4] N. Angkawisittpan , T. Manasri , " Determination of Sugar Content in Sugar Solutions using Interdigital Capacitor Sensor " .
- [6] Donald Ruffatto, Aaron Parness, Matthew Spenko, " Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic/gecko-like adhesive " .
- [7] A.V. MAMISHEV, K.S. RAJAN , F. YANG, Y. DU , A. ZAHN , " Interdigital Sensors and Transducers "
- [8] M Mehdi-zadeh , " Microwave RF Applicators and Probes for Material Heating, Sensing, and Plasma Generation\_ A Design Guide " , 2009 .
- [9] T. Dong , C. Barbosa , " Capacitance Variation Induced by Microfluidic Two-Phase Flow across insulated Interdigital Electrodes in Lab-On-Chip Devices " .
- [10] W. S. Mortley, "Pulse compression by dispersive gratings on crystal quartz," *Marconi Rev.*, no. 59, pp. 273–290, 1965.
- [11] I. G. Matis, "On multiparameter control of dielectric properties of laminate polymer materials," *Latvijas PSR Zinatnu Akademijas Vestis Fizikas un Tehnisko*, no. 6, pp. 60–67, 1966.
- [12] S. D. Senturia , C. M. Sechen, "The use of the charge-flow transistor to distinguish surface and bulk components of thin-film sheet resistance," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-24, no. 9, p. 1207, Sept. 1977.
- [13] M. Alberti , L. Meixner, A. Ruckerl, M. Eder, H.-E. Endres, K. Bock , " Sensor-Filter , Intelligent micro filter system in foil technology " .
- [14] P. V. Gerwen, W. Laureys, G. Huyberechts, M. O. D. Beeck, K. Baert, J. Suls, A. Varlan, W. Sansen, L. Hermans, R. Mertens, "Nanoscaled Interdigitated Arrays for Biochemical Electrode Sensors", 1997 International Conference on Solid-state Sensors and Actuators Chicago, June 76-19, 1997.
- [15] K G Ong, K Zeng, and C A. Grimes, "A Wireless, Passive Carbon Nanotube-Based Gas Sensor", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 2, No. 2, April 2002.
- [16] Francisco MOLINA LOPEZ, " Inkjet-Printed Multisensor Platform on Flexible Substrates for Environmental Monitoring"
- [17] Jun Wan Kim, " Development of Interdigitated Capacitor Sensors for Direct and Wireless Measurements of the Dielectric Properties of Liquids"
- [18] Isabelle Bord, " Etude d'un capteur capacitif differentiel pour la detection de pluie"
- [19] Sheng Zhang , " Interdigitated Capacitor Sensor for Complex Dielectric Constant Sensing"
- [20] Rui Igreja , C.J. Dias, " Analytical evaluation of the interdigital electrodes

capacitance for a multi-layered structure”

**[21]** Jian Z. Chen, Anton A. Darhuber, Sandra M. Troian Sigurd Wagner, ” Capacitive sensing of droplets for microfluidic devices based on thermocapillary actuation”

**[22]** Maher F. El-Kady, Richard B. Kaner, ” Scalable fabrication of high-power graphene micro-supercapacitors for flexible and on-chip energy storage”

# **Annexes**

## Annexe 1

### Programme matlab selon le modèle de transformation conforme

```
clear all ;
clc ;
%parametres pour les 6 capteurs suivant l'ordre (1-6)
%parametres geometriques
%fixes
L= 20e-3 ; N = 20 ; t_elec =35e-6 ;
%variables
a=[ 1 0.5 0.5 0.25 0.5 0.25 ]*1e-3 ;
b=[ 2 1 1.5 0.5 0.75 0.75 ]*1e-3 ;
%parametres dielectriques
%fixes
ep0 = 8.854e-12 ; ep_mst=1 ; ep_isol=1 ; ep_subs=4.3 ;
% capacitance du materiau sous test
Cmst= ep0*(ep_mst /2)*ellipke(sqrt(1-(a./b).^2)) ./ellipke(a./b);
%capacitance de substrat
Csubs= ep0*(ep_subs/2)*ellipke(sqrt(1-(a./b).^2)) ./ellipke(a./b);
%capacitance du couche d'isolation
Cisol= ep0*ep_isol*t_elec./a ;
%capacitance d'une cellule unitaire
Ccu = Cmst + Csubs + Cisol ;
%capacite totale du capteur IDC
Cidc = L *(N-1) * Ccu ;
```

## Annexe 2

### Programme matlab selon le Modèle de CHEN et al

```
%Methode CHEN et al.%
```

```
%parametres pour les 6 capteurs suivant l'ordre (1-6)
```

```
%parametres geometriques
```

```
%fixes
```

```
L= 20e-3 ; N = 20 ;
```

```
%variables
```

```
s=[ 1 0.5 0.5 0.25 0.5 0.25 ]*1e-3 ;
```

```
w=[ 1 0.5 1 0.25 0.25 0.5 ]*1e-3 ;
```

```
%parametres dielectriques
```

```
%fixes
```

```
ep0 = 8.854e-12 ; ep_mst=3.7 ;
```

```
% capacitance de cellule unitaire
```

```
Ccu_ch = ((2*ep0*ep_mst)/pi)*log(1 + (2*w./s) + sqrt(((1+2*w./s).^2)-1))
```

```
%capacite totale du capteur IDC
```

```
Cidc_ch=L*Ccu_ch*(N-1)
```

### Annexe 3

#### Programme matlab selon le modèle de IGREJA et al

```
%Methode iGREJA-DIAZ %
L= 20e-3 ; N = 20 ; t_pcb =1.575e-3 ;
s=[ 1 0.5 0.5 0.25 0.5 0.25 ]*1e-3 ;
w=[ 1 0.5 1 0.25 0.25 0.5 ]*1e-3 ;
ep0 = 8.854e-12 ; ep_air=1 ; ep_pcb=4.3 ;
lambda = 2.*(w+s) ;
eta = 2*w./lambda ;
r= t_pcb ./ lambda ;
ki_air=sin(pi*eta./2) ;
ki_airp=cos(pi*eta./2);
q=exp( -4 *pi.*r);
m = 16*q-128*q.^2+704*q.^3-3072*q.^4;
k=sqrt(m);
t4 = 1./k;
t2 = ellipj(ellipke(k).*eta, k );
ki = t2.*((t4.^2 - 1)/(t4.^2 - t2.^2))^0.5;
ki_p=sqrt(1- ki.^2);
%capacitance d'une cellule unitaire interne
Ci= 2*ep0*ep_air.*ellipke(ki_air)./ellipke(ki_airp) ...
+ ep0*( ep_pcb-1).*ellipke(ki)./ellipke(ki_p) ;
ke_inf = 2*sqrt(eta)./(eta+1);
ke_infp= sqrt(1-ke_inf.^2);
t4 = cosh((pi*(1+eta))/8.*r);
t3 = cosh((pi*(1-eta))/8.*r);
ke = (1./t3)*((t4.^2 - t3.^2) / (t4.^2 - 1))^0.5;
ke_p=sqrt(1- ke.^2);
%capacitance d'une cellule unitaire externe
Ce= ep0*(ep_pcb-1).*ellipke(ke)./ellipke(ke_p )...
+ 2*ep0*ep_air.*ellipke(ke_inf)./ellipke(ke_infp);
%capacitance 2D
C2d_ig= (2*Ce.*Ci./(Ce+Ci))+ (N-3)*Ci./2
%capacite totale du capteur IDC
Cidc_ig=L*C2d_ig
```

---

## Annexe 4

<b>Typical Properties: AD260A</b>			
Property	Test Method	Condition	Result
Dielectric Constant @ 10GHz	IPC TM-650 2.5.5.5	C23/50	2.60
Dielectric Constant @ ~ 200 MHz	IPC TM-650 2.5.5.6		2.60
Dielectric Constant @ 1MHz	IPC TM-650 2.5.5.3		2.60
Loss Tangent @ 10 GHz	IPC TM-650 2.5.5.6	C23/50	0.00170
Loss Tangent @ 1 MHz	PC TM-650 2.5.5.3		0.00135
Thermal Coefficient of $\epsilon_r$	IPC TM-650 2.5.5.5	-10°C to +140°C	- 80
Copper peel Strength (1oz) lbs (lbs. per linear inch)	IPC TM-650 2.4.8	A, TS	17
Volume Resistivity (M $\Omega$ -cm)	IPC TM-650 2.5.17.1	C96/35/90	1.1 x 10 <sup>9</sup>
Surface Resistivity (M $\Omega$ )	IPC TM-650 2.5.17.1	C96/35/90	4.5 x 10 <sup>7</sup>
Arc Resistance (seconds)	ASTM D-495	D48/50	>180
Tensile Modulus (kpsi)	ASTM D-638	A, 23°C	> 700
Tensile Strength (kpsi)	IPC TM-650 2.4.18	A, 23°C	> 20
Compressive Modulus (kpsi)	ASTM D-695	A, 23°C	> 350
Flexural Modulus (kpsi)	ASTM D-790	A, 23°C	> 540
Dielectric Breakdown (kV)	ASTM D-149	D48/50	> 45
Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D-792 Method A	A, 23°C	2.30
Water Absorption (%)	IPC TM-650 2.6.2.2	E1/105 + D24/23	0.04
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/°C)	IPC TM-650 2.4.24 TMA	0°C to 100°C	
X Axis			16
Y Axis			16
Z Axis			80
Thermal Conductivity (W/mK)	ASTM E-1225	100°C	0.32
Flammability	UL 94 Vertical Burn	C48/23/50, E24/125	UL94-V0

### **Material Availability:**

Current Standard Production is based on 0.030" and 0.060" thickness designs. Other thicknesses, may be available upon request. Please contact Arlon Customer Service to discuss your application. AD260A is supplied with 1/2, 1 or 2 ounce electrodeposited copper on both sides. Other copper weights and rolled copper foil are available.

When ordering AD260A, specify dielectric thickness, cladding, panel size and any other special considerations. Typical Panels are cut from a Master Sheet. The master sheet is limited to 36" x 48". Typical panel sizes cut from a master sheet include: 12" x 18", 18" X 24", 16" X 18". Custom sizes are available.

---

*Results listed above are typical properties; they are not to be used as specification limits. The above information creates no expressed or implied warranties. The properties of Arlon laminates may vary depending on the design and application.*

## **Résumé:**

De nos jours l'intégration des capteurs est de plus en plus répandue dans tous les équipements et dans différents domaines (santé, médicale, environnement, ...). A ce titre, il existe une forte demande pour des capteurs à faible coût de fabrication, à mesure rapide et continu et aussi non-destructif. Parmi ces capteurs on trouve les capteurs capacitifs à peignes inter-digités IDC. Ces derniers sont utilisés dans les composants à ondes de surfaces (SAW), capteurs d'humidité, capteurs à gaz et capteurs biologiques, etc. La problématique est la conception de capteurs avec topologies de peignes inter-digités pour la caractérisation de matériaux (sous test) afin de déterminer les propriétés physiques en fonction de l'application donnée. Dans ce travail nous avons présentés les capteurs IDC et les méthodes analytiques de calcul. Nous avons aussi présenté des simulations 2D et 3D d'un capteur IDC sous Comsol multi-physiques, ainsi que le test expérimentale de six échantillons de IDC en PCB.

**Mots Clés :** capacités à peignes inter-digités, modèles analytiques, simulation éléments finis.

## **Abstract :**

Nowadays sensor integration is increasingly embedded in all the equipment and in various areas (health, medical, environmental, ...). There is a strong need for low-cost sensors, with fast and real time measurement and no-destructive test. Interdigital capacitor sensor can answer to these need. These structures is used in various devices as; surface wave components (SAW) , humidity sensors , gas sensors and biosensors , ... The problem is to design sensor with topologies of Interdigital capacitor for materials characterization ( under test ) to determine the properties according to a particular application. In this work we presented the IDC sensors and analytical methods of calculation. We also introduced 2D and 3D simulations of an IDC sensor under Comsol multi-physics, as well as the six experimental test samples IDC-PCB .

**Key words:** Interdigital capacitor, analytic models, Finite elements simulation.