



HAL
open science

Etude d'un capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie

Isabelle Bord

► **To cite this version:**

Isabelle Bord. Etude d'un capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie. Electronique. Université Bordeaux 1, 2006. Français. NNT : . tel-01025459

HAL Id: tel-01025459

<https://theses.hal.science/tel-01025459>

Submitted on 18 Jul 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 3170

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DE SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

par **Isabelle BORD**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : ELECTRONIQUE

Etude d'un capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie

Soutenue le : 08 juin 2006

Après avis de :

MM.	E. LLOBET	Professeur, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona	Rapporteur
	J.P. VIRICELLE	Maître de Conférences, ENSM, Saint-Etienne	Rapporteur

Devant la commission d'examen formée de :

MM.	S. CHARTON	Ingénieur, PSA, Vélizy	Examineur
	E. LLOBET	Professeur, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona	Rapporteur
	F. MENIL	Directeur de recherche CNRS, IXL, Bordeaux 1	Directeur de thèse
	C. PELLET	Professeur, IUT Bordeaux 1	Président
	P. TARDY	Maître de Conférences, IUT Bordeaux 1	Co-Directeur de thèse
	J.P. VIRICELLE	Maître de Conférences, ENSM, Saint-Etienne	Rapporteur

Remerciements

Avec ma formation de physico-chimiste, rien ne laissait présager que je préparerai un jour une thèse en électronique. Et pourtant, me voilà aujourd'hui Docteur en sciences physiques et de l'ingénieur, spécialité électronique.....

Je suis arrivée au laboratoire un beau matin de septembre 2002. Je ne connaissais alors personne, ni enseignants ni étudiants. Après des débuts hésitants au milieu de tous ces microélectroniciens (wafer, LNA, DLL factorisée, mais quel dialecte étrange parlent-ils ?), j'ai réussi à trouver ma place, non sans l'aide précieuse de nombreuses personnes...

Mes travaux de recherche ont été réalisés au laboratoire de microélectronique IXL (UMR5818) de l'Université Bordeaux I. Je remercie donc le Professeur André Touboul, Directeur des lieux, de m'y avoir accueillie.

Je remercie très sincèrement le Professeur Claude Pellet pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. J'exprime toute ma gratitude au Maître de Conférences Jean-Paul Viricelle (Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne) et au Professeur Eduard Llobet (Universitat Rovira i Virgili de Tarragona), rapporteurs de cette thèse, pour toute l'attention qu'ils ont porté à mon travail. Je remercie également Stéphane Charton, ingénieur à PSA, pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, le Directeur de Recherches Francis Ménil, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ces années et pour ses précieux conseils, notamment lors de la rédaction de ce document.

Comment exprimer ma reconnaissance à Pascal Tardy, Maître de Conférences et co-directeur de cette thèse ? D'abord je tiens à le remercier pour la grande autonomie qu'il m'a laissée concernant l'orientation de mes travaux. Merci également pour son soutien inconditionnel tant sur le plan scientifique que moral. Mais je voudrais surtout saluer ses qualités humaines, notamment sa franchise, sa droiture et son ouverture d'esprit. Qu'il sache combien j'ai apprécié travailler à ses côtés.

Je n'oublierai en aucun cas de remercier les membres du groupe « Microtechnologies : matériaux micro-assemblés, capteurs, microsystèmes », en particulier le Professeur Jacques Pistré et le Directeur de Recherches Claude Lucat, pour leur soutien et leur sympathie ainsi que les Maîtres de Conférences Céline Zimmermann et Angélique Tételin, sans oublier l'ensemble des doctorants, anciens et plus récents, notamment Marie-Pascale Martin, Patrick Ginet, Florence Razan et Nicolas Moll.

Un grand merci au Chargé de Recherches Lionel Hirsch, au Maître de Conférences Yannick Deshayes et au Professeur Albert-Serge Barrière pour leur aide scientifique inestimable mais aussi pour leur amitié.

J'associe à ce travail et je remercie le Maître de Conférences Bertrand Carbonne ainsi que les ingénieurs et techniciens Bruno Lévrier, Jean-Yves Delétage, Bernard Plano, Régis Devreese, Patrick Villesuzanne, Jean-Emmanuel Dom, Jean-Luc Lachaud et Serge Destor pour leur aide précieuse et leur disponibilité.

Je tiens également à remercier les Maîtres de Conférences Nathalie Malbert, Hervé Lapuyade (et Patricia), Jean-Baptiste Begueret, Eric Kerhervé, Thierry Taris et sa douce, Benjamin Caillard et Frédéric Darracq, les Professeurs Yves Ousten et Yann Deval ainsi que les ingénieurs Magali de Matos, Patrick Hellmuth et Birama Goumballa pour leur sympathie et leur soutien.

Merci à tout le personnel administratif et plus particulièrement à Simone Dang Van pour sa bonne humeur quotidienne. Je n'oublierai pas de remercier l'ensemble du personnel technique, notamment Alice Tea pour sa gentillesse légendaire.

Et puis, il y a tous les doctorants (beaucoup ne le sont plus !) avec qui j'ai traversé ces dures années de labeur, en particulier Nathalie Deltimple (ma grande blonde préférée), Cyril Recoquillon (c'est vrai qu'il va souvent à la piscine !), Christophe Rougier (non, je ne suis pas taxi !), Vincent Lagarestre (et sa petite) et Nicolas Seller (tous deux expatriés à Grenoble), Mikaël Cimino (La Moustache) et sa chérie, Didier Castagnet (rugbyman en congés maladie), Patrice Jaulent (le gars du sud), Laurent Mendizabal, Guillaume Monnerie (et ses blagues), Sébastien Frégonèse, Nolwenn Huby, Corinne Bestory et Alexandrine Guédon-Gracia : merci à chacun de vous...

J'ai eu la chance, durant ma thèse, de pouvoir enseigner d'abord au département « Mesures Physiques » de l'IUT en tant que vacataire puis à l'UFR de Physique pendant mon année d'ATER. Je tiens donc à remercier l'ensemble des personnes, enseignants et étudiants, avec qui j'ai eu le plaisir de travailler ainsi que les techniciens Laurent Gonthier (IUT), Pierre Bordenave (Département Licence de l'UFR) et Xavier Brilland (CRPHY) pour leur grande disponibilité. Un merci tout particulier aux Professeurs Eric Mevel (CELIA) et Daniel Chasseau (ICMCB) qui m'ont très vite accordé leur confiance. A cette occasion, j'adresse un grand merci au groupe IX de l'ICMCB et surtout au Maître de Conférences Corine Mathonière pour son soutien et son amitié.

Ces travaux n'aurait jamais pu aboutir sans le soutien moral de mes amis : Nathalie et Vincent, Sophie et Vincent, Anne et Marc, Emilie et Laurent, Carine et Roland, Nico, Mit, Cécile et Julien, Marianne et Julien (et leur petite Léane) ainsi que Laurent et Cécilia. Je tiens à leur témoigner ici de ma plus profonde amitié...

Un infini merci à ma famille, particulièrement à mes parents. Je sais qu'ils sont fiers de moi, mais peut-être ne savent-ils pas que moi je suis encore plus fière d'être leur fille (unique en plus !). Papa, maman, merci pour tout ...

Mais cette thèse m'a apporté bien plus que le grade de Docteur, l'homme de ma vie : Cédric, je t'aime tellement....

Table des matières

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : Capteurs de pluie : Etat de l'art - Positionnement de l'étude	7
I. Introduction.....	9
II. Détection de l'eau : principes et applications.....	9
II.1. Préambule	9
II.2. Application à la détection de pluie sur un pare-brise	11
II.2.a. Capteurs électro-optiques	12
II.2.b. Capteurs capacitifs.....	14
III. Capteur capacitif de pluie : étude bibliographique.....	17
III.1. Capteurs à électrodes externes	18
III.1.a. Historique	18
III.1.b. Bilan	25
III.2. Capteurs à électrodes protégées	26
III.2.a. Electrodes déposées sur la face interne du pare-brise	26
III.2.b. Electrodes intégrées au pare-brise.....	27
III.3. Bilan	30
IV. Positionnement de l'étude.....	31
IV.1. Cahier des charges	31
IV.1.a. Intégrabilité/compatibilité	31
IV.1.b. Sensibilité.....	32
IV.1.c. Fiabilité/durabilité	33
IV.1.d. Reproductibilité.....	34
IV.1.e. Coût.....	34
IV.2. Choix de la configuration du capteur.....	34
IV.2.a. Description du capteur	35
IV.2.b. Principe de fonctionnement	36
IV.3. Objectif de l'étude.....	36
Bibliographie	38

CHAPITRE II : Comportement diélectrique des matériaux du pare-brise : étude en fréquence et en température.....	43
I. Introduction.....	45
II. Matériaux du pare-brise.....	45
II.1. Polyvinyl butyral	46
II.2. Verre sodocalcique	47
III. Etude théorique des phénomènes diélectriques.....	48
III.1. Approche macroscopique des phénomènes diélectriques.....	48
III.1.a. Généralités.....	48
III.1.b. Condensateur plan dont les armatures métalliques sont séparées par le vide ..	49
III.1.c. Condensateur plan dont les armatures métalliques sont séparées par un milieu diélectrique	50
III.2. Approche microscopique des phénomènes diélectriques.....	54
III.2.a. Modes de polarisation.....	54
III.2.b. Polarisation dipolaire : modèle de Debye	56
IV. Comportement diélectrique des matériaux du pare-brise	59
IV.1. Principe de la spectroscopie d'admittance	59
IV.2. Caractérisation électrique du PVB.....	61
IV.2.a. Mesures préliminaires	61
IV.2.b. Applicabilité du modèle de Debye.....	63
IV.2.c. Approche quantique des phénomènes diélectriques : modèle du double puits de potentiel.....	65
IV.3. Caractérisation électrique du verre	70
IV.3.a. Comparaison des trois échantillons de verre.....	71
IV.3.b. Approche quantique des phénomènes diélectriques	72
V. Conclusion.....	75
Bibliographie	76
CHAPITRE III : Dimensionnement des capteurs par simulation numérique et fabrication	79
I. Introduction.....	81
II. Règles de dimensionnement des capteurs capacitifs	82
II.1. Relation entre les écartements séparant les électrodes	83

II.2. Relations entre les écartements séparant les électrodes et l'épaisseur du verre	83
II.3. Relation entre la largeur des électrodes et l'épaisseur du PVB	84
II.4. Relation entre la largeur des électrodes et la largeur de la couche athermique	84
II.5. Relations entre les écartements entre électrodes et la longueur des électrodes	84
III. Estimation des capacités par la méthode des capacités partielles	86
III.1. Condensateurs coplanaires bicouches	86
III.2. Condensateurs coplanaires multicouches	88
III.3. Limitations des modèles analytiques	94
IV. Calcul des capacités par la méthode des éléments finis	94
IV.1. Principe de la méthode	94
IV.2. Méthode de programmation	96
V. Dimensionnement du capteur par simulation numérique	98
V.1. Simulations numériques en 2D	98
V.1.a. Choix de la fréquence de fonctionnement du capteur	99
V.1.b. Initialisation des valeurs	100
V.1.c. Optimisation des paramètres dimensionnels	102
V.2. Simulations numériques en 3D	105
V.2.a. Configurations du capteur	105
V.2.b. Dimensionnement des capteurs en condition sèche	108
VI. Fabrication des capteurs simplifiés	113
VI.1. Dépôts des électrodes par sérigraphie : technologie couche épaisse	115
VI.1.a. Choix de l'encre	115
VI.1.b. Sérigraphie	116
VI.1.c. Traitement thermique	120
VI.1.d. Caractérisation	120
VI.2. Dépôts des électrodes par évaporation thermique sous vide : technologie couche mince	122
VI.2.a. Méthode directe	123
VI.2.b. Méthode indirecte (résine photosensible positive)	125
VII. Conclusion	126
Bibliographie	128

CHAPITRE IV : Influence de l'eau sur les capacités du capteur : étude par simulation numérique et validation expérimentale.....	131
I. Introduction.....	133
II. Cas simple : étude de l'influence d'un film d'eau par simulation numérique.....	134
II.1. Variation des capacités en présence d'un film d'eau	134
II.2. Comparaison des configurations complète et simplifiée.....	136
II.2.a. Electrodes linéaires	136
II.2.b. Electrodes interdigitées.....	137
II.3. Influence de l'électrode de garde.....	141
III. Cas réel : étude de l'influence de gouttes d'eau par simulation numérique et validation expérimentale	146
III.1. Capteurs à électrodes linéaires	147
III.1.a. Etude par simulation numérique.....	147
III.1.b. Validation expérimentale	150
III.2. Capteurs à électrodes interdigitées.....	153
III.2.a. Etude par simulation numérique.....	153
III.2.b. Validation expérimentale	154
III.2.c. Origine du manque de sensibilité	156
IV. Conclusion	162
Bibliographie	165
CHAPITRE V : Influence de la température sur les performances du capteur : étude par simulation numérique et validation expérimentale.....	167
I. Introduction.....	169
II. Influence de la dilatation thermique des matériaux.....	169
II.1. Capteur simplifié	171
II.2. Capteur complet.....	171
III. Influence de la modification des propriétés diélectriques des matériaux.....	173
III.1. Capteur simplifié	173
III.1.a. Etude par simulation numérique.....	173
III.1.b. Validation expérimentale	174
III.2. Capteur complet	178
IV. Conclusion	181

Bibliographie	182
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	183
PRODUCTION SCIENTIFIQUE	191

INTRODUCTION

Le marché de l'électronique automobile est en plein essor. Près du tiers de la valeur d'un véhicule est d'origine électronique ou informatique et 80 % des innovations en Recherche & Développement concerne ces domaines. Les avancées technologiques permettent d'améliorer le confort mais aussi la sécurité des passagers du véhicule. Citons comme exemples le régulateur de vitesse, la détection d'obstacles, la vision IR de nuit, le freinage ABS, le stabilisateur de trajectoire ESP ou encore le kit mains libres permettant de transférer automatiquement les appels d'un téléphone mobile vers l'interface vocale du véhicule.

Dans ce contexte, les constructeurs automobiles désirent développer un nouveau type de capteur de pluie permettant la gestion automatique du fonctionnement des essuie-glaces. A terme, ce capteur est destiné à remplacer les capteurs électro-optiques, largement diffusés sur le marché automobile, mais qui présentent certains inconvénients, parmi lesquels un coût élevé et un certain manque de sensibilité.

Parmi les principes de détection existant, peu sont adaptés à la détection de pluie sur un pare-brise automobile. Seuls les capteurs capacitifs, simple d'utilisation et de faible coût de revient, semblent à même de remplir ce rôle. Mais ces derniers présentent eux aussi quelques défauts qui retardent leur éclosion sur le marché automobile. Dans ce travail, nous nous proposons de chercher des solutions permettant de pallier aux différents problèmes rencontrés par les capteurs capacitifs de pluie développés jusqu'à maintenant.

Dans un premier temps, une étude bibliographique permet de faire le point sur l'état de l'art en matière de capteurs de pluie. Le mode de fonctionnement, les performances et les points faibles de chaque capteur sont analysés dans le but de définir les bases du travail de développement d'un capteur capable de résoudre les problèmes inhérents aux capteurs capacitifs de pluie. Cette étude préliminaire fait l'objet du premier chapitre. A l'issue de cette étude, notre choix se porte sur un capteur capacitif différentiel constitué d'une capacité sensible à la présence d'eau et d'une capacité de référence. L'étude bibliographique montre, outre la validité théorique du concept, l'intérêt de lancer une étude approfondie d'un tel capteur par simulation numérique afin d'identifier les paramètres sensibles influant sur son fonctionnement.

Pour débiter la phase de dimensionnement du capteur, la connaissance des caractéristiques électriques des matériaux du pare-brise est indispensable. Un pare-brise automobile est

constitué d'un film synthétique de polyvinyl butyral (PVB) inséré entre deux feuillets de verre. L'étude expérimentale du comportement des permittivités diélectriques du verre et du PVB en fréquence permet de déterminer le domaine fréquentiel optimal de fonctionnement du capteur. Par ailleurs, le capteur, implanté à l'intérieur du pare-brise, sera soumis aux mêmes variations de température $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$ et devra pouvoir fonctionner correctement dans cet intervalle. Une étude du comportement des permittivités diélectriques des matériaux en température est donc menée en parallèle. La constitution d'une banque de données regroupant les valeurs expérimentales des permittivités diélectriques des matériaux du pare-brise fait l'objet du deuxième chapitre. La confrontation des résultats expérimentaux aux différents modèles théoriques du comportement des permittivités diélectriques permet de déterminer des expressions semi-empiriques traduisant la dépendance en température et en fréquence de la permittivité diélectrique du verre et du PVB.

Le troisième chapitre décrit la phase de dimensionnement du capteur par simulation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis. Le dimensionnement de l'élément sensible doit conduire à l'égalité de la capacité sensible et de la capacité de référence en condition sèche et à un déséquilibre optimal en présence d'eau sur le capteur. Cette étude comporte deux volets distincts. Une étude numérique préalable en 2D permet d'identifier les paramètres sensibles influant sur le fonctionnement du capteur et d'en faire une première estimation. Cette étude fournit les bases du calcul numérique en 3D, conduisant au dimensionnement complet du capteur. Deux motifs d'électrodes sont étudiés : électrodes linéaires et électrodes interdigitées. Dans la configuration complète du capteur, les trois électrodes coplanaires délimitant les deux capacités utiles à la détection en mode différentiel, sont insérées à l'intérieur du pare-brise, entre le feuillet de verre extérieur et le PVB. Cependant, de tels capteurs ne sont pas réalisables au laboratoire qui ne dispose pas des moyens d'assemblage verre/PVB/verre. Nous considérons alors un capteur simplifié composé uniquement de la zone sensible du capteur, c'est-à-dire du substrat de verre et des trois électrodes. Le capteur simplifié, également dimensionné par simulation numérique, est ensuite fabriqué. Différents modes de fabrication sont expérimentés.

La sensibilité à l'eau du capteur est étudiée au quatrième chapitre. L'influence de l'eau sous diverses formes (film uniforme et gouttes de volumes variables) est d'abord évaluée par simulation numérique, sur chacune des configurations du capteur. Des mesures de capacités

sont ensuite effectuées sur les capteurs simplifiés, en condition sèche, puis en présence de gouttes d'eau. A l'issue de cette étude, nous aurons une idée plus précise des performances et des limites de détection de chaque motif d'électrodes (linéaires et interdigitées) envisageable pour le capteur final.

Le capteur doit permettre de détecter la présence de pluie sur le pare-brise en restant insensible aux paramètres perturbateurs susceptibles d'entraîner un déclenchement intempestif des essuie-glaces. En particulier, les capteurs capacitifs sont habituellement sensibles aux fluctuations de température qui peuvent affecter le comportement du capteur à différents niveaux (notamment variation de la permittivité diélectrique étudiée au chapitre II et dilatation thermique des matériaux). Le fonctionnement en mode différentiel est sensé réduire cette influence de la température. C'est ce que nous nous proposons de vérifier dans le cinquième et dernier chapitre.

CHAPITRE I

Capteurs de pluie : Etat de l'art Positionnement de l'étude

I. Introduction.....	9
II. Détection de l'eau : principes et applications.....	9
II.1. Préambule	9
II.2. Application à la détection de pluie sur un pare-brise	11
II.2.a. Capteurs électro-optiques	12
II.2.b. Capteurs capacitifs.....	14
III. Capteur capacitif de pluie : étude bibliographique.....	17
III.1. Capteurs à électrodes externes	18
III.1.a. Historique	18
III.1.b. Bilan	25
III.2. Capteurs à électrodes protégées	26
III.2.a. Electrodes déposées sur la face interne du pare-brise	26
III.2.b. Electrodes intégrées au pare-brise.....	27
III.3. Bilan	30
IV. Positionnement de l'étude.....	31
IV.1. Cahier des charges	31
IV.1.a. Intégrabilité/compatibilité	31
IV.1.b. Sensibilité.....	32
IV.1.c. Fiabilité/durabilité	33
IV.1.d. Reproductibilité.....	34
IV.1.e. Coût.....	34
IV.2. Choix de la configuration du capteur.....	34
IV.2.a. Description du capteur	35
IV.2.b. Principe de fonctionnement	36
IV.3. Objectif de l'étude.....	36
Bibliographie	38

I. Introduction

Les capteurs de pluie sont utilisés dans des domaines variés essentiellement liés à l'environnement, à l'agriculture, à l'automobile ou encore au bâtiment. Dans d'autres secteurs, comme l'industrie alimentaire ou chimique, des capteurs sont utilisés pour contrôler la présence d'eau lors de certains processus de fabrication. Dans la littérature, différents principes de détection sont décrits, mais peu sont adaptés à la détection de pluie sur un pare-brise automobile. A ce jour, seuls deux types de capteurs semblent à même de remplir ce rôle :

- les capteurs électro-optiques,
- les capteurs capacitifs.

Les capteurs électro-optiques sont déjà largement diffusés sur le marché automobile, mais présentent certains inconvénients qui justifient l'intérêt croissant porté aux capteurs capacitifs. Ces derniers, malgré leur simplicité et leur faible coût de revient, présentent eux aussi quelques défauts, qui ont jusqu'ici retardé leur éclosion sur le marché automobile. L'objectif de ce travail consiste à chercher des solutions contribuant à résoudre les problèmes inhérents aux capteurs capacitifs de pluie développés jusqu'à maintenant.

Dans ce contexte, une étude bibliographique permet de faire l'inventaire des différents types de capteurs capacitifs adaptés à la détection de pluie sur un pare-brise et d'en analyser les modes de fonctionnement ainsi que les défauts et qualités. Cette phase est déterminante pour le choix de la configuration du capteur à développer.

Dans le cadre de ce travail, seule la partie sensible du capteur est étudiée. Le dispositif électronique associé n'est pas traité.

II. Détection de l'eau : principes et applications

II.1. Préambule

Les principes de détection de l'eau sont aussi variés que l'application des capteurs. La plupart sont destinés à détecter de petites quantités d'eau, souvent sous forme de vapeur (hygromètres). D'autres permettent de déterminer la teneur en eau liquide dans les milieux

poreux (par exemples les sols) ou dans certaines substances comme le pétrole [Gar95], les huiles ou encore les solvants.

Ces capteurs reposent sur des principes de détection variés, basés notamment sur :

- la gravimétrie,
- la déformation d'un matériau,
- la modifications des propriétés optiques,
- la modifications des propriétés électriques.

La majorité de ces capteurs présente une couche sensible qui réagit au contact de l'eau.

Voici quelques exemples de détecteurs d'eau qui illustrent chacun de ces principes.

Parmi les capteurs à couche sensible, le plus connu des capteurs gravimétriques est la microbalance à quartz, dont le principe repose sur l'effet piézoélectrique. La microbalance est généralement recouverte d'une couche hygroscopique. Cet élément sensible, dont la masse augmente en présence de vapeur d'eau, constitue l'oscillateur d'un circuit résonant. Le changement de masse entraîne une modification de la fréquence de résonance, utilisée pour détecter la présence d'eau.

Certains capteurs utilisent des matériaux superabsorbants, le plus souvent des polymères, qui gonflent au contact de l'eau. De tels capteurs sont utilisés pour détecter la présence d'eau dans les fibres optiques [Hog93]. La mesure de la perte optique, liée à la déformation du câble, par réflectométrie optique temporelle (OTDR), permet de localiser l'eau dans la fibre [Tak94][Kin02]. De même, pour mesurer la teneur en eau des solvants organiques, Bai et Seitz [Bai94] utilisent un capteur à fibre optique dont l'élément sensible est une résine polymère échangeuse d'anion. Le gonflement du polymère avec l'eau provoque le mouvement d'un diaphragme réfléchissant qui modifie l'intensité du faisceau réfléchi dans la fibre optique. La déformation des matériaux, engendrée par l'adsorption et/ou l'absorption d'eau, est également utilisée par les transducteurs piézorésistifs [Sag94].

Si certains capteurs à couche sensible utilisent la variation de volume, d'autres reposent sur la modification des propriétés optiques d'une substance chimique en interaction avec l'eau, comme la fluorescence [Cha97] ou l'absorbance. En 1996, Blyth et al. [Bly96] développent un capteur holographique qui relie le maximum d'absorption de la lumière diffractée à la concentration en eau dans les solvants.

D'autres types de capteurs utilisent la modification des propriétés électriques des matériaux en présence d'eau. Les capteurs résistifs reposent sur la variation de la résistivité de matériaux, comme les céramiques [Tra95] ou encore certains polymères. Le polydiméthylphosphazène est utilisé comme membrane sensible par Anchini et al. [Anc96] dans l'élaboration de capteurs résistifs et capacitifs. Les électrolytes polymères solides constituent également de bons candidats [Li01] comme film sensible pour ce genre d'applications. Les capteurs capacitifs représentent près de 75% des capteurs d'humidité commerciaux [Rit02]. Leur principe repose sur la variation de la capacité induite à la fois par les propriétés hygroscopiques des matériaux et par la géométrie et les dimensions des électrodes. En 1970, Goodman et al. [Goo70], décrivent un capteur capacitif permettant de déterminer la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant. Le capteur est constitué d'une base d'aluminium recouvert d'une couche mince et poreuse d'alumine. La capacité entre les deux électrodes, l'une connectée à l'alumine et l'autre à l'aluminium, varie proportionnellement à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Si certains capteurs capacitifs présentent une couche sensible dont la permittivité diélectrique varie en présence d'eau (par exemple en polyimide [Mat98] ou en polysulfone (PSF) [Kur95]), d'autres n'en possèdent pas. C'est le cas du dispositif de sonde capacitive mis au point par Fen-Chong et al. [Fen04] permettant de déterminer la teneur en eau liquide et la constante diélectrique dans les milieux poreux (sols). Cette technique utilise les propriétés diélectriques très différentes de l'eau, de l'air et du substrat minéral. En 2004, Auge et al. [Aug04] développent un capteur capacitif permettant de mesurer le taux d'écoulement des liquides dans un capillaire en reliant les valeurs de capacité au volume des gouttes. Jachowisz et Wermczuk [Jac00] considèrent un hygromètre à point de rosée (détection optique) comprenant un détecteur capacitif interdigité permettant de différencier l'eau surfondue et la glace aux températures négatives. Le principe de ce capteur repose sur la modification de la capacité avec l'état de l'eau. En 2000, Marendic-Miljkovic et al. [Mar00] étudient un capteur de pluie dont la détection repose sur le contact électrique établi par une goutte de pluie entre deux électrodes interdigitées.

II.2. Application à la détection de pluie sur un pare-brise

Parmi les principes de détection que nous venons de citer, peu sont adaptés à la détection de pluie sur un pare-brise automobile. Seuls deux types de capteurs semblent à même de remplir ce rôle à l'heure actuelle.

II.2.a. Capteurs électro-optiques

Certains véhicules automobiles sont déjà équipés de capteurs de pluie électro-optiques [Lar89] [Tan99]. Ce type de capteur met à profit le phénomène de diffraction à la frontière entre deux milieux d'indice différents : le verre du pare-brise et l'air extérieur. Placée sur la face interne du pare-brise, au niveau du rétroviseur, une diode électroluminescente infrarouge (IR) émet un faisceau recueilli par une diode réceptrice, située sur la même face que l'émetteur (*Figure I.1*). Si le pare-brise est sec, le rayon est intégralement réfléchi (réflexion totale). En revanche, la présence d'eau en surface du pare-brise entraîne la modification de l'indice de réfraction optique et la diffraction du faisceau IR. L'amplitude de l'onde réfléchie, mesurée par le photodétecteur, est plus faible.

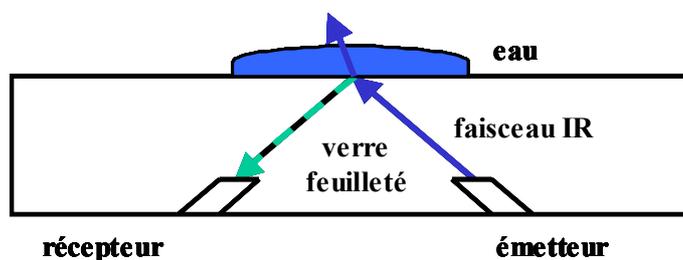


Figure I. 1 : capteur électro-optique basé sur le principe de réflexion totale

Une variante, développée par Britt [Bri97], consiste à transmettre un faisceau IR à travers le pare-brise (*Figure I.2*). En condition sèche, le faisceau traverse le verre et ne revient quasiment pas sur le photodétecteur. Si, au contraire, de l'eau est présente sur la surface du pare-brise, le faisceau est réfléchi vers le photodétecteur. Le boîtier contenant l'émetteur et le récepteur, fixé derrière le rétroviseur, est placé à 2cm du pare-brise afin de balayer une zone sensible d'environ 20cm².

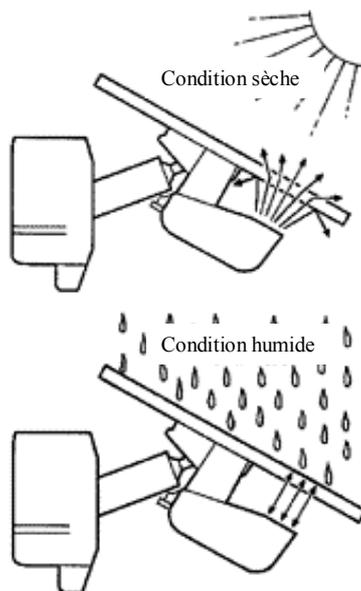


Figure I. 2 : capteur électro-optique selon [Bri97]

Dans les deux cas, la quantification du rayonnement réfléchi permet, en principe, d'estimer la quantité d'eau présente sur le pare-brise et d'optimiser la vitesse de balayage et/ou le nombre de passages des essuie-glaces.

En 1999, Stam et al. [Sta99] décrivent une méthode électro-optique où l'intensité de l'image d'une section du pare-brise est analysée afin de détecter la présence de pluie ou de brouillard. Une approche similaire est exposée dans la référence [Bus00].

Néanmoins, les capteurs de type électro-optique présentent certains inconvénients parmi lesquels :

- un coût de fabrication élevé,
- une gêne de la vision du conducteur causée par un capteur à la fois encombrant et opaque (bien qu'il soit placé dans une zone où la gêne est minimale, généralement derrière le rétroviseur),
- une zone sensible limitée.

Ces raisons justifient que l'on s'intéresse à un nouveau type de capteur de pluie, permettant de s'affranchir de ces différents problèmes.

II.2.b. Capteurs capacitifs

Notre choix s'est porté vers les capteurs capacitifs en raison de leur simplicité, de leur sensibilité et de leur faible coût de revient. La détection de type capacitive est d'ailleurs largement utilisée par de nombreux capteurs :

- de déplacement (potentiomètre, condensateur à armatures mobiles, ...),
- de pression,
- d'accélération,
- de température,
- de détection de composés divers,
- d'humidité.

Parmi les capteurs capacitifs, certains possèdent une couche sensible pouvant générer des inconvénients qui se révèlent incompatibles avec la détection de pluie sur un pare-brise, dont :

- un risque de dégradation du matériau sensible lié au vieillissement et à l'empoisonnement, entraînant un problème de fiabilité dans le temps,
- la fragilité mécanique du matériau sensible,
- un temps de réponse trop long,
- un temps de réinitialisation également trop long.

Un capteur capacitif de pluie sans couche sensible est donc préférable. Ce type de capteur utilise la différence importante existant entre les permittivités relatives de l'eau ($\epsilon_r = 80$) et de l'air ($\epsilon_r = 1$). Cette différence induit la modification de la capacité du capteur en présence d'eau. Considérons l'exemple simple du condensateur plan représenté *Figure 1.3*, constitué de deux électrodes planes parallèles de surface S et séparées d'une distance d par un diélectrique de permittivité relative ϵ_r .

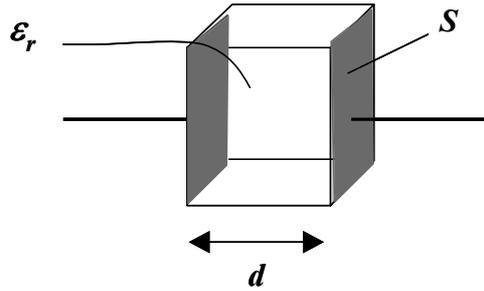


Figure I. 3 : condensateur plan

La capacité du condensateur plan est donnée par :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (1)$$

où ϵ_0 représente la permittivité du vide.

La permittivité relative globale du volume de diélectrique sensible au champ électrique généré par les électrodes, est différente selon la présence ou non d'eau sur ou dans le diélectrique. Dans l'exemple du condensateur plan, les électrodes sont sous influence totale l'une de l'autre et par conséquent les lignes de champ qui partent d'une électrode arrivent toutes sur la deuxième électrode. De plus, ces dernières sont perpendiculaires à la surface de l'électrode et le restent à l'intérieur du diélectrique, excepté aux extrémités des électrodes (effet de bord). Une telle structure (électrode de chaque côté du pare-brise) ne peut évidemment pas être envisagée pour détecter l'eau sur un pare-brise. Celui-ci étant imperméable, sa capacité ne serait pas modifiée en présence d'eau.

Un pare-brise automobile est constitué d'un film synthétique de polyvinyl butyral (PVB) inséré entre deux feuillets de verre (verre feuilleté). La vue en coupe d'un pare-brise est représentée *Figure I.4*.

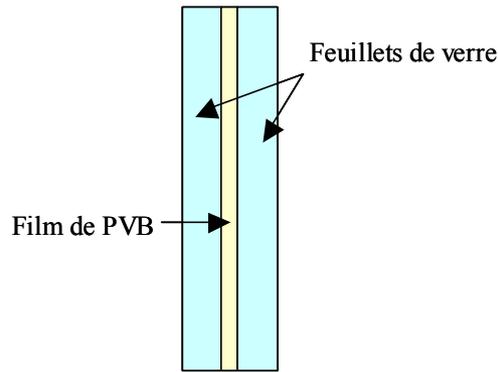


Figure I. 4 : vue en coupe d'un pare-brise

Certains pare-brises automobiles présentent une couche athermique, notée CA, déposée sur le film de PVB, contre le feuillet de verre extérieur. Celle-ci, constituée d'oxydes métalliques, a pour fonction de filtrer le rayonnement infrarouge et donc de limiter l'échauffement de l'habitacle en période estivale.

Si nous considérons un condensateur présentant des électrodes minces coplanaires déposées à la surface du pare-brise ou directement intégrées à l'intérieur de celui-ci, par exemple entre le feuillet de verre externe (12) et le film de PVB (24), comme représenté *Figure I.5*, celles-ci ne sont plus sous influence totale l'une de l'autre.

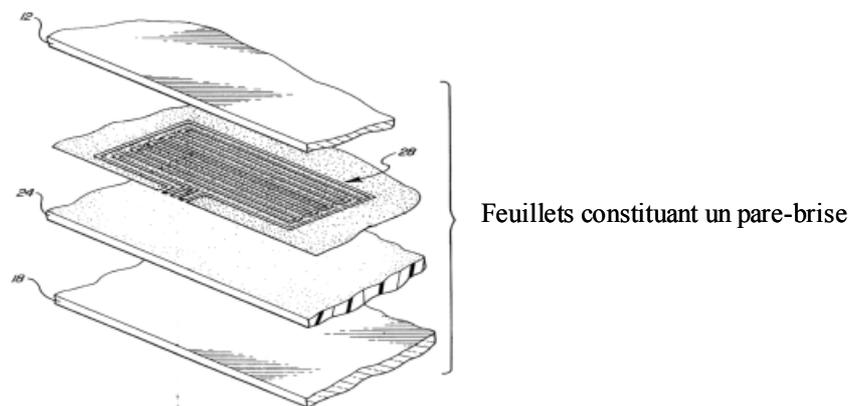


Figure I. 5 : capteur intégré sur un pare-brise selon [Hoc00]

Le champ électrique régnant entre les électrodes est dispersif : les lignes de champ divergent largement jusqu'à sortir du verre dans certaines configurations (*Figure I.6.(a)*). Le volume de diélectrique influencé par le champ électrique entre les électrodes comporte alors une partie de verre du pare-brise ($\epsilon_r \approx 8$) et une partie d'air. En présence d'eau sur le pare-brise, les

lignes de champ sortant du verre sont canalisées dans la couche d'eau en raison de la forte permittivité de l'eau (Figure I.6.(b)). Cette augmentation de la permittivité « globale » du diélectrique conduit à l'augmentation de la capacité du condensateur. C'est la mesure de cette variation de capacité qui permet de détecter la présence d'eau.

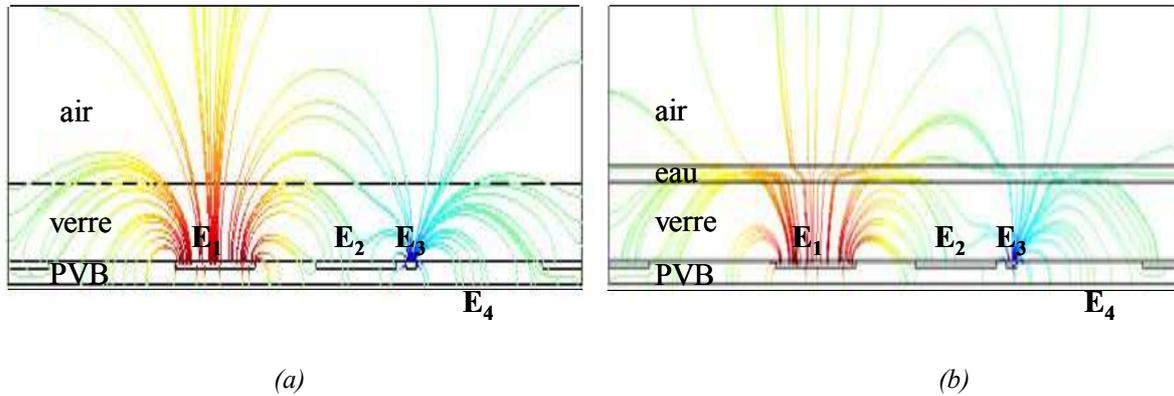


Figure I. 6 : (a) allure des lignes de champ électrique entre deux électrodes coplanaires intégrées au pare-brise en condition sèche et (b) déformation des lignes de champ électrique en présence d'eau

Les capteurs capacitifs sans couche sensible permettent a priori de résoudre les problèmes inhérents aux capteurs électro-optiques et présentent en outre de nombreux avantages parmi lesquels :

- un faible coût de fabrication,
- pas d'obstruction de la vision du chauffeur (possibilités d'électrodes transparentes, par exemple en ITO -Indium Tin Oxyde-, placées dans la zone de balayage des essuie-glaces),
- une bonne sensibilité,
- la simplicité du circuit électronique associé.

III. Capteur capacitif de pluie : étude bibliographique

Différents capteurs de type capacitif pour la détection de pluie sur un pare-brise ont été décrits dans la littérature. Deux grandes familles de capteurs ressortent de cette étude : les capteurs à électrodes externes dont la détection repose à la fois sur la mesure de la capacité et de la conductivité et les capteurs à électrodes protégées dont la détection est purement capacitive. Dans ce chapitre, nous allons faire l'inventaire des publications les plus pertinentes relatives à ces différents capteurs, afin d'orienter le choix de la configuration du capteur à développer.

III.1. Capteurs à électrodes externes

Les dispositifs comportant des électrodes externes sont sensibles à la fois à la capacité et à la résistivité. Ces principes reposent sur la variation de l'impédance (résistance et capacité) résultant de la présence d'eau sur le pare-brise.

III.1.a. Historique

1- En 1972, G. Inoue et al. [Ino72] décrivent un dispositif de contrôle des essuie-glaces permettant de les déclencher automatiquement, de les arrêter ou de moduler leur vitesse de balayage en fonction de la quantité d'eau déposée sur le pare-brise. L'élément sensible de l'appareil consiste en une paire d'électrodes filaires (2) et (3) montée sur la surface externe du pare-brise. La modification de la valeur de l'impédance entre les électrodes (résistance et capacité) consécutive à la présence d'eau, est utilisée pour activer les essuie-glaces. Ce système est illustré *Figure I.7*.

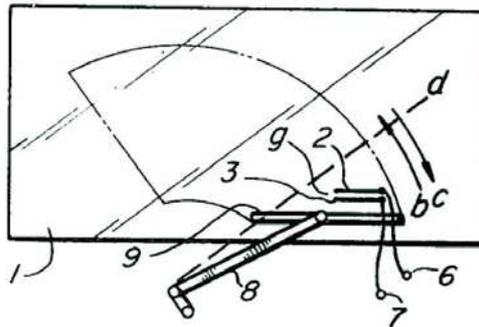


Figure I. 7 : capteur monté sur un pare-brise selon [Ino72]

La réalisation de ce type de capteur pose certains problèmes comme le maintien des fils sur le pare-brise.

2- En 1975, T. Ikeda et al. [Ike75] décrivent un dispositif similaire au précédent permettant d'éliminer automatiquement l'humidité sur un vitrage d'automobile. La position de ce système sur la vitre arrière, dans une zone, à l'époque, dépourvue d'essuie-glaces, semble indiquer qu'il s'agit plus probablement d'un système de désembuage automatique. Cependant, il suffit de modifier le circuit électronique associé pour en faire un capteur de pluie. Le circuit est relié à un système de chauffage au niveau de la vitre. L'impédance entre les électrodes étant sensible à la température, un dysfonctionnement du dispositif peut apparaître. Pour cette

raison, un capteur de température est intégré au système et permet de s'affranchir de cet inconvénient assurant ainsi un fonctionnement optimal quelle que soit la température. Convenablement réglé, ce dispositif peut aussi être utilisé comme système de prévention de buée en commandant le système de chauffage de la vitre dès lors que la température est suffisamment basse.

3- En 1989, P. Palanisamy [Pal89] décrit un capteur d'humidité constitué de deux électrodes résistantes à l'abrasion déposées sur la surface externe du pare-brise (16). Le capteur est représenté *Figure I.8*.

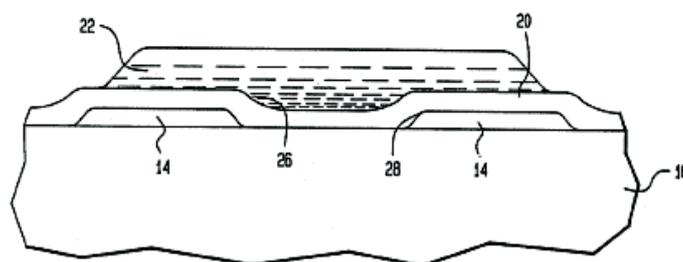


Figure I. 8 : vue en coupe du capteur selon [Pal89]

Comme dans les références précédentes, la variation de l'impédance entre les électrodes est utilisée comme paramètre sensible. L'originalité de ce capteur provient essentiellement des matériaux utilisés. Les électrodes (14) sont sérigraphiées à partir d'une encre contenant une grande proportion de fritte de verre (50 à 95%) et le complément à 100% d'oxyde de ruthénium (RuO_2). La haute teneur en verre procure plusieurs avantages, parmi lesquels, une grande résistance à l'abrasion, une excellente compatibilité thermomécanique avec le pare-brise et une garantie de bonne adhérence sur ce dernier. La présence d'oxyde de ruthénium confère au film ses propriétés conductrices en maintenant la compatibilité chimique avec la fritte de verre. L'ensemble est recouvert d'une seconde couche (20) de composition voisine mais beaucoup moins conductrice permettant à la fois de protéger les électrodes et d'assurer le contact électrique avec la couche d'eau. Les températures et temps de cuisson de ces encres permettent d'envisager l'intégration de la phase de fabrication du détecteur dans la celle de mise en forme du pare-brise sans modification notable du procédé.

4- En 1982, H. Blaszkowski [Bla82] décrit un système comportant deux éléments sensibles dont les électrodes filaires sont séparées par des gaps d'air d'écartements différents. Ce

capteur n'est pas vraiment capacitif puisque c'est essentiellement la conductance entre les électrodes qui est exploitée. Dans ces conditions, le capteur dont les électrodes sont les plus rapprochées est court-circuité dans des conditions de pluie fine alors que l'autre ne l'est pas. Lors de fortes précipitations, le second capteur est également court-circuité ce qui permet de moduler la vitesse de balayage des essuie-glaces. Un système de chauffage continu du capteur permet d'évaporer l'eau entre les électrodes, ce qui stoppe le balayage lorsque la pluie cesse. Un tel système, en plus de nécessiter un étalonnage, comporte un circuit de contrôle très compliqué et surtout consommateur d'énergie (chauffage continu).

5- En 1987, P.A. Hochstein [Hoc87] décrit un capteur de pluie dont la partie sensible est constituée d'un conducteur (18) en forme de spirale, déposé sur la surface externe du pare-brise (*Figure I.9*). L'originalité de ce capteur consiste en son unique électrode permettant d'obtenir à la fois un effet capacitif et inductif dépendant de la géométrie et de la taille de la spirale. Cette particularité présente l'avantage de simplifier la connectique. Le circuit passif possède une fréquence de résonance dépendante de C et de L , comprise dans la gamme de fréquences du générateur de champ électromagnétique.

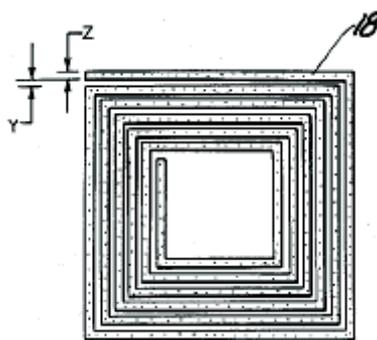


Figure I. 9 : vue de dessus de l'électrode en forme de spirale du capteur selon [Hoc87]

La capacité varie en présence d'eau sur le pare-brise alors que l'inductance ne change pas. Il en résulte une modification de la fréquence de résonance du détecteur, qui entraîne une diminution du couplage entre le générateur et le circuit passif. Un exemple de détecteur, représenté *Figure I.10*, consiste en une couche d'argent-palladium sérigraphiée sur la face externe du pare-brise.

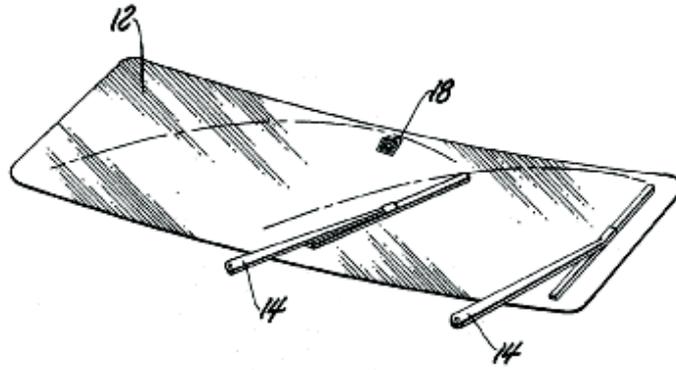


Figure I. 10 : capteur monté sur un pare-brise selon [Hoc87]

6- En 1989, H.S. Koontz et al. [Koo89] décrivent un capteur d'humidité composé de deux ensembles de couches conductrices. Le capteur est représenté *Figure I.11*. Le premier ensemble, situé sur la face externe du feuillet extérieur du pare-brise, comporte deux parties interdigitées (28) et (30) isolées l'une de l'autre, réalisées en matériau résistant à l'abrasion. Le second ensemble, situé sur une plaque flexible (38) disposée sous la face interne du feuillet de PVB, directement sous le premier ensemble, comporte deux parties (34) et (36), également isolées entre elles, et déposées de préférence par évaporation ou pulvérisation.

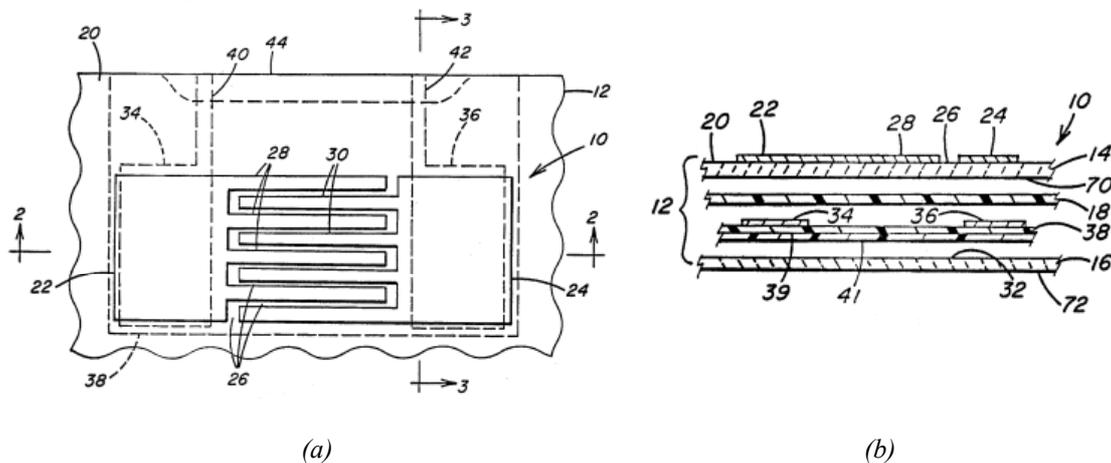


Figure I. 11 : (a) vue de dessus et (b) vue en coupe du capteur selon [Koo89]

Ce dispositif est équivalent à un circuit comportant d'une part, deux capacités d'isolement entre les conducteurs internes et externes correspondants, le diélectrique étant constitué des épaisseurs ajoutées du film de PVB et du feuillet de verre externe, et d'autre part l'impédance située entre les conducteurs externes comportant une partie résistive en parallèle avec une

partie capacitive. A sec, la résistance est très élevée et le détecteur est assimilable à un condensateur pur. En présence d'eau, la résistance chute, alors que la capacité croît. Sa capacitance diminue, l'impédance entre les conducteurs externes s'approche alors d'une résistance pure.

La même année, des variantes très similaires de capteurs de pluie de type résistif/capacitif sont développés par D.L. Mueller et al. [Mue89] et J.F. Wilson et al. [Wil89].

7- En 1991, J. Medzius [Med91] décrit un capteur censé améliorer les précédents, notamment en ce qui concerne la difficulté d'assurer un bon isolement électrique entre les fils de connexion des électrodes. Le détecteur de pluie comporte deux électrodes externes, l'une connectée au générateur de signal, l'autre au récepteur. Le dispositif décrit ici, présenté *Figure I.12*, se distingue des précédents car il ne comporte plus que deux électrodes au lieu de trois ou quatre. Ces électrodes interdigitées, sont directement exposées au contact des gouttes d'eau et doivent donc présenter une bonne résistance à l'abrasion. Elles sont connectées électriquement au circuit de contrôle par deux pistes dont l'écartement relatif est différent de celui des électrodes. De cette façon, à sec ou lorsque de l'eau accumulée en bordure de pare-brise vient interconnecter les pistes, le signal est différent de celui obtenu lorsque des gouttes d'eau viennent court-circuiter les électrodes.

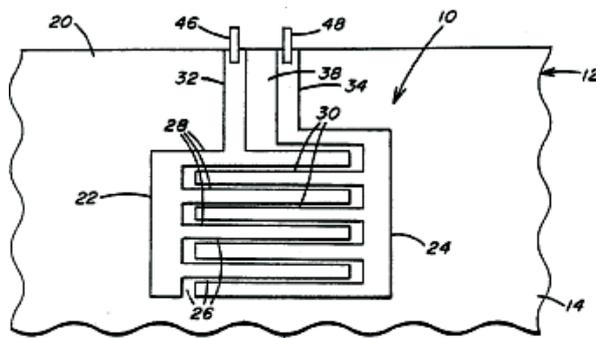


Figure I. 12 : vue de dessus du capteur selon [Med91]

Avec des électrodes placées sur la surface interne du pare-brise, le même système permettrait de détecter la présence de buée ou de glace sur cette surface et de déclencher la ventilation et le chauffage.

8- En 1990, H. Kato et T. Matsuki [Kat90] décrivent un capteur de pluie pour pare-brise composé de deux électrodes en acier inoxydable recouvertes d'une couche de passivation qui

protège en partie le capteur de la corrosion. Cette dernière forme une double couche électrique entre les électrodes et les gouttes de pluie. Le système est alors équivalent à une capacité en parallèle avec la résistance de la couche de passivation, connectés en série avec la résistance de l'eau. La détection repose sur le contact électrique entre le capteur et la goutte de pluie. Le capteur est placé à l'extérieur de l'habitacle, au niveau du capot ou du pare-chocs, en raison des problèmes de planéité et donc d'usure des essuie-glaces. La présence de rainures au niveau des électrodes permet au capteur de répondre même si sa surface est sale ou poussiéreuse.

9- En 1995, M.Y. Lu et al. [Lu95] décrivent un capteur d'humidité de type capacitif pour véhicule ou bâtiment représenté *Figure I.13*.

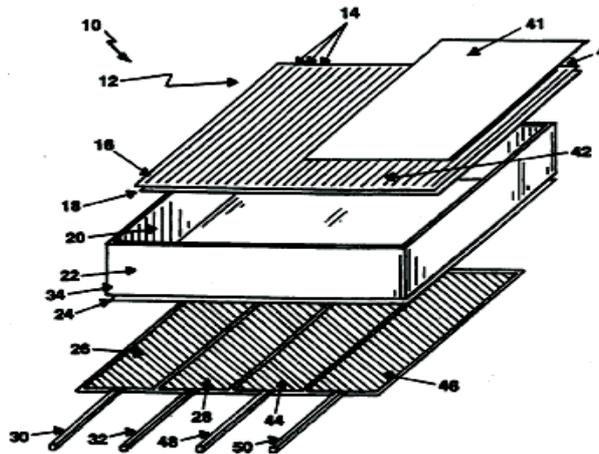


Figure I. 13 : vue éclatée du capteur selon [Lu95]

Le capteur comporte un réseau de conducteurs externes (14) isolés les uns des autres de façon à générer une série de condensateurs (12) exposés aux gouttes d'eau. En dessous de ce réseau de conducteurs, séparés par une vitre ou un diélectrique quelconque (22), deux électrodes (30) et (32) sont connectées au générateur et au circuit de mesure. A côté de cet ensemble, se trouve un dispositif identique en tous points, à ceci près que le réseau de conducteurs externes est recouvert d'un film isolant (41). De ce fait, les gouttes d'eau ne peuvent pas court-circuiter le réseau de conducteurs (42). Ainsi, en présence d'eau sur le pare-brise, les conducteurs de l'élément sensible sont court-circuités (la partie réelle de l'impédance diminue) alors que pour la zone de référence, isolée, la résistance reste inchangée. La mesure du déphasage entre le

signal alternatif de l'élément sensible et celui de la référence, permet de détecter la présence d'eau.

Le mode d'assemblage ainsi que la localisation diffèrent de ce qui a été vu jusqu'ici. Les conducteurs sont sérigraphiés sur un film de polymère collé sur les faces opposées de la vitre (ou autre diélectrique) séparant les électrodes du réseau de conducteurs. Ceci, bien que plus facile à réaliser, présente le risque de défauts d'assemblage et reste inadapté en cas de pare-brise comportant une couche athermique conductrice. La localisation, quant à elle, est variable : pare-brise, toit ouvrant, pare-chocs, vitres arrière ou latérales, capot, etc.... Le système décrit ici ressemble à ceux des références [Koo89] et [Mue89], mais, énorme avantage par rapport à ceux-ci, comporte une capacité de référence permettant de s'affranchir des variations de capacité liées à d'autres facteurs que l'humidité, comme la température ou les contraintes mécaniques et en partie les perturbations électromagnétiques.

10- En 1996, J.J. Geraldi et al. [Ger96] décrivent plusieurs variantes de capteurs capacitifs permettant de mesurer l'épaisseur et l'hétérogénéité de la couche de glace qui peut apparaître sur les bords d'attaque et le dessus des ailes d'avion. Une des variante, présentée *Figure I.14*, comporte un ensemble d'électrodes de largeurs et d'écartements variables, situées pour certaines, en surface et pour les autres sous un film de polyfluorure de vinylidène (PVDF) collé sur l'aile de l'avion. Une première partie du capteur permet de déceler la présence de glace, une autre de déterminer son épaisseur, et la troisième de mesurer la température.

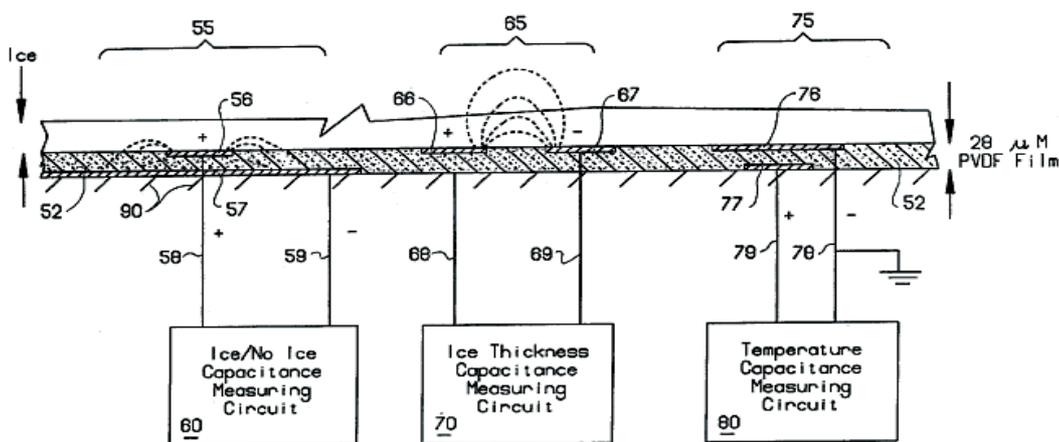


Figure I. 14 : schéma en coupe du détecteur de glace selon [Ger96]

Le premier capteur comporte une électrode externe de petite dimensions (56) séparée d'une autre électrode plus grande (57) par le film de PVDF. Cette configuration favorise la sortie des lignes de champ dans l'air ou l'eau/glace environnant l'électrode externe, ce qui confère à cet ensemble sa sensibilité à la présence d'eau/glace. Le deuxième capteur comporte deux électrodes coplanaires (66) et (67) situées sur la surface externe du PVDF. Les lignes de champ pénètrent profondément dans l'air ou l'eau/glace. La capacité de ce condensateur est ainsi variable sur un large registre selon l'épaisseur de glace. Le troisième élément exploite quant à lui la dépendance connue de la permittivité diélectrique du PVDF en température. Comme pour le premier capteur, les électrodes (76) et (77) sont situées de part et d'autre du film de PVDF, mais ici l'électrode externe est plus grande de façon à ce que le capteur ne soit sensible qu'à la permittivité du PVDF. Cependant un tel système, plus spécifiquement dédié à la détection de glace, peut difficilement être envisagé pour une automobile.

III.1.b. Bilan

Le principe de détection des capteurs à électrodes externes repose sur la variation de l'impédance résultant de la présence d'eau sur la pare-brise, au même titre que les capteurs purement résistifs, dont un exemple est présenté dans la référence [Ber98].

La position externe des électrodes, ainsi que la longueur des fils, dans le cas d'électrodes filaires, qui peut être importante suivant la localisation du capteur, conduisent à des valeurs de capacité plus grandes que pour un capteur miniature placé à l'intérieur ou sur la face interne du pare-brise. La sensibilité du capteur est ainsi grandement améliorée. Cependant, cette position externe expose les électrodes à la corrosion liée à l'humidité, aux intempéries, au rayonnement solaire, ainsi qu'aux attaques chimiques des produits de nettoyage du pare-brise. La durée de vie du capteur est alors limitée par la dérive dans le temps liée à la dégradation des matériaux qui le constituent. Même si ces problèmes de résistance à l'abrasion peuvent être résolus (couche de protection), des électrodes externes vont générer des défauts de planéité du pare-brise nuisant au rendement des essuie-glaces.

Par ailleurs, la majorité des systèmes décrits est sensible aux perturbations extérieures telles que les interférences électromagnétiques, les variations de température et les contraintes mécaniques. Concernant la sensibilité aux variations de température, les dispositifs des références [Ike75] et [Ger96] prévoient une correction à l'aide d'un capteur de température associé, alors que d'autres [Lu95] s'en affranchissent par l'utilisation d'une sonde de référence insensible à la présence d'eau, mais variant de façon similaire avec la température.

L'intérêt d'une capacité de référence est qu'elle permet également de s'affranchir, dans une large mesure, des variations de capacité liées aux contraintes mécaniques et aux perturbations électromagnétiques.

III.2. Capteurs à électrodes protégées

III.2.a. Electrodes déposées sur la face interne du pare-brise

1- En 1986, R.A. Kraus et al. [Kra86] décrit un capteur d'humidité comprenant un détecteur capacitif couplé au pare-brise. Le détecteur consiste en deux électrodes (12) situées sur la face intérieure du pare-brise (*Figure I.15*).

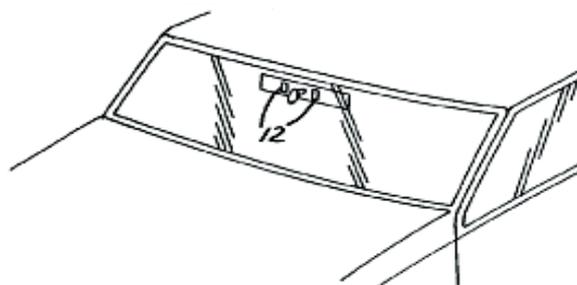


Figure I. 15 : capteur monté sur un pare-brise selon [Kra86]

2- En 1975, Steinmann [Ste75] décrit un dispositif à trois électrodes coplanaires qui génèrent un champ dispersif. Les électrodes sont déposées sur la face interne du pare-brise, dans une zone en regard de celle balayée par les essuie-glaces.

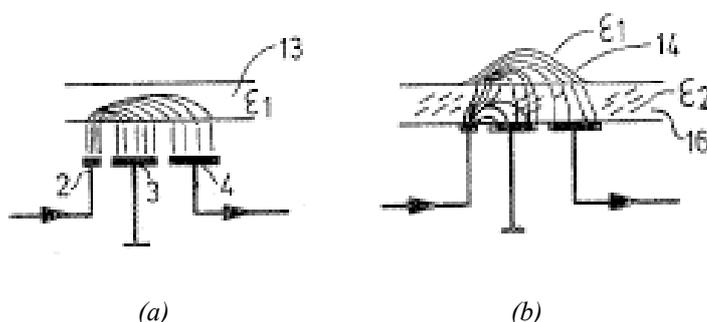


Figure I. 16 : capteur selon [Ste75] en condition sèche (a) et en présence d'eau (b)

L'électrode centrale (3) (électrode écran) est reliée à la masse. L'électrode (2) reliée à un générateur de tension sinusoïdale, sert à l'excitation et l'électrode (4) raccordée au récepteur,

prélève le signal. Les électrodes (2) et (4) sont situées de part et d'autre de l'électrode centrale. Cette disposition permet de minimiser le signal à sec, le bouclage des lignes de champ se faisant essentiellement sur l'électrode écran (3) (*Figure I.16.(a)*). En revanche, en présence d'une goutte de pluie sur le pare-brise dans la zone située entre (2) et (4), la fraction des lignes de champ qui atteignent (4) est augmentée de façon significative (*Figure I.16.(b)*). L'électrode (2), constituée d'une bande très étroite, permet d'obtenir une grande intensité de champ.

Ce système a, plus tard, été amélioré par son auteur [Ste91].

Bien que la localisation interne des électrodes garantisse une bonne longévité du capteur, elle conduit à des valeurs de capacité très faibles. De plus, les capteurs décrits ici sont sensibles aux perturbations électromagnétiques et aux variations de température. En effet, malgré la présence de l'électrode écran qui permet d'augmenter la partie du signal liée à la couche d'eau, la plus grande partie du signal provient du verre dont la permittivité diélectrique dépend de la température.

III.2.b. Electrodes intégrées au pare-brise

1- En 1985, H.L. Armstrong [Arm85] décrit un détecteur capacitif constitué d'une paire de fils fins métalliques (10), noyés dans le film intermédiaire de PVB entre les deux feuillets de verre du pare-brise et positionnés sous une zone balayée par les essuie-glaces (*Figure I.17*). Ce système se veut plus évolué que ceux des références [Ino72] et [Bla82], pour lesquels l'impédance totale, et pas seulement la partie capacitive, constitue le paramètre détecté. Ce dispositif, dont la capacité varie avec la quantité d'eau déposée sur le pare-brise, comporte des électrodes protégées de la corrosion et des influences mécaniques externes. Les électrodes sont de plus situées dans une zone où elles ne gênent pas la vision du conducteur.

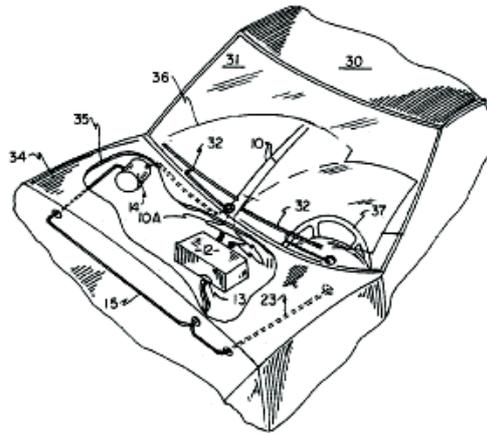


Figure I. 17 : capteur et dispositif de contrôle en situation selon [Arm85]

Dans ce dispositif, il est essentiel d'assurer le meilleur isolement possible aux fils constituant les électrodes, car tout défaut d'isolement ajoute des capacités parasites qui compromettent la sensibilité du capteur. En effet, comme mentionné dans la référence [Hoc87], les fils constituant les électrodes vont du capteur au circuit de contrôle, générant ainsi une zone sensible allant au-delà du pare-brise et donc susceptible d'être sensible aux perturbations électromagnétiques préjudiciables à son bon fonctionnement.

2- En 1993, F.A. Waldman et al. [Wal93] décrit un instrument de mesure des propriétés diélectriques des matériaux, dont le principe de base est semblable aux dispositifs précédents. Comme le montre la *Figure I.18*, le détecteur présente, comme ceux des références [Ste75] et [Ste91], trois électrodes principales protégées du milieu à examiner par une couche de diélectrique (verre ou polymère). La première électrode (4), utilisée pour l'excitation, est connectée au générateur, la deuxième (6) sert à la mesure, alors que la troisième (électrode shunt) (8), reliée à la masse, permet d'accroître la sensibilité du détecteur.

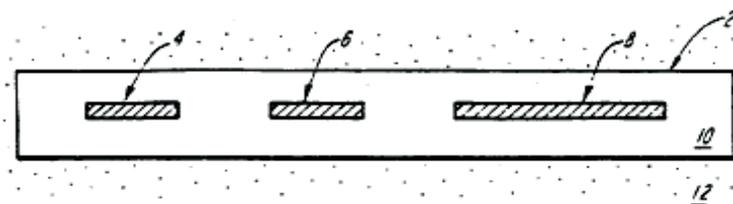


Figure I. 18 : vue en coupe du dispositif selon [Wal93]

Le dispositif diffère de ceux des références [Ste75] et [Ste91] par la position de l'électrode shunt qui n'est plus située entre les électrodes (4) et (6) mais placée à proximité de celles-ci,

dans le but de diminuer le signal arrivant sur (6) lorsque la permittivité diélectrique du matériau augmente. Dans une variante, représentée *Figure I.19*, le dispositif est amélioré en doublant les électrodes (6) et (8) dans une position symétrique par rapport à l'électrode (4) et en ajoutant sous celles-ci, une électrode de garde (14), elle aussi reliée à la masse. En protégeant ainsi les autres électrodes des influences intérieures, l'électrode de garde permet d'améliorer le rapport Signal/Bruit et donc la sensibilité du capteur. Cette deuxième variante, par sa configuration symétrique, permet également de s'affranchir d'éventuel gradient d'épaisseur du diélectrique de protection.

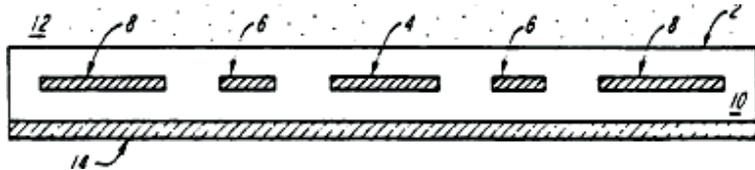


Figure I. 19 : vue en coupe de la variante du capteur selon [Wal93]

Les dispositifs décrits dans ces deux brevets comportent des électrodes internes, donc protégées de la corrosion. L'utilisation d'une électrode de garde procure une directionnalité à la détection, en écrantant le capteur des influences intérieures. Cependant, aucun de ces capteurs ne permet d'éviter l'effet de la température ou des perturbations électromagnétiques.

3- En 1998, Y. Netzer [Net98] décrit plusieurs variantes d'un capteur de pluie capacitif différentiel pour pare-brise automobile. Le dispositif de base, représenté *Figure I.20*, est constitué de quatre électrodes dont trois (12), (13) et (14), situées sur la face interne du feuillet extérieur de verre (16), sont de mêmes dimensions et espacées de façon identique. Ces électrodes délimitent deux capacités. Située sous ces trois électrodes coplanaires, de part et d'autre du film de PVB (18), se trouve une électrode de garde (15) reliée à la masse.

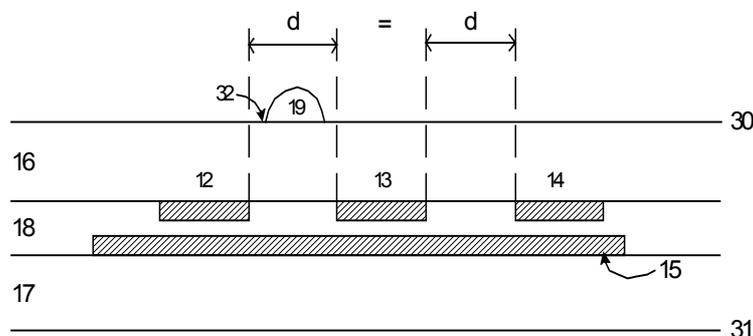


Figure I. 20 : vue en coupe du dispositif de base selon [Net98]

Suivant les variantes, des électrodes écran, également reliées à la masse, sont ajoutées autour du dispositif de base afin d'optimiser l'effet d'écrantage en délimitant la zone de sensibilité ou intercalées entre les électrodes coplanaires pour empêcher la propagation des lignes de champ dans le PVB. Une autre variante combine deux capteurs de base de façon symétrique par rapport à un axe médian afin de diminuer l'influence des gradients d'épaisseur des diélectriques ainsi que les gradients thermiques et/ou des contraintes mécaniques. Cependant, quelle que soit la variante, lorsque le pare-brise est uniformément recouvert d'eau, le capteur ne répond pas. La dernière variante, présentée *Figure I.21*, permet de résoudre ce problème. Dans ce cas, les trois électrodes coplanaires ont des dimensions et des espacements différents, conduisant à l'équilibre des capacités en condition sèche et à un déséquilibre en présence d'eau sur le pare-brise.

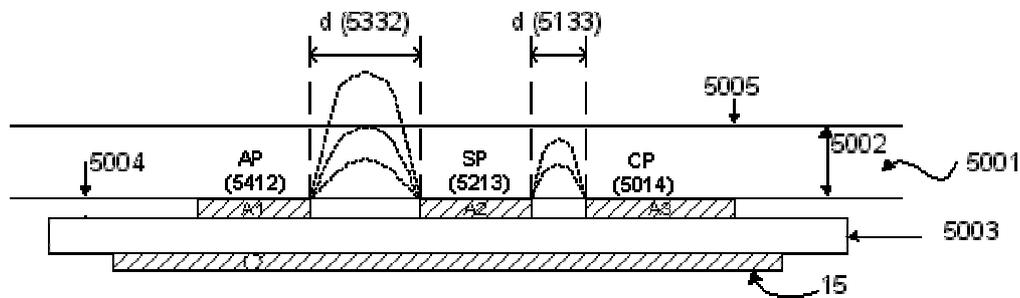


Figure I. 21 : vue en coupe du dispositif optimisé selon [Net98]

III.3. Bilan

L'étude bibliographique permet d'orienter le choix de la configuration du capteur à développer. En particulier :

- La position externe des électrodes étant préjudiciable, notamment en raison des problèmes de corrosion, un capteur à électrodes protégées, donc purement capacitif, est recommandé. La localisation des électrodes sur la face interne du pare-brise conduit à des valeurs de capacité très faibles. Les électrodes doivent donc être préférentiellement intégrées au pare-brise.
- Le fonctionnement en mode différentiel (capacité sensible + capacité de référence) permet de réduire les perturbations liées aux interférences électromagnétiques, aux variations de température et aux contraintes mécaniques.

- La présence d'une électrode de garde procure une directionnalité à la détection en protégeant la partie sensible du capteur des influences intérieures. Ceci pourrait s'appliquer au pare-brise afin de distinguer la pluie sur la surface extérieure et la buée à l'intérieur de l'habitacle.

La dernière variante du capteur proposé par Netzer, représenté *Figure I.21*, répond favorablement à l'ensemble de ces points.

IV. Positionnement de l'étude

L'étude bibliographique a permis de faire l'inventaire des publications les plus pertinentes relatives aux capteurs capacitifs de pluie pour pare-brise automobile et de définir les bases du travail de développement d'un capteur de ce type. Cependant, avant de faire un choix définitif quant à la configuration du capteur à retenir, il faut vérifier l'accord avec le cahier des charges, établi conjointement avec le constructeur automobile [Psa02].

IV.1. Cahier des charges

Le cahier des charges rassemble les critères requis pour une intégration en grande série. Ces critères sont classés en cinq points : intégrabilité/compatibilité, sensibilité, fiabilité/durabilité, reproductibilité et coût. Pour chacun de ces critères, nous expliquons la façon dont le capteur répond.

IV.1.a. Intégrabilité/compatibilité

- **Cahier des charges**

Le capteur doit pouvoir s'intégrer facilement dans l'existant. Ceci implique les conditions suivantes :

- un mode de réalisation simple, de préférence inclus dans le procédé de fabrication du pare-brise,
- le capteur ne doit pas gêner la vision du conducteur : il doit donc être transparent ou petit et/ou situé dans une zone non gênante,

- le système doit préférentiellement se situer dans la zone de balayage des essuie-glaces afin d'être réinitialisé à chaque passage,
- le dispositif électronique associé doit être simple, utiliser des composants de grande distribution, peu consommateurs d'énergie et compatibles avec les équipements électroniques existants.

- **Solutions envisagées**

Il est tout à fait envisageable d'imaginer un mode de réalisation intégré à la phase de fabrication du pare-brise. En particulier au moment du dépôt de la couche athermique, il est possible de placer un écran permettant d'obtenir le motif d'électrodes désiré directement sur le feuillet concerné. Cette couche est constituée d'un matériau transparent, donc non gênant pour la vision du conducteur, et a priori conducteur. A défaut, la technologie de dépôt sur verre de couches conductrices transparentes, par exemple en ITO, est compatible avec le procédé de fabrication des pare-brises.

IV.1.b. Sensibilité

- **Cahier des charges**

Le capteur doit permettre de détecter de façon sûre la présence d'eau sur le pare-brise en restant le plus possible insensible aux paramètres perturbateurs susceptibles d'entraîner un déclenchement intempestif, tels que les interférences électromagnétiques, les variations de température et les contraintes mécaniques. Le système doit, de plus, être doué de directionnalité.

- **Solutions envisagées**

La sensibilité constitue le point délicat de ce type de capteur. Un bon rapport Signal/Bruit nécessite en premier lieu un signal d'amplitude suffisante. Cette amplitude est directement liée à la variation relative de la capacité en présence d'eau et donc à la valeur de la capacité elle-même. Or l'optimisation de cette capacité repose sur le bon dimensionnement des paramètres géométriques des électrodes : longueur, largeur, épaisseur, écartement. Ces dimensions restent, cependant, totalement dépendantes des paramètres géométriques existants

(et difficilement modifiables) du pare-brise. Il existe également une étroite dépendance avec les permittivités diélectriques des différents matériaux : verre, PVB et métal des électrodes.

La surface sensible de ce capteur est virtuellement extensible à toute la surface balayée (sensibilité encore améliorée) et ceci sans gêner la vision du conducteur grâce à l'utilisation d'électrodes transparentes.

Un autre point critique pour la plupart des capteurs capacitifs concerne la sensibilité aux fluctuations de température et aux contraintes mécaniques. Le fonctionnement en mode différentiel permet de s'affranchir, ou du moins de réduire, les variations de capacité consécutives à des paramètres perturbateurs, puisque la capacité de référence, soumise aux mêmes contraintes que la capacité de mesure, évolue de façon similaire et compensera, a priori, la dérive de celle-ci.

De plus, un blindage efficace contre les perturbations électromagnétiques est procuré par la présence de l'électrode de garde, qui assure, en outre, une directionnalité à la détection.

IV.1.c. Fiabilité/durabilité

- **Cahier des charges**

Dans la mesure où le capteur est installé lors de la phase de fabrication du pare-brise, il doit présenter un niveau de vie similaire à ce dernier. En particulier, il doit pouvoir résister à l'abrasion, aux attaques chimiques diverses, au rayonnement solaire et aux variations de température généralement subies par le pare-brise.

- **Solutions envisagées**

Le capteur capacitif différentiel de pluie précédemment décrit, résout la plupart des problèmes inhérents aux capteurs capacitifs à électrodes protégées tout en conservant son principal avantage, l'inaltérabilité des électrodes. De cette dernière propriété, nous pouvons raisonnablement nous attendre à ce que la durée de vie du capteur soit équivalente à celle du pare-brise.

Pour la fiabilité, un capteur intégré au pare-brise ne devrait pas poser de problème insurmontable. La technologie éprouvée de dépôt sur verre de couches conductrices présente à cet égard toutes les qualités requises.

IV.1.d. Reproductibilité

- **Cahier des charges**

Il est primordial que les caractéristiques du capteur soient reproductibles, ceci afin d'éviter de fastidieuses opérations de calibration pour chaque élément produit.

- **Solutions envisagées**

D'une façon générale, la non-reproductibilité des paramètres géométriques du pare-brise est une des causes principales de non-reproductibilité de la capacité du capteur, la tolérance sur l'épaisseur des différents feuillets conditionnera de ce fait, la tolérance sur les capacités du capteur. Il conviendra donc de maîtriser au mieux les conditions de fabrication du pare-brise. Le cas échéant, il est possible d'ajuster la capacité de référence par un moyen électronique externe de façon à parfaire l'équilibre du capteur en condition sèche.

IV.1.e. Coût

- **Cahier des charges**

Le coût de revient doit être plus faible que celui d'un capteur électro-optique.

- **Solutions envisagées**

Le coût de revient d'un tel capteur est étroitement lié aux critères d'intégrabilité et de fiabilité, mais aussi dans une moindre mesure, des matériaux employés pour réaliser le capteur. Par ailleurs, les dispositifs basés sur une mesure de zéro, ne nécessitent généralement que des montages électroniques relativement simples et ne comportant que des composants de coût modéré.

IV.2. Choix de la configuration du capteur

A l'issue de l'étude bibliographique et de la définition du cahier des charges, le capteur de pluie capacitif différentiel proposé par Netzer [Net98] semble être la meilleure solution.

IV.2.a. Description du capteur

Un tel capteur est constitué de quatre électrodes, dont trois sont utiles à la détection en mode différentiel et une (l'électrode de garde) permet d'assurer la directionnalité de la détection. Ces quatre électrodes sont implantées à l'intérieur du pare-brise, protégées ainsi des risques de corrosion.

Les trois électrodes, notées E_1 , E_2 et E_3 , sont localisées entre la face interne du feuillet de verre extérieur et le film de PVB. Les électrodes E_1 et E_2 délimitent la capacité C_1 sensible à la présence d'eau et E_2 et E_3 , la capacité de référence C_2 , insensible.

Située sous ces trois électrodes coplanaires, de part et d'autre du film de PVB, se trouve l'électrode de garde E_4 . Reliée à la masse, cette électrode permet d'écranter le capteur des influences intérieures assurant ainsi un blindage électromagnétique et un caractère directionnel à la détection.

Un schéma descriptif fonctionnel du capteur capacitif différentiel de pluie étudié est présenté *Figure I.22*.

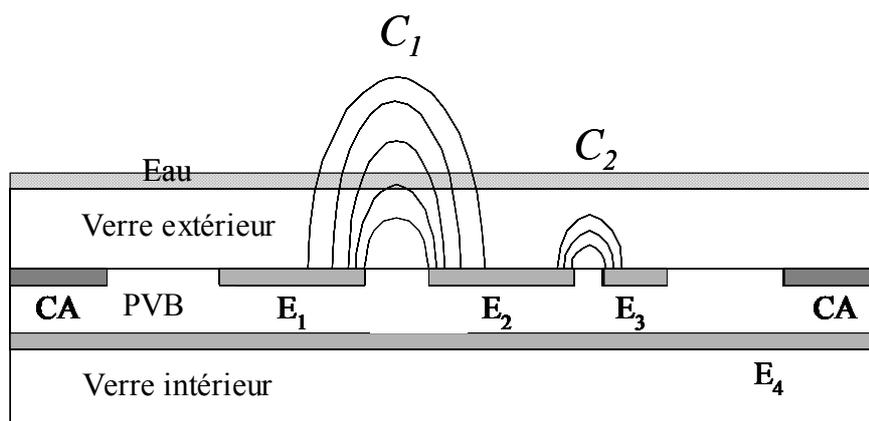


Figure I. 22 : schéma descriptif fonctionnel du capteur de pluie recouvert d'un film d'eau

Pour une meilleure vision du conducteur, les quatre électrodes du capteur doivent être préférentiellement transparentes. Elles peuvent être réalisées soit par dépôt (par exemple en ITO), soit directement gravées dans la couche athermique (CA). Quoi qu'il en soit, la présence de cette couche conductrice autour de la zone sensible du capteur permet de renforcer le blindage électromagnétique, procuré par l'électrode de garde.

IV.2.b. Principe de fonctionnement

Dans ce système, deux capacités nous intéressent tout particulièrement : la capacité C_1 sensible à la présence d'eau et la capacité C_2 , capacité de référence, insensible à l'eau. Les autres capacités sont fixées par les conditions géométriques et ne doivent aucunement être influencées par la présence d'eau sur le pare-brise.

Le capteur étudié s'appuie sur le principe des électrodes à champ dispersif, déjà commenté. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre les électrodes coplanaires, les lignes du champ électrique qui en résultent, s'incurvent largement et s'étendent dans une zone de l'espace dont la dimension dépend de la longueur, de la largeur, de l'épaisseur et de l'écartement des électrodes. De ce fait, la capacité entre les deux électrodes dépend de la permittivité diélectrique des matériaux contenus dans cette zone sous influence.

Bien que différentes du point de vue dimensionnel, les trois électrodes E_1 , E_2 et E_3 doivent être disposées de telle façon qu'en condition sèche, les deux capacités C_1 et C_2 soient égales. Lorsque de l'eau est présente sur le pare-brise au dessus du capteur, l'équilibre des capacités est rompu. La valeur de C_1 est augmentée en raison de la forte permittivité diélectrique de l'eau, alors que celle de C_2 ne l'est que très peu (idéalement pas !). La différence entre ces deux capacités résulte du fait que pour C_1 les lignes de champ sortent largement du verre, alors que pour C_2 elles restent confinées majoritairement dans celui-ci. Le déséquilibre entre C_1 et C_2 sera utilisé pour la détection.

IV.3. Objectif de l'étude

Dans son brevet [Net98], Netzer expose le concept d'un capteur capacitif différentiel qui semble résoudre les problèmes inhérents aux capteurs de pluie développés jusqu'à maintenant. Outre l'aspect théorique, une grande partie du brevet fait référence au circuit électronique associé au capteur. Ainsi, en dehors du nombre et de la localisation des électrodes dans le pare-brise, aucune information n'est donnée concernant le dimensionnement des électrodes, l'ordre de grandeur des capacités ou l'influence de la température sur les performances du capteur. Le manque d'indications du brevet semble indiquer qu'aucune validation expérimentale du comportement du capteur n'a été réalisée.

L'étude bibliographique démontre donc, outre la validité du concept exposé, l'intérêt de lancer une étude approfondie d'un tel capteur. Pour des raisons de coût de revient et de temps, il est hors de propos de se lancer, au hasard, dans la fabrication d'éprouvettes variées sans avoir résolu le problème de la configuration géométrique. Une étude par simulation numérique s'impose. En révélant l'effet de chaque paramètre, elle permettra de réduire le champ des investigations expérimentales. Pour débiter la phase numérique, il est nécessaire de déterminer au préalable les caractéristiques électriques des matériaux constituant les pare-brises automobiles, notamment les permittivités diélectriques, indispensables aux calculs des capacités. L'étude par simulation numérique permettra ensuite d'identifier les paramètres sensibles influant sur le fonctionnement du capteur afin de déterminer le dimensionnement optimal des électrodes. A l'issue de la phase numérique, des capteurs pourront être fabriqués, ce qui permettra de valider expérimentalement les performances du capteur. L'influence de la distribution de l'eau sur le pare-brise sera ensuite évaluée par simulation numérique puis validée expérimentalement. Cette étude permettra de statuer sur la validité et les limites de détection du capteur. Enfin, nous nous intéresserons à l'influence de la température sur le fonctionnement du capteur afin de déterminer la nécessité de rajouter un système de compensation, comme proposé par Netzer dans un brevet postérieur [Net02].

Bibliographie

- [Anc96] R. Anchisini, G. Faglia, M.C. Gallazzi, G. Sberveglieri, G. Zerbi, *Polyphosphazene membrane as a very sensitive resistive and capacitive humidity sensor*, Sensors and Actuators B 35-36 (1996) 99-102
- [Arm85] H.L. Armstrong, (USA), *Automated windshield wiper system*, US Patent 4554493, 9 pp, 19 Nov. (1985)
- [Aug04] J. Auge, K. Dierks, S. Prange, B. Henning, *Monitoring of droplet growth with nano-litre resolution for liquid flow rate, level or surface tension measurement*, Sensors and Actuators A 110 (2004) 18-27
- [Bai94] M. Bai, W.R. Seitz, *A fiber optic sensor for water in organic solvents based on polymer swelling*, Talanta 41, Issue 6 (1994) 993-999
- [Ber98] R. Berberich (VDO Schindling), (Allemagne), *Resistive moisture sensor*, US Patent 5739430, 6 pp, 14 Apr. (1998)
- [Bla82] H. Blaszkowski, (USA), *Windshield wiper control system*, US Patent 4317073, 22 pp, 23 Feb. (1982)
- [Bly96] J. Blyth, R.B. Millington, A. G. Mayes, E. R. Frears, C. R. Lowe, *Holographic sensor for water in solvents*, Analytical Chemistry 68 (1996) 1089-1094
- [Bri97] J. Britt, *Optical rain sensor*, Sensors 14, Issue 10 (1997) 69-70, 72
- [Bus00] J. Buscher (Valeo Electrical Sys Inc), (USA), *Windscreen sensing and wiper control system*, US Patent 6020704, 12 pp, 1 Feb. (2000)
- [Cha97] Q. Chang, Z. Murtaza, J.R. Lakowicz, G. Rao, *A fluorescence lifetime-based solid sensor for water*, Analytica Chimica Acta 350 (1997) 97-104

- [Fen04] T. Fen-Chong, A. Fabbri, J.-P. Guilbaud, O. Coussy, *Determination of liquid content and dielectric constant in porous media by the capacitive method*, Comptes Rendus de Mécanique 332 (2004) 639-645
- [Gar95] F. Garcia-Golding, M. Giallorenzo, N. Moreno, V. Chang, *Sensor for determining the water content of oil-in-water emulsion by specific admittance measurement*, Sensors and Actuators A 46-47 (1995) 337-341
- [Ger96] JJ. Geraldi et al. (Innovative Dynamics Inc.), (USA), *Measuring ice distribution profiles on a surface with attached capacitance electrodes*, US Patent 5551288, 21pp, 3 Sep. (1996)
- [Goo70] P. Goodman et al (Panametrics Inc.), (USA), *Device for measurement of absolute humidity*, US Patent 3523244, 6 pp, 4 Aug. (1970)
- [Hoc87] P.A. Hochstein et al., (USA), *Rain sensor*, US Patent 4703237, 9 pp, 27 Oct. (1987)
- [Hoc00] P.A. Hochstein, (USA), *Capacitive rain sensor for windshield*, US Patent 6094981, 9 pp, 1 Aug. (2000)
- [Hog93] K. Hogari, F. Ashiya, *Water blocking optical fiber cable system employing water absorbent materials*, Polymeric Materials Science and Engineering, Proceedings of the ACS Division, 69 (1993) 565-568
- [Ike75] T. Ikeda et al. (Central Glass Co, Ltd ; Niles Parts Co, Ltd), (Japon), *Temperature compensating vehicule window heating system*, US Patent 3902040, 7 pp, 26 Aug. (1975)
- [Ino72] G. Inoue et al. (Nippon Denso Kabushiki Kaisha.), (Japon), *Windshield wiper control apparatus*, US Patent 3649898, 10 pp, 14 Mar. (1972)
- [Jac00] R. Jachowicz, J. Weremczuk, *Sub-cooled water detection in silicon dew point hygrometer*, Sensors and Actuators A 85 (2000) 75-83

- [Kat90] H. Kato, T. Matsuki, *Raindrop sensor using electric double layers*, Sensors and Actuators B1 (1990) 308-311
- [Kin02] D. King, W.B. Lyons, C. Flanagan, E. Lewis, *An optical fibre sensor for use in process water systems utilising signal processing techniques and artificial neural network pattern recognition*, Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks 12 (2002) 593-599
- [Koo89] H.S. Koontz et al. (PPG Industries Inc.), (USA), *Capacitive coupled moisture sensor*, US Patent 4805070, 6 pp, 14 Feb. (1989)
- [Kra86] R.A. Kraus et al. (Ford Motor Co.), (USA), *Proximity moisture sensor*, US Patent 4613802, 7 pp, 23 Sep. (1986)
- [Kur95] T. Kuroiwa, T. Miyagishi, A. Ito, M. Matsuguchi, Y. Sadaoka, Y. Sakai, *A thin-film polysulfone-based capacitive-type relative-humidity sensor*, Sensors and Actuators B 24-25 (1995) 692-695
- [Lar89] M. Larson et al. (Donnelly Corp.), (USA), *Windshield moisture sensing control circuit*, US Patent 4859867, 12pp, 22 Aug. (1989)
- [Li01] Y. Li, M.J. Yang, N. Camaioni, G. Casalbore-Miceli, *Humidity sensors based on polymer solid electrolytes : investigation on the capacitive and resistive devices construction*, Sensors and Actuators B 77 (2001) 625-631
- [Lu95] M.Y. Lu et al. (Prospects Corp.), (USA), *Capacitive moisture sensor*, US Patent 5402075, 10 pp, 28 Mar. (1995)
- [Mar00] J. Marendic-Miljkovic, M. Tasic, S. Rajsic, Z. Vukmirovic, *Precipitation onset detection with a rain sensor of improved sensitivity*, Atmospheric Environment 34 (2000) 5175-5181

- [Mat98] M. Matsuguchi, T. Kuroiwa, T. Miyagishi, S. Suzuki, T. Ogura, Y. Sakai, *Stability and reliability of capacitive-type relative humidity sensors using crosslinked polyimide films*, Sensors and Actuators B 52 (1998) 53-57
- [Med91] J. Medzius (PPG Industries Inc.), (USA), *Windshield moisture sensor*, US Patent 5040411, 9 pp, 20 Aug. (1991)
- [Mue89] D.L. Mueller et al. (General Motors Corp.), (USA), *Vehicule windshield and wiper with rain sensor*, US Patent 4827198, 6 pp, 2 May. (1989)
- [Net98] Y. Netzer, (Israel), *Differential windshield capacitive sensors*, US Patent 5801307, 34 pp, 1 Sep. (1998), Id PTC Int. Appl. WO 98/30922 (1998)
- [Net02] Y. Netzer, (Israel), *Differential windshield capacitive rain sensor*, US Patent 6373263, 14 pp, 16 Apr. (2002)
- [Pal89] P. Palanisamy (Delco Electronic Corp.), (Inde), *Moisture sensor and method of fabrication thereof*, US Patent 4797605, 10 pp, 10 Jan. (1989)
- [Psa02] PSA, *Communication privée*, 2002
- [Rit02] Z.M. Rittersma, *Recent achievements in miniaturised humidity sensors – a review of transduction techniques*, Sensors and Actuators A 96 (2002) 196-210
- [Sag94] K. Sager, G. Gerlach, A. Schroth, *A humidity sensor of a new type*, Sensors and Actuators B 18-19 (1994) 85-88
- [Sta99] J. Stam, J. Bechtel (Gentex Corp), (USA), *Moisture sensor and windshield fog detector using an image sensor*, US Patent 5923027, 14 pp, 13 Jul. (1999)
- [Ste75] H. Steinmann (Bosch GmbH), (Allemagne), *Dispositif de commutation avec détecteur capacitif*, Brevet Français 73.27273, 6 pp, 25 Jul. (1975), Id US Patent 3826979 (1975)

- [Ste91] H. Steinmann (Bosch GmbH), (Allemagne), *Device and rain-induced switching on and off of an electric windscreen wiper motor*, US Patent 4987354, 4 pp, 22 Jan. (1991)
- [Tak94] S. Takashima, M. Kawase, S. Tomita, *Water sensing method with OTDR and optical sensor for non-pressurized optical fiber cable system*, IEICE Transactions on Communications, E77-B, Issue 6 (1994) 794-799
- [Tan99] S. Tanaka et al. (Nippon Sheet Glass Co LTD), (Japan), *Wiper control apparatus*, US Patent 5917603, 11pp, 29 Jun. (1999)
- [Tra95] E. Traversa, *Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments*, Sensors and Actuators B 23 (1995) 1335-1356
- [Wald93] F.A. Waldman et al. (Axiomatics Corp.), (USA), *Apparatus and methods for measuring the dielectric constant and geometric properties of materials*, US Patent 5223796, 38 pp, 29 Jun. (1993)
- [Wil89] J.F. Wilson et al. (PPG Industries Inc.), (USA), *Windshield moisture sensor*, US Patent 4831493, 9 pp, 16 May. (1989)

CHAPITRE II

Comportement diélectrique des matériaux du pare-brise : étude en fréquence et en température

I. Introduction.....	45
II. Matériaux du pare-brise.....	45
II.1. Polyvinyl butyral	46
II.2. Verre sodocalcique	47
III. Etude théorique des phénomènes diélectriques.....	48
III.1. Approche macroscopique des phénomènes diélectriques	48
III.1.a. Généralités	48
III.1.b. Condensateur plan dont les armatures métalliques sont séparées par le vide ..	49
III.1.c. Condensateur plan dont les armatures métalliques sont séparées par un milieu diélectrique	50
III.2. Approche microscopique des phénomènes diélectriques.....	54
III.2.a. Modes de polarisation.....	54
III.2.b. Polarisation dipolaire : modèle de Debye	56
IV. Comportement diélectrique des matériaux du pare-brise	59
IV.1. Principe de la spectroscopie d'admittance	59
IV.2. Caractérisation électrique du PVB	61
IV.2.a. Mesures préliminaires	61
IV.2.b. Applicabilité du modèle de Debye.....	63
IV.2.c. Approche quantique des phénomènes diélectriques : modèle du double puits de potentiel.....	65
IV.3. Caractérisation électrique du verre	70
IV.3.a. Comparaison des trois échantillons de verre.....	71
IV.3.b. Approche quantique des phénomènes diélectriques	72
V. Conclusion.....	75
Bibliographie	76

I. Introduction

Le comportement d'un capteur capacitif dépend :

- du dimensionnement des électrodes (longueurs, largeurs, écartements,...),
- et des caractéristiques des diélectriques sous l'influence du champ électrique, en particulier :
 - * leur volume,
 - * et leurs propriétés diélectriques (notamment leurs permittivités diélectriques).

Tous ces paramètres dépendent des conditions de fonctionnement du capteur, et plus particulièrement de la température. Le capteur, devant être implanté à l'intérieur du pare-brise, est amené à subir les mêmes variations de température $[-40 \text{ à } +80^{\circ}\text{C}]$ [Psa03] et doit donc pouvoir fonctionner correctement dans cette gamme de température.

Dans ces conditions, la constitution préliminaire d'une banque de données regroupant les valeurs expérimentales des permittivités diélectriques des matériaux du pare-brise en fonction de la température est nécessaire à la phase de dimensionnement du capteur par simulation numérique. Une étude des permittivités diélectriques en fonction de la fréquence, dans l'intervalle $[100\text{Hz à } 100\text{kHz}]$, est menée en parallèle afin d'orienter le choix de la fréquence de fonctionnement du capteur.

Les résultats expérimentaux sont confrontés au comportement théorique des diélectriques. Par cette étude, nous cherchons à modéliser la variation de la permittivité diélectrique des matériaux du pare-brise en fonction de la température et de la fréquence. L'utilisation de ces expressions permettra de prévoir l'influence de ces paramètres sur les capacités et donc sur les performances du capteur.

II. Matériaux du pare-brise

Le capteur de pluie exploite la structure feuilletée des pare-brises automobiles, constitués de deux feuillets de verre entre lesquels s'intercale un film synthétique de polyvinyl butyral (PVB) (cf. *Figure I.4*).

II.1. Polyvinyl butyral

Le polyvinyl butyral (PVB) est un polymère isolant, principalement utilisé comme film intercalaire dans la confection des verres feuilletés en raison de sa transparence, de sa bonne adhérence au verre, de son élasticité et de sa résistance à l'impact. Lorsque le verre se brise, les morceaux restent collés au feuillet plastique, ce qui fait du verre feuilleté un verre de sécurité, couramment employé dans les secteurs du bâtiment et de l'industrie automobile.

Le PVB est un copolymère amorphe de la famille des polyacétals, contenant approximativement :

- 80% de polyvinyl butyral

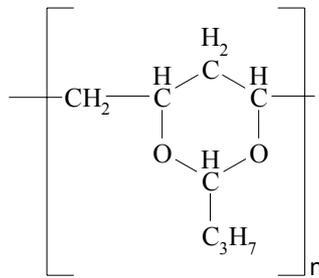


Figure II. 1 : structure chimique du monomère -(vinyl butyral)

- 19% de polyvinyl alcool

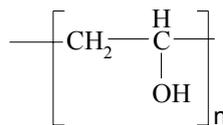


Figure II. 2 : structure chimique du monomère -(vinyl alcool)

- 1% de polyvinyl acétate

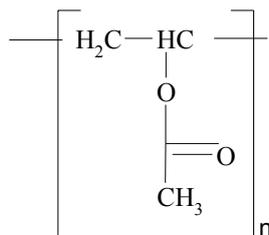


Figure II. 3 : structure chimique du monomère -(vinyl acétate)

L'échantillon de PVB dont nous disposons, se présente sous la forme d'un film plastique opaque de 0,8mm d'épaisseur.

II.2. Verre sodocalcique

Transparent, dur et isolant, le verre est un composé amorphe, essentiellement constitué de silice (SiO_2), combinée à d'autres composés en proportions variables permettant de modifier les propriétés chimiques, physiques, thermiques ou mécaniques du verre. Il existe donc une infinité de verres dont les compositions varient en fonction de l'usage et des propriétés désirées.

Nous avons à notre disposition trois types de verre utilisés dans la confection de pare-brises automobiles, de 2,1mm d'épaisseur, teintés différemment :

- le verre *Dark* : échantillon le plus teinté,
- le verre *Light* : échantillon de teinte intermédiaire,
- le verre *Clear* : échantillon le plus clair.

Une analyse EDX est réalisée sur chacun des trois échantillons de verre. La *Figure II.4* présente le spectre obtenu pour l'échantillon *Dark*.

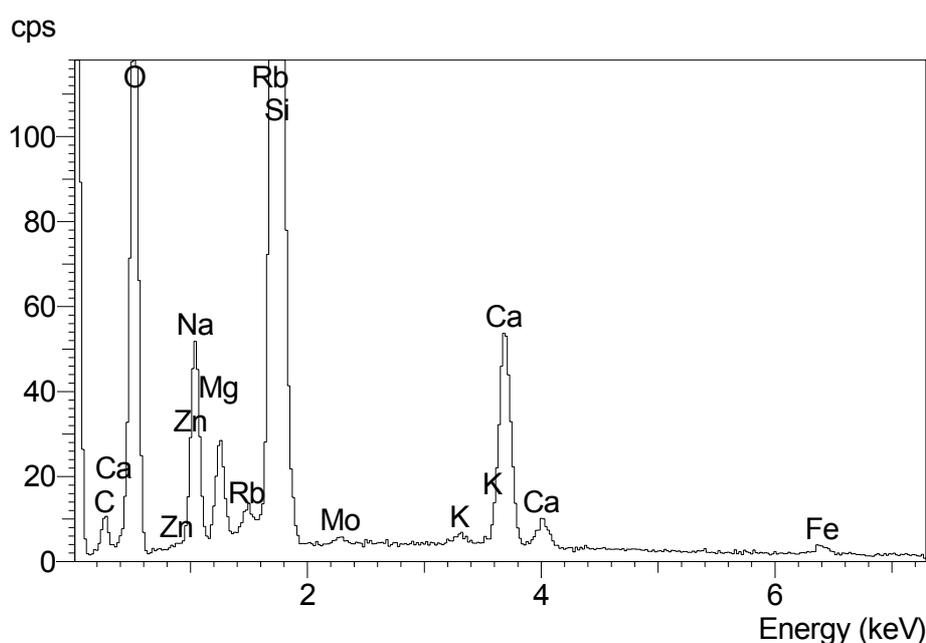


Figure II. 4 : spectre du verre *Dark* obtenu par EDX

L'analyse chimique des trois verres révèle la présence majoritaire de silice ($\approx 70\%$), de sodium (sous forme d'oxyde de sodium Na_2O), de calcium (sous forme d'oxyde de calcium CaO), ainsi que de quelques ions métalliques additionnels résultant du processus de fabrication. Cette composition est représentative des verres sodocalciques, couramment utilisés pour la confection des pare-brises automobiles.

La composition chimique des trois échantillons de verre est très similaire. Seule la quantité de fer varie d'un échantillon à l'autre. Du fer est clairement présent dans l'échantillon *Dark*, ainsi que dans le *Light* mais en moindre proportion. Quant au verre *Clear*, il est difficile de conclure, le pic correspondant au fer, s'il existe, est noyé dans le bruit de fond. Ceci confirme les différences de teinte observées, puisque les ions Fe^{2+} de l'oxyde ferreux confèrent une coloration vert bouteille au verre. L'échantillon de verre *Dark*, dont la teneur en fer est la plus élevée, est le plus teinté.

III. Etude théorique des phénomènes diélectriques

Avant de déterminer expérimentalement les propriétés diélectriques du verre et du PVB, il est utile de rappeler quelques notions indispensables à la compréhension des phénomènes de polarisation dans les matériaux diélectriques. Cette étude théorique constitue la base de la modélisation de la variation de la permittivité diélectrique du verre et du PVB en fréquence et en température.

III.1. Approche macroscopique des phénomènes diélectriques

III.1.a. Généralités

Si un milieu diélectrique, compris entre deux électrodes métalliques, est soumis à un champ électrique statique \vec{E} , la charge Q accumulée aux électrodes est donnée par :

$$Q = \iiint_V \rho \cdot dv \quad (1)$$

Dans cette expression, ρ représente la densité de charge dans le diélectrique de volume v , au voisinage de l'électrode. Cette densité de charge peut être calculée par l'équation de Poisson :

$$\Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_s} = 0 \quad (2)$$

ΔV représente le Laplacien du potentiel V dont dérive le champ électrique \vec{E} ($\vec{E} = -\vec{\nabla}V$), ε_0 la constante diélectrique du vide et ε_s la permittivité statique du milieu. Cette dernière représente sa contribution au stockage de charges et traduit la polarisation du milieu.

En définissant l'induction électrique, telle que :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_s \vec{E} \quad (3)$$

la charge Q accumulée aux électrodes s'écrit :

$$Q = \iint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

où S représente la surface des électrodes.

C'est le théorème de Gauss qui permet de calculer la charge libre stockée sur les armatures.

Nous définissons également le vecteur polarisation \vec{P} , tel que :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (5)$$

$$\text{donc : } \vec{P} = \varepsilon_0 (\varepsilon_s - 1) \vec{E} \quad (6)$$

III.1.b. Condensateur plan dont les armatures métalliques sont séparées par le vide

Nous considérons un condensateur plan, constitué de deux électrodes métalliques, de surface S , distantes de d , séparées par le vide. Dans la suite de l'étude, l'indice 0 fait référence au vide.

- **Polarisation par un champ électrique continu**

La charge accumulée sur les armatures métalliques, résultant de l'application d'une différence de potentiel continue V (\vec{E} constant) est donnée par :

$$q_0 = \vec{D}_0 \cdot \vec{S} \quad (7)$$

$$\text{avec : } \vec{D}_0 = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (8)$$

$$\text{donc : } q_0 = \varepsilon_0 \vec{E} \cdot \vec{S} \quad (9)$$

Comme le vide est homogène et que $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$, il vient :

$$q_0 = \varepsilon_0 S \frac{V}{d} \quad (10)$$

Soit encore, en définissant la capacité du condensateur plan à vide :

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \quad (11)$$

La charge accumulée sur les électrodes et l'induction électrique entre ces dernières sont données par :

$$q_0 = C_0 V \quad (12)$$

$$D_0 = \frac{C_0 V}{S} \quad (13)$$

- **Polarisation par un champ électrique alternatif**

Soumis à un champ alternatif $E_{(t)} = \frac{V_{(t)}}{d}$, tel que $V_{(t)} = V_0 \sin \omega t$, de pulsation ω donnée par $\omega = 2\pi f$ où f représente la fréquence du signal, le courant dans le circuit bouclant les deux armatures, en quadrature avance sur la tension, est donné par :

$$i_{0(t)} = j C_0 \omega V_{(t)} = j \frac{\varepsilon_0 S}{d} \omega V_{(t)} \quad (14)$$

Nous définissons également la conductivité par :

$$\sigma_0 = j \varepsilon_0 \omega \quad (15)$$

III.1.c. Condensateur plan dont les armatures métalliques sont séparées par un milieu diélectrique

Nous considérons maintenant un condensateur plan, constitué de deux électrodes métalliques, de surface S , distantes de d , séparées par un milieu diélectrique. L'insertion d'un matériau diélectrique entre les armatures du condensateur provoque une modification de la charge stockée.

- **Polarisation par un champ électrique continu**

Par rapport au cas précédent, la charge stockée sur les armatures augmente. Comme l'indique la *Figure II.5*, des chaînes de dipôles orientés par le champ électrique sont créées dans le milieu. La somme des charges est globalement neutre dans le volume du diélectrique, mais ils provoquent une dissymétrie électrique telle que des charges apparaissent près de la surface

des armatures. Les charges portées par les armatures doivent donc à la fois neutraliser la force électromotrice appliquée, mais en plus neutraliser les charges stockées dans le diélectrique.

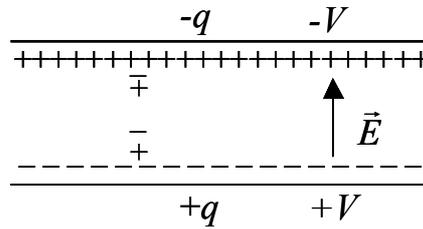


Figure II. 5 : polarisation d'un diélectrique plan par un champ électrique

Cette charge reflète la polarisation du matériau qui se traduit par sa permittivité relative, ici statique ϵ_s , de telle façon que :

$$q = \epsilon_s C_0 V = CV \tag{16}$$

La capacité s'écrit alors :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{S}{d} \tag{17}$$

Dans ce cas, l'induction électrique devient :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}_S = \epsilon_0 \epsilon_s \vec{E} \tag{18}$$

Dans cette expression, \vec{P}_S représente la polarisation statique du milieu, telle que :

$$\vec{P}_S = \epsilon_0 (\epsilon_s - 1) \vec{E} \tag{19}$$

• Polarisation par un champ électrique alternatif

La permittivité relative du matériau, que nous appelons $\epsilon_{r(\omega)}$, n'est maintenant plus une constante. Elle dépend de la fréquence du signal et donc de la nature des dipôles mis en cause. Le courant électrique dans le circuit d'alimentation devient :

$$i_{(t)} = jC_{(\omega)} \omega V_{(t)} = jC_0 \omega \epsilon_{r(\omega)} V_{(t)} \tag{20}$$

Si la capacité était parfaite, l'orientation des dipôles se ferait sans contrainte ni perte. Dans ce cas, $\epsilon_{r(\omega)}$ serait réelle et le courant serait en quadrature avance sur la tension. Mais, en raison du phénomène de polarisation, une partie du courant se trouve en phase avec la tension. La création de dipôles, puis leur orientation dans le champ, nécessite une énergie active. Il s'en

suit que, pour traduire ces pertes diélectriques, la permittivité relative $\epsilon_{r(\omega)}$ s'exprime sous forme complexe :

$$\epsilon_{r(\omega)} = \epsilon'_{(\omega)} - j\epsilon''_{(\omega)} \quad (21)$$

Le courant devient alors :

$$i_{(t)} = j\omega(\epsilon'_{(\omega)} - j\epsilon''_{(\omega)})C_0V_{(t)} \quad (22)$$

soit encore :

$$i_{(t)} = \omega\epsilon''_{(\omega)}C_0V_{(t)} + j\omega\epsilon'_{(\omega)}C_0V_{(t)} \quad (23)$$

En définissant l'admittance complexe $Y_{(\omega)}$ par :

$$Y_{(\omega)} = Y_{r(\omega)} + jY_{i(\omega)} \quad (24)$$

$$\text{telle que : } Y_{(\omega)} = \frac{i_{(t)}}{V_{(t)}} = \sigma_{(\omega)} \frac{S}{d} \quad (25)$$

il vient :

$$i_{(t)} = (Y_{r(\omega)} + jY_{i(\omega)})V_{(t)} \quad (26)$$

Après identification des termes de la relation (23), nous montrons que l'admittance présente une partie réelle en phase avec la tension :

$$Y_{r(\omega)} = \omega\epsilon''_{(\omega)}C_0 = \omega\epsilon''_{(\omega)}\epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (27)$$

et une partie imaginaire en quadrature sur la tension, qui reflète l'aspect purement capacitif du diélectrique :

$$Y_{i(\omega)} = C_{(\omega)}\omega = \omega\epsilon'_{(\omega)}C_0 = \omega\epsilon'_{(\omega)}\epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (28)$$

Dans ce cas, la conductivité complexe du matériau $\sigma_{(\omega)}$ s'écrit :

$$\sigma_{(\omega)} = \frac{i_{(t)}d}{V_{(t)}S} = \epsilon_0\epsilon''_{(\omega)}\omega + j\epsilon_0\epsilon'_{(\omega)}\omega \quad (29)$$

Par ailleurs, comme dans le cas du condensateur statique, le vecteur polarisation est donné par :

$$\vec{P}_{(t)} = \epsilon_0(\epsilon_{r(\omega)} - 1)\vec{E}_{(t)} \quad (30)$$

Toutes ces quantités macroscopiques dépendent de la fréquence.

Nous supposons maintenant que le diélectrique présente une conductivité σ_{dc} sous une tension continue et que les porteurs de charge qui en sont responsables sont suffisamment mobiles pour suivre les évolutions du champ électrique aux fréquences de travail.

La conductivité complexe se scinde alors en une partie réelle :

$$\sigma_{1(\omega)} = \sigma_{dc} + \varepsilon_0 \varepsilon''(\omega) \omega \quad (31)$$

qui traduit les fuites et les pertes diélectriques (énergie requise pour l'orientation des dipôles dans le champ), et une partie imaginaire :

$$\sigma_{2(\omega)} = \varepsilon_0 \varepsilon'(\omega) \omega \quad (32)$$

qui reflète les phénomènes capacitifs.

La permittivité relative complexe s'écrit dans ce cas :

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \left(\varepsilon''(\omega) + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \varepsilon_0} \right) \quad (33)$$

En présence d'un diélectrique, le système peut être représenté par une résistance R_p et une capacité C_p montées en parallèle, comme le montre la *Figure II.6*.

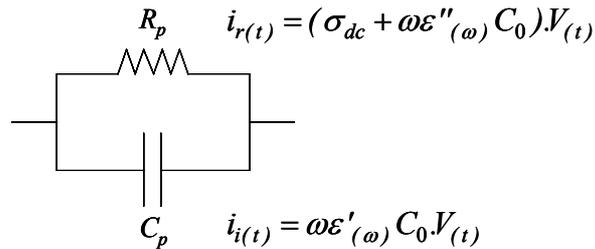


Figure II. 6 : circuit équivalent à un diélectrique

D'après les équations (27) et (28), nous avons :

$$Y_{r(\omega)} = \sigma_{dc} + \omega \varepsilon''(\omega) C_0 = \sigma_{dc} + \omega \varepsilon''(\omega) \varepsilon_0 \frac{S}{d} = \frac{I}{R_p} \quad (\text{phénomènes résistifs}) \quad (34)$$

$$Y_{i(\omega)} = C_{p(\omega)} \omega = \omega \varepsilon'(\omega) C_0 = \omega \varepsilon'(\omega) \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (\text{phénomènes capacitifs}) \quad (35)$$

La représentation du courant et de la tension dans le plan complexe est donnée *Figure II.7*.

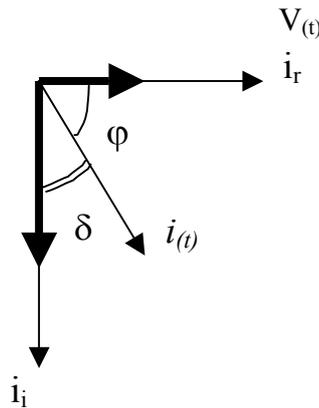


Figure II. 7 : représentation du courant et de la tension dans le plan complexe

Nous pouvons définir l'angle de perte δ , complément de l'angle de déphasage φ du courant par rapport à la tension par :

$$\tan \delta = \frac{\sigma_1(\omega)}{\sigma_2(\omega)} \quad (36)$$

soit, si σ_{dc} , généralement très faible pour un bon isolant, est négligé :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{1}{R_p C_p \omega} \quad (37)$$

La tangente de l'angle de perte représente un critère de qualité du diélectrique. Il est d'autant plus faible que l'isolant est bon.

III.2. Approche microscopique des phénomènes diélectriques

III.2.a. Modes de polarisation

En fonction de la fréquence du champ électrique appliqué au diélectrique, différents modes de polarisation apparaissent. Ces modes sont présentés par ordre de fréquence décroissant [And66].

- **Polarisation électronique (ou optique) :**

En l'absence de champ électrique extérieur, le centre de gravité des charges négatives du nuage électronique d'un atome coïncide avec le centre de gravité des charges positives du noyau. La polarisation de l'atome est nulle ainsi que le moment diélectrique qui en résulte.

Lorsqu'un champ électrique est appliqué, la déformation du nuage électronique entraîne un déplacement du barycentre des charges induisant un moment électrique. Le système se comporte alors comme un oscillateur harmonique qui répond à des fréquences très élevées, proches des fréquences optiques. Dans ce cas, la permittivité diélectrique correspondante est

$$\text{donnée par : } \varepsilon_{\infty} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \varepsilon_r(\omega) = n_r^2 \quad (38)$$

où n_r représente l'indice de réfraction optique du matériau.

- **Polarisation moléculaire :**

Sous l'application d'un champ électrique de fréquence plus faible, ou bien naturellement pour les molécules polaires, les molécules du matériau présentent microscopiquement une répartition des charges inhomogène, que l'on peut représenter par une charge positive et une charge négative formant un dipôle. Lors de l'application d'un champ électrique, ces dipôles peuvent soit se déformer (polarisation atomique ou ionique), soit tourner sur eux-mêmes (polarisation d'orientation), ce qui entraîne une modification du moment électrique. La réponse de tels systèmes est très variable. Cependant, les fréquences de résonance de ces dipôles se situent généralement dans le domaine des hyperfréquences, voire de l'infrarouge.

- **Polarisation interfaciale / Polarisation par déplacement de charges limité dans l'espace :**

Polarisation interfaciale : L'apparition d'un dipôle macroscopique peut résulter de migrations de charges dans le matériau sous l'effet du champ électrique et de leur accumulation près des électrodes (bloquantes pour les conducteurs ioniques). Ce phénomène peut également se produire dans les matériaux inhomogènes constitués de plusieurs diélectriques ou contenant des impuretés et/ou des défauts du réseau cristallin qui introduisent des discontinuités de la polarisation.

Polarisation par déplacement de charges limité dans l'espace : Sous l'action d'un champ électrique alternatif, des sauts de porteurs de charges q entre deux sites localisés, font apparaître une dissymétrie de charges dans le volume du matériau. Ceci se traduit par l'apparition d'un moment dipolaire qui induit une polarisation sur les électrodes. Une telle polarisation dépend de la nature du diélectrique, de la quantité de charges et de leur répartition dans le volume. La probabilité de saut des porteurs, donc la création de moments électriques, est une fonction du temps dépendant du système et des contraintes extérieures. On caractérise les moments par une constante de temps τ .

Les phénomènes de polarisation par transfert de charges limité dans l'espace, qui dépendent de la température, sont prépondérants aux basses fréquences et donc dans la gamme de fréquence où nous travaillons [100Hz à 100kHz]. Les processus de polarisation optique et moléculaire relaxent à des fréquences supérieures qui ne donnent, a priori, pas lieu à des pertes appréciables dans le domaine d'utilisation du capteur. Dans la suite, nous appelons ε_∞ et P_∞ la permittivité relative et la polarisation induite par les processus de polarisations optique et/ou moléculaire et nous admettons que leurs valeurs sont constantes dans la plage de fréquences étudiée. Nous négligeons également les interactions entre dipôles.

III.2.b. Polarisation dipolaire : modèle de Debye

Divers modèles ont été proposés pour rendre compte des phénomènes diélectriques. Les plus couramment utilisés dérivent du modèle de Debye. Cet auteur suppose qu'**à une fréquence de travail et à une température particulière, un seul type de dipôles**, caractérisé par une constante de temps, **participe à la polarisation** du matériau.

Si \vec{P}_S représente la polarisation statique du diélectrique obtenue à l'équilibre par application d'un champ électrique \vec{E} statique, nous avons vu que : $\vec{P}_S = \varepsilon_0(\varepsilon_S - 1)\vec{E}$.

Si maintenant nous appellons \vec{P}_{SD} la polarisation statique dipolaire et \vec{P}_∞ la polarisation optique et/ou moléculaire, nous avons :

$$\vec{P}_S = \vec{P}_{SD} + \vec{P}_\infty \quad (39)$$

$$\text{mais avec : } \vec{P}_\infty = \varepsilon_0(\varepsilon_\infty - 1).\vec{E} \quad (40)$$

où ε_∞ représente la permittivité relative induite par les processus de polarisation optique et/ou moléculaire, il vient :

$$\vec{P}_{SD} = \varepsilon_0(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty).\vec{E} \quad (41)$$

La seconde hypothèse de Debye [Deb29] consiste à admettre qu'après l'application d'un champ électrique, la vitesse de retour à l'équilibre de la polarisation statique est proportionnelle à l'écart entre la polarisation dipolaire statique P_{SD} et la polarisation dipolaire instantanée $P_{D(t)}$. La polarisation dipolaire parvient donc à sa valeur d'équilibre en vérifiant l'équation différentielle :

$$\tau_{(T)} \frac{dP_{D(t)}}{dt} = P_{SD} - P_{D(t)} \quad (42)$$

Dans cette équation, $\tau_{(T)}$, temps caractéristique de la relaxation des dipôles, dépend de la température T .

Si W_d est l'énergie nécessaire pour déplacer la charge entre deux sites localisés, nous avons :

$$\tau_{(T)} = \tau_0 \exp\left(\frac{W_d}{kT}\right) \quad (43)$$

où k représente la constante de Boltzmann et τ_0 le temps de relaxation lorsque T tend vers l'infini.

Si un champ électrique sinusoïdal de pulsation ω , tel que :

$$\vec{E}_{(t)} = \vec{E}_0 \exp(j\omega t) \quad (44)$$

est appliqué sur le matériau, alors la réponse dipolaire sera la somme d'une solution transitoire et d'une solution permanente. La solution de l'équation (42) est :

$$\vec{P}_{D(t)} = \vec{K} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{(T)}}\right) + \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_S - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau_{(T)}}.\vec{E}_0 \exp(j\omega t) \quad (45)$$

où K est une constante d'intégration.

Dans la plupart des cas, après un temps relativement court, le premier terme transitoire peut être négligé. Dans ce cas, en posant :

$$\vec{P}_{D(t)} = \varepsilon_0(\varepsilon_{r(\omega)} - \varepsilon_\infty).\vec{E}_{(t)} \quad (46)$$

nous en déduisons la permittivité $\varepsilon_{r(\omega)}$ du milieu :

$$\varepsilon_{r(\omega)} = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty})}{1 + j\omega\tau_{(T)}} \quad (47)$$

C'est la formule de Debye.

En identifiant les parties réelle et imaginaire de la permittivité complexe $\varepsilon_{r(\omega)}$ de la formule (21), il vient :

$$\varepsilon'_{(\omega)} = \varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty})}{1 + \omega^2\tau_{(T)}^2} \quad (48)$$

$$\varepsilon''_{(\omega)} = (\varepsilon_S - \varepsilon_{\infty}) \cdot \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau_{(T)}^2} \quad (49)$$

Ces formules ne tiennent pas compte de la contribution de la conductivité statique σ_{dc} du milieu, négligeable dans le cas d'un bon isolant.

Les variations théoriques de $\varepsilon'_{(\omega)}$ et de $\varepsilon''_{(\omega)}$ sont représentées, *Figure II.8*, en coordonnées semi-logarithmiques.

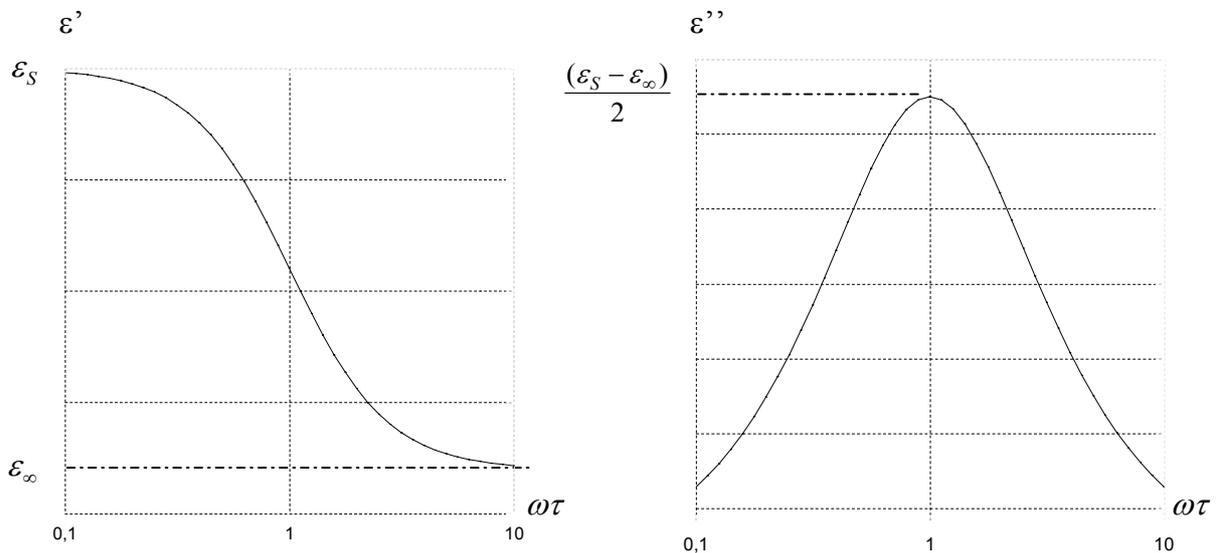


Figure II. 8 : variations théoriques de $\varepsilon'(\omega)$ et de $\varepsilon''(\omega)$

$\varepsilon'_{(\omega)}$ passe par un point d'inflexion pendant que $\varepsilon''_{(\omega)}$ présente un maximum pour $\omega\tau = 1$. Ce phénomène est appelé relaxation dipolaire.

Le modèle de Debye s'applique dans le cas de liquides polaires ou de matériaux homogènes dans lequel la polarisation est due à un retournement de molécules ayant un moment dipolaire non nul ou une orientation spatiale de charges mobiles sous l'effet de l'application d'un champ électrique. Mais qu'en est-il des matériaux dont la géométrie dipolaire s'avère plus complexe, comme les matériaux amorphes tels que le PVB ou le verre?

IV. Comportement diélectrique des matériaux du pare-brise

Les propriétés diélectriques du PVB et des trois échantillons de verre utilisés dans la confection des pare-brises automobiles, sont mesurées dans la gamme de température $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$ et de fréquence $[100\text{Hz à } 100\text{kHz}]$.

IV.1. Principe de la spectroscopie d'admittance

Un film conducteur d'aluminium (épaisseur $\approx 200\text{nm}$) est préalablement déposé par évaporation thermique sous vide sur chacune des deux faces des échantillons de PVB et de verre afin de constituer des électrodes ($\approx 9*9\text{mm}$). Le principe du dépôt est expliqué au chapitre suivant. L'échantillon métallisé, maintenu en position verticale, est placé dans une étuve (SECASI-VRT-SIRPAC) permettant de réguler la température entre -40°C à $+80^\circ\text{C}$. Une résistance de platine (Pt 1000), fixée sur l'échantillon à l'aide d'une pâte conductrice thermique, connectée à un multimètre, permet de déterminer sa température réelle. Un spectromètre d'admittance (HIOKI 3522-50) relié aux électrodes selon la *Figure II.9*, mesure le module $\|Y\|$ et la phase φ de l'admittance complexe de l'échantillon, pour des fréquences variant de 100Hz à 100kHz.

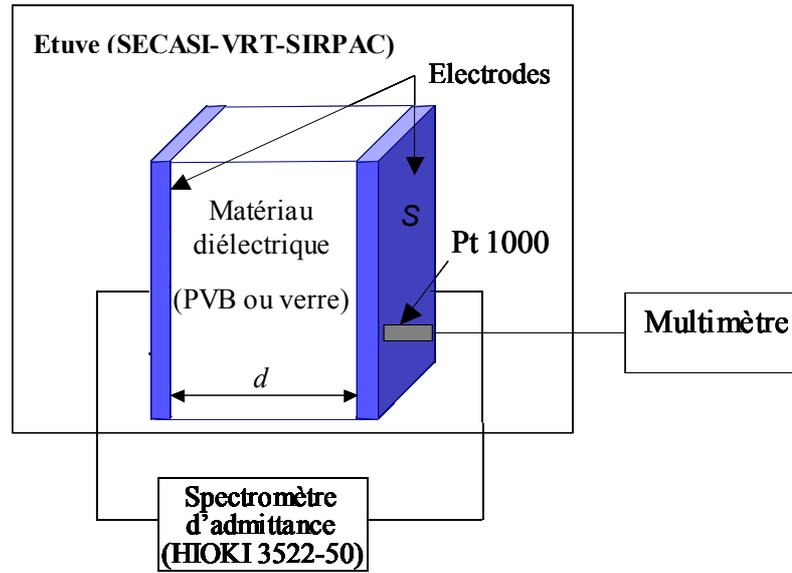


Figure II. 9 : cellule de mesure de l'admittance complexe

Le PVB et le verre sont des isolants, par conséquent, la conductivité σ_{dc} est négligée dans la suite de l'étude.

Dans le domaine de fréquence étudié, les parties réelle et imaginaire de l'admittance évoluent respectivement suivant les lois (27) et (28). Connaissant la surface S des électrodes et l'épaisseur d de l'échantillon ($d_{PVB} = 0,8\text{mm}$ et $d_{verre} = 2,1\text{mm}$), en accord avec la Figure II.7, les parties réelle $\varepsilon'_{(\omega)}$ et imaginaire $\varepsilon''_{(\omega)}$ de la permittivité diélectrique sont données par :

$$\varepsilon'_{(\omega)} = \frac{\|Y\| \sin \varphi \cdot d}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot S} \quad (50)$$

$$\varepsilon''_{(\omega)} = \frac{\|Y\| \cos \varphi \cdot d}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot S} \quad (51)$$

Les valeurs de la résistance parallèle R_p et de la capacité parallèle C_p équivalentes étant également fournies par le spectromètre d'admittance, $\varepsilon'_{(\omega)}$ et $\varepsilon''_{(\omega)}$ peuvent être calculées à partir des formules (34) et (35), telles que :

$$\varepsilon'_{(\omega)} = \frac{C_p \cdot d}{\varepsilon_0 S} \quad (52)$$

$$\varepsilon''_{(\omega)} = \frac{d}{\omega R_p \varepsilon_0 S} \quad (53)$$

IV.2. Caractérisation électrique du PVB

Bien que le film de polymère soit situé sous le capteur et donc au-dessous de la zone sensible, une partie des lignes de champ générées par les électrodes le traverse. Les capacités sont donc susceptibles d'être influencées par la modification des propriétés électriques du PVB avec la fréquence et la température.

IV.2.a. Mesures préliminaires

Les mesures d'admittance sont systématiquement doublées afin de vérifier leur reproductibilité. Une première série de mesures est effectuée lors de la phase de montée en température (de -40°C à $+80^{\circ}\text{C}$) et une seconde lors de la descente (de $+80^{\circ}\text{C}$ à -40°C). La *Figure II.10* représente la variation de la partie réelle de la permittivité diélectrique ϵ' du PVB en fonction de la température à 1kHz pour un cycle thermique complet.

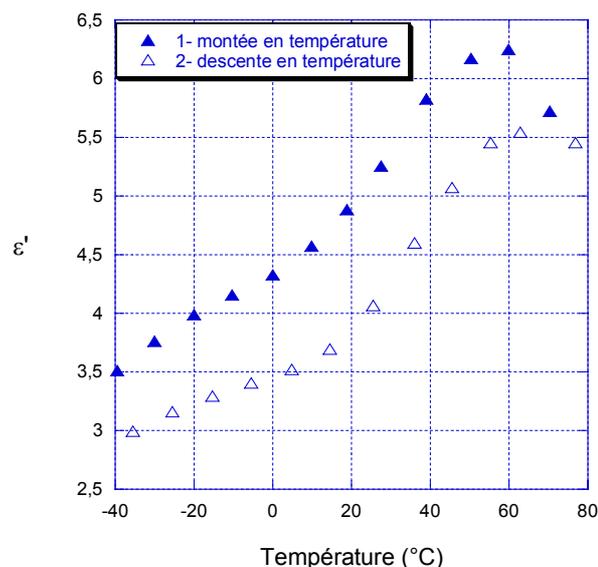


Figure II. 10 : variation de ϵ' du PVB en fonction de la température à 1kHz pour un cycle complet

Les valeurs de permittivité obtenues lors de la montée en température sont supérieures de près d'une unité aux valeurs mesurées ensuite, lors de la descente. Afin de vérifier ces résultats, des cycles thermiques supplémentaires sont effectués sur le même échantillon de PVB. Nous retrouvons alors des valeurs de permittivité reproductibles, similaires à celles obtenues lors de la descente en température.

Une analyse par Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC), effectuée sur un nouvel échantillon de PVB, permet d'expliquer ce phénomène. Le PVB, initialement soumis à une température de -80°C est chauffé jusqu'à $+130^{\circ}\text{C}$, puis refroidi. Le spectre obtenu par DSC est présenté *Figure II.11*.

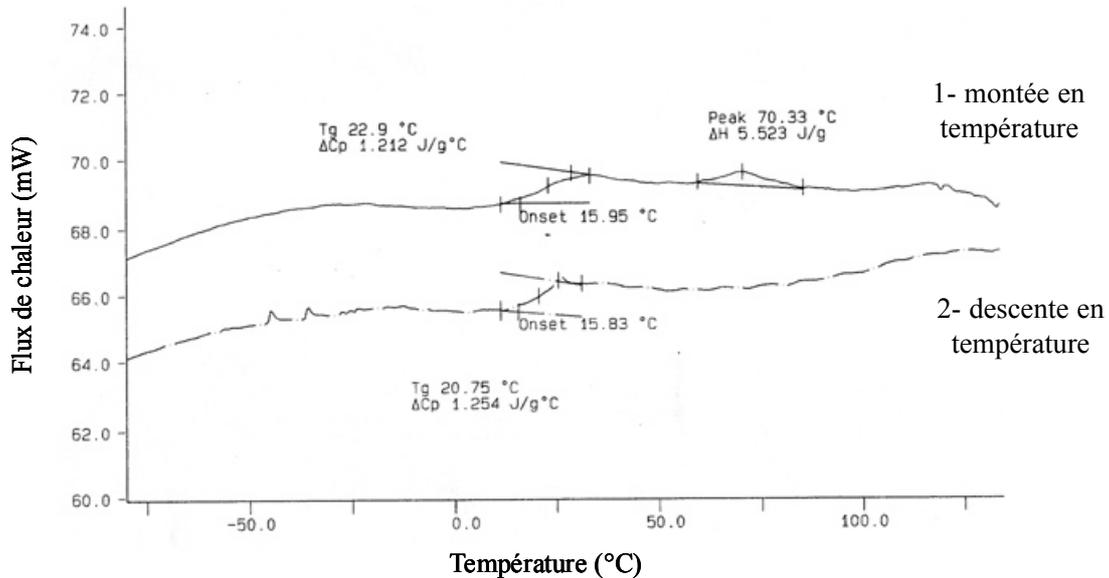


Figure II. 11 : analyse DSC du PVB

Ce spectre met en évidence une différence de comportement en montée et en descente de température. Pendant la montée en température, dès 58°C et jusqu'à 85°C , certains composés du polymère, probablement des solvants, s'évaporent. Le PVB change ainsi de composition, ce qui explique l'écart énergétique entre les deux courbes. Le pic correspondant à l'évaporation des solvants, dont le maximum sort à $70,33^{\circ}\text{C}$, n'apparaît plus lors du refroidissement. La modification irréversible de la composition du PVB lors de la montée en température entraîne logiquement une variation de la permittivité diélectrique.

Lors du processus industriel de fabrication du verre feuilleté, le film de PVB est assemblé en autoclave, sous une pression de 12 bars à une température de l'ordre de 140°C [Psa03], ce qui implique que l'évaporation des composés volatils se produit. Il paraît donc opportun de considérer, dans la suite de l'étude, les valeurs de permittivité obtenues lors de la descente en température.

L'analyse par DSC nous renseigne également sur la température de transition vitreuse T_g du PVB. Sa valeur ($T_g = 20,75^\circ\text{C}$) relativement basse pour un polymère, est en accord avec les valeurs mesurées sur des échantillons commerciaux de PVB [Dha02].

IV.2.b. Applicabilité du modèle de Debye

Les évolutions de ε' et de ε'' du PVB en fonction de la fréquence, entre 100Hz et 100kHz, sont présentées *Figure II.12*, pour différentes températures comprises entre -35°C et $+75^\circ\text{C}$.

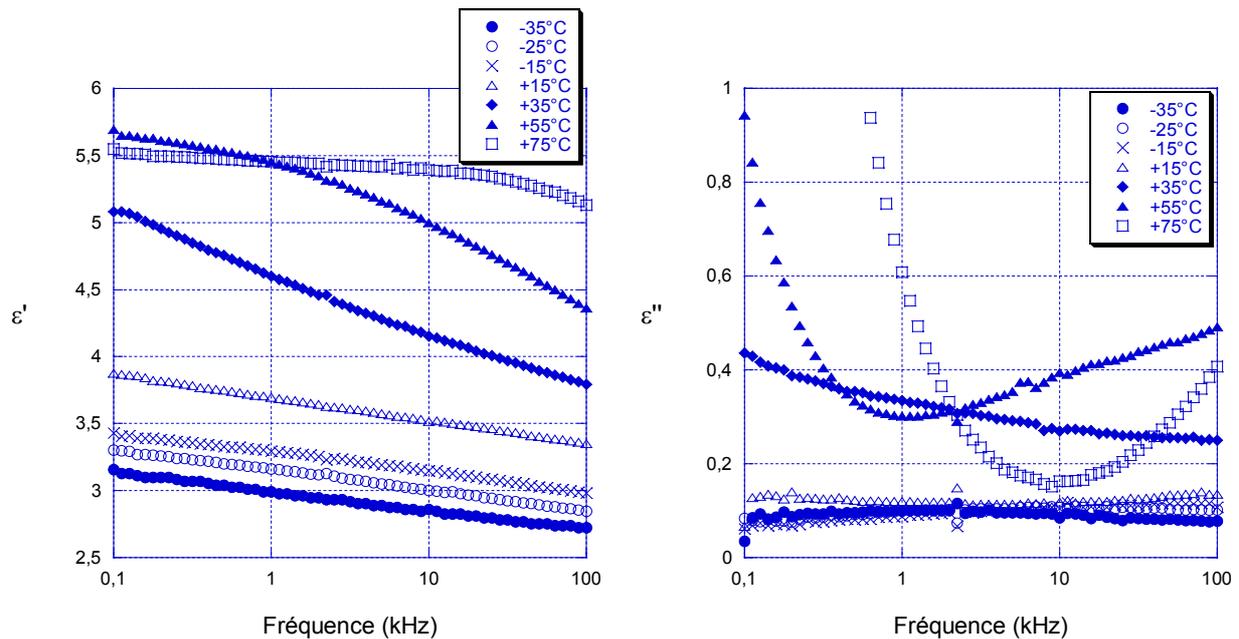


Figure II. 12 : variations de ε' et de ε'' du PVB en fonction de la fréquence pour différentes températures

La partie réelle de la permittivité diélectrique ε' du PVB augmente avec la température et diminue avec la fréquence. Les mécanismes de polarisation, activés thermiquement, sont limités par la fréquence d'excitation. Lorsque la fréquence devient grande, le changement de direction du champ électrique est trop rapide et une partie des dipôles ne peut plus suivre le signal d'excitation. Un tel comportement a déjà été observé et commenté par *Saad et al.* [Saa94] puis par *El-Sherbiny et al.* [EIS01].

Les courbes représentant ε' et ε'' ont des allures différentes suivant le domaine de température. Il semble que la température de transition vitreuse ($T_g = 20,75^\circ\text{C}$), déterminée par DSC (*Figure II.11*), marque un changement des mécanismes de polarisation dans le PVB.

- $T > T_g$: L'augmentation des pertes diélectriques ϵ'' observée à haute fréquence est caractéristique d'une relaxation dipolaire. Dans notre gamme de fréquence, seule la naissance du pic de ϵ'' est visible, ce qui rend impossible la détermination des temps de relaxation $\tau_{(T)}$ ($\omega\tau = 1$ au sommet du pic). Il semble que le maximum de ϵ'' se déplace vers les hautes fréquences lorsque la température augmente. Une telle variation est en accord avec la relation (43) : lorsque la température augmente, le temps caractéristique de relaxation des dipôles $\tau_{(T)}$ diminue, ce qui implique que la fréquence de relaxation augmente.

Le monomère -(vinyl butyral), représenté *Figure II.13*, est probablement à l'origine de cette relaxation dipolaire, en raison de son moment dipolaire permanent.

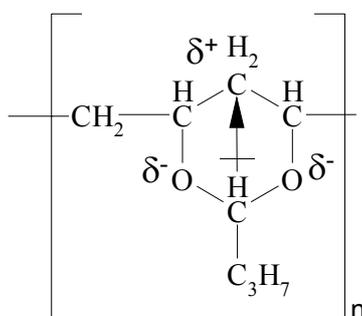


Figure II. 13: représentation du moment dipolaire dans le monomère -(vinyl butyral)

La constante de temps de relaxation dépend de l'environnement du dipôle. Aux alentours de la température de transition vitreuse, les mouvements moléculaires sont limités par l'environnement dense du polymère. C'est pourquoi, le pic de ϵ'' est aplati, traduisant une répartition des constantes de temps de relaxation. La viscosité du PVB diminue avec la température, facilitant ainsi le retournement des monomères. La distribution des temps de relaxation est alors réduite et le pic de ϵ'' affiné.

L'augmentation des pertes diélectriques ϵ'' aux basses fréquences correspond au courant de fuite σ_{dc} .

Au-delà de la température de transition vitreuse, le comportement du PVB peut donc être représenté par le modèle de Debye, en admettant une distribution de constantes de temps de relaxation. Afin de tenir compte de cette distribution de constantes de temps, différents

auteurs, comme Cole et Cole, Davidson, Havriliak, Negami et Jonscher ont apporté des corrections au modèle de Debye, par le biais de formules empiriques [Coe93]. Mais nos fréquences de travail sont trop basses pour déterminer ces constantes de temps de relaxation.

- $T < T_g$: En deçà de la température de transition vitreuse, le comportement du PVB, montre une déviation notable par rapport au modèle de Debye. De nombreux matériaux désordonnés, tels que le PVB, sont caractérisés par une absence de pics de ε'' dans la gamme des basses fréquences. Ce type de variation de ε' et ε'' chez les matériaux amorphes est expliqué en terme de polarisation par déplacement de charges limité dans l'espace. Le PVB est constitué de plusieurs types de dipôles auxquels correspondent autant de temps de relaxation. Les courbes obtenues représentent la superposition des réponses de chacun des dipôles.

IV.2.c. Approche quantique des phénomènes diélectriques : modèle du double puits de potentiel

Dans le modèle du double puits de potentiel, la polarisation résulte de sauts d'une charge entre deux sites énergétiques stables, séparés l'un de l'autre par une distance r et une barrière de potentiel E_0 , comme le montre la *Figure II.14*. Nous avons vu que la polarisation volumique aux basses fréquences est le plus souvent expliquée en terme de transferts de charges limités dans l'espace. Dans ce cas, chaque dipôle, dans la matrice diélectrique, peut être considéré comme le déplacement géométrique d'un porteur de charge, sautant d'un puits vers le puits voisin. Les deux états fondamentaux dans les puits sont séparés par un faible écart énergétique ΔE , modifié par l'application d'un champ électrique externe \vec{E} .

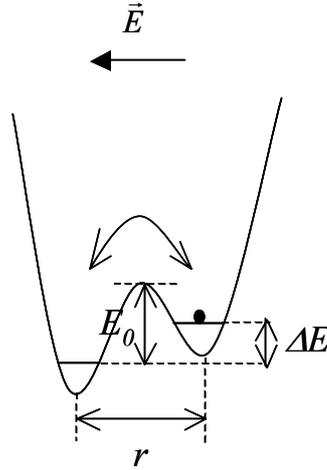


Figure II. 14 : modélisation dipolaire en double puits de potentiel

Plusieurs modèles microscopiques sur le comportement individuel des dipôles ont été proposés pour expliquer les phénomènes diélectriques, à partir du modèle du double puits de potentiel. Le modèle le plus simple est celui de Pollack et Geballe [Pol61] qui considère une constante de temps τ unique et une répartition géométrique uniforme.

En considérant le moment dipolaire μ_D correspondant à la polarisation par déplacement limité de charges et le nombre total N de dipôles présents dans l'échantillon, tels que :

$$\frac{N\mu_D^2}{3kT} = \epsilon_s - \epsilon_\infty \quad (54)$$

les parties réelle (48) et imaginaire (49) de la permittivité diélectrique complexe $\epsilon_{r(\omega)}$, dans le modèle de Debye, s'écrivent :

$$\epsilon'_{(\omega)} = \epsilon_\infty + \frac{N\mu_D^2}{3kT} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (55)$$

$$\epsilon''_{(\omega)} = \frac{N\mu_D^2}{3kT} \cdot \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (56)$$

Nous avons vu que, dans le cas d'une polarisation par déplacement de charges limité dans l'espace, la permittivité ϵ_∞ induite par les processus de polarisations optique et/ou moléculaire peut généralement être négligée. Si nous considérons un dipôle élémentaire, caractérisé par un déplacement de charge e d'une distance r dans la direction du champ électrique, tel que :

$$\mu_D = er \quad (57)$$

les permittivités réelle et imaginaire deviennent :

$$\varepsilon'_{(\omega)} = \frac{N(er)^2}{3kT} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (58)$$

$$\varepsilon''_{(\omega)} = \frac{N(er)^2}{3kT} \cdot \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (59)$$

Pour les matériaux amorphes, les différents modèles utilisés (Mott, Pollack et Pike entre autres) découlent du modèle de Pollack et Geballe, mais en admettant une distribution des constantes de temps de relaxation des dipôles. Dans ce cas, les quantités r , E_0 et ΔE sont des variables aléatoires dont la distribution peut être représentée par une probabilité $p(r, E_0, \Delta E)$.

L'expression de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' déduite de la formule (58) s'écrit :

$$\varepsilon' = \frac{N}{12\varepsilon_0} \iiint \frac{e^2 r^2}{kT \cosh^2\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right)} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \cdot p(r, E_0, \Delta E) \cdot 4\pi r^2 dr dE_0 d\Delta E \quad (60)$$

L'intégration de cette expression [Tre02] permet d'obtenir une relation expliquant la dépendance de ε' à la pulsation ω . Dans tous les modèles, l'expression de ε' se réduit à une expression de type :

$$\varepsilon'_{(\omega, T)} = A_{(T)} \omega^{n-1} \quad \text{où } n \leq 1 \quad (61)$$

Dans cette expression, les paramètres $A_{(T)}$ et n dépendent de la température [Jon73]. La dépendance de $\varepsilon'_{(\omega, T)}$ en température ne peut s'exprimer simplement car T intervient au travers de plusieurs paramètres : la dilatation thermique (augmentation de la distance r entre les puits), la différence de potentiel entre les puits ΔE et le temps caractéristique de saut τ . Dans l'expression (61), $A_{(T)}$ et n englobe les variations de ces différents paramètres.

De telles dépendances ont été observées sur une grande variété de matériaux passée en revue par Jonscher [Jon75] et notamment sur les matériaux amorphes.

Afin de vérifier l'applicabilité de ce modèle au PVB, nous utilisons l'expression (61) pour représenter le comportement de la partie réelle de la permittivité diélectrique. Les paramètres $A_{(T)}$ et n sont calculés numériquement dans l'intervalle de fréquence [100Hz à 100kHz] pour chaque température. L'évolution de ces paramètres en fonction de la température est présentée *Figure II.15*.

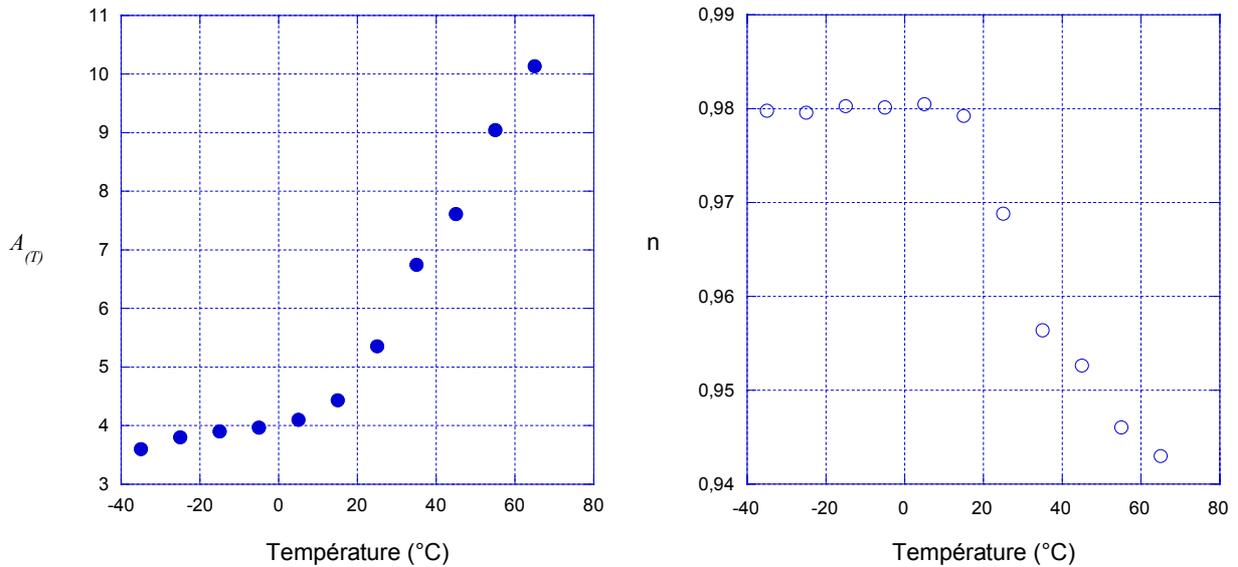


Figure II. 15 : variation de $A_{(T)}$ et de n du PVB avec la température

$A_{(T)}$ augmente à peu près linéairement avec la température avec un changement de pente aux alentours de la température de transition vitreuse ($T_g = 20,75^\circ\text{C}$). L'exposant n , constant jusqu'à T_g , diminue ensuite avec la température. Les variations de $A_{(T)}$ et de n traduisent la modification des mécanismes de polarisation dans le PVB à la température de transition vitreuse.

- Lorsque $T < T_g$, le paramètre $A_{(T)}$ évolue suivant une droite d'équation :

$$A(T) = 4,12 + 1,5 \cdot 10^{-2} T \quad \text{avec} \quad R=0,977 \quad (62)$$

alors que n reste stable : $n \approx 0,98$.

Dans l'intervalle $[-40 \text{ à } +20^\circ\text{C}]$, où les transferts de charges limités dans l'espace prédominent, la dépendance de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' du PVB à la température et à la fréquence peut être modélisée par :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = (4,12 + 1,5 \cdot 10^{-2} T) \omega^{-0,02} \quad (63)$$

- Lorsque $T > T_g$, nous avons vu que le comportement du PVB est conforme au modèle de Debye, en admettant une distribution de constantes de temps de relaxation, qu'il nous est impossible de déterminer à nos fréquences de travail. Bien que l'expression (61) ne soit plus valable au-delà de la température de transition vitreuse, nous choisissons malgré tout d'utiliser cette relation dans le but de modéliser de façon empirique la dépendance de ε' à la température et à la fréquence.

D'après la *Figure II.12*, dès 55°C, l'évolution de ε' présente un palier à basse fréquence, correspondant à la permittivité statique ε_s du modèle de Debye. Il convient donc de scinder ce domaine de température en deux :

- * dans l'intervalle [+20 à +50°C] :

Le paramètre $A(T)$ évolue suivant une droite d'équation :

$$A(T) = 2,44 + 0,12T \quad \text{avec} \quad R=0,997 \quad (64)$$

Dans ce cas, l'exposant n , qui diminue avec la température, peut être modélisé par un polynôme en T d'ordre 2 tel que :

$$n = 1 - 1,6 \cdot 10^{-3}T + 1,1 \cdot 10^{-5}T^2 \quad \text{avec} \quad R=0,990 \quad (65)$$

Dans l'intervalle [+20 à +50°C], la dépendance de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' à la température et à la fréquence peut être modélisée par :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = (2,44 + 0,12T)\omega^{(-1,6 \cdot 10^{-3}T + 1,1 \cdot 10^{-5}T^2)} \quad (66)$$

- * dans l'intervalle [+50 à +80°C] :

Dans ce cas, l'expression précédente ne suffit plus. Il faut tenir compte du palier à basse fréquence qui se déplace vers les hautes fréquences avec la température. Au niveau du palier, l'exposant n tend vers 1 et $A(T)$ vers 5,5. Lorsque la fréquence augmente (dès 1kHz à 55°C ou 10kHz à 75°C), l'expression (66) permet de nouveau de modéliser correctement la dépendance de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' à la température et à la fréquence.

Bien que $A(T)$ et n traduisent les variations de plusieurs paramètres en même temps (r , E_0 , ΔE , τ) lorsque $T < T_g$, et sont même purement empiriques lorsque $T > T_g$, les expressions obtenues permettent de rendre compte des variations de ε' du PVB avec la température sur tout l'intervalle de fréquence étudié (comme le montre la *Figure II.16* à 1kHz).

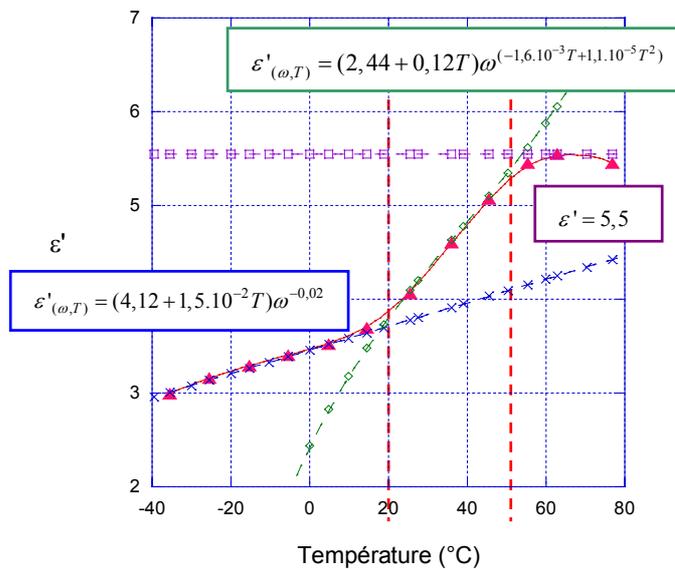


Figure II. 16 : variation de ε' du PVB en fonction de la température à 1kHz

IV.3. Caractérisation électrique du verre

De par sa position sous les électrodes et du faible volume sous influence, le film de PVB n'a, a priori, qu'une incidence minime sur les capacités du capteur. En revanche, le feuillet de verre, localisé entre les électrodes et la zone de détection, d'épaisseur supérieure à celle du PVB, aura vraisemblablement une influence beaucoup plus importante. Un effet éventuel de la température sur la permittivité du verre aura une incidence sur le fonctionnement du capteur qu'il convient d'évaluer. Dans ce qui suit, les dépendances des propriétés diélectriques du verre en température et en fréquence sont donc étudiées.

Conformément à l'étude menée avec le PVB, l'admittance complexe est mesurée sur chacun des trois échantillons de verre (*Clear*, *Light* et *Dark*) pour des fréquences comprises entre 100Hz et 100kHz entre -40°C et $+80^{\circ}\text{C}$.

IV.3.a. Comparaison des trois échantillons de verre

- En fréquence

Les évolutions de ε' et de ε'' des trois échantillons de verre, en fonction de la fréquence, entre 100Hz et 100kHz, sont présentées *Figure II.17*, à 20°C.

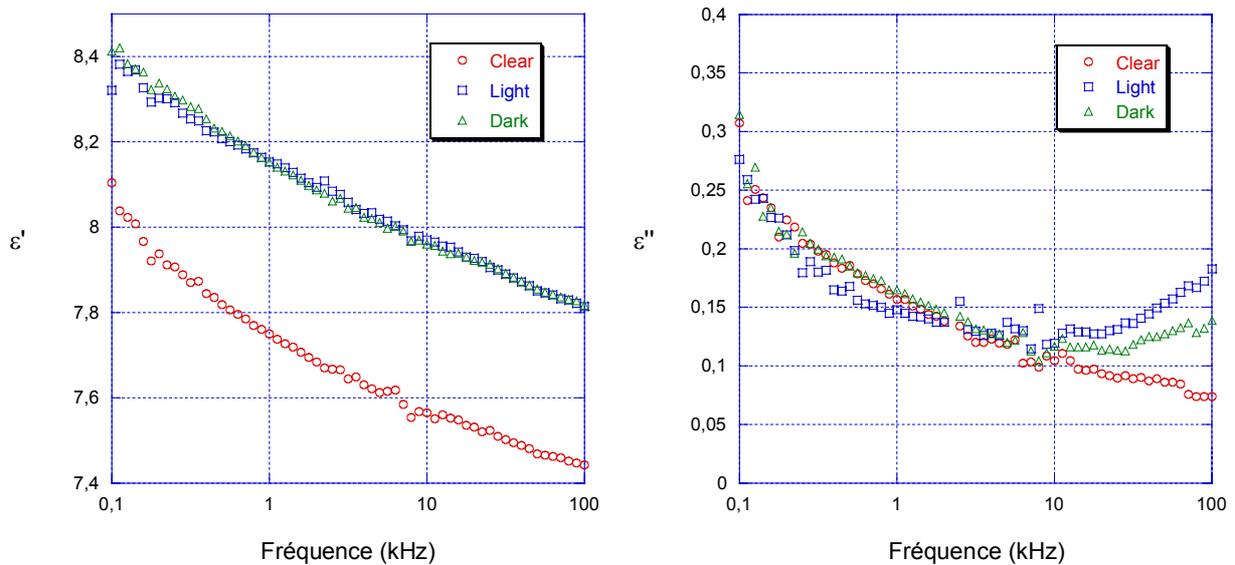


Figure II. 17 : variation de ε' et de ε'' des trois échantillons de verre en fonction de la fréquence à 20°C

Quel que soit le verre considéré, **la permittivité diélectrique diminue avec la fréquence**. Comme pour le PVB, lorsque la fréquence augmente, les dipôles ont du mal à suivre les changements de direction du champ électrique. Les verres *Dark* et *Light* présentent des permittivités similaires en fréquence, supérieures à celle du verre *Clear*. Les différences de permittivité entre les trois échantillons de verre résultent des teneurs différentes en oxydes métalliques, utilisés pour la coloration des verres. Le verre *Clear*, le moins teinté, présente une teneur en oxydes métalliques plus faible et donc une permittivité diélectrique inférieure à celle des deux autres verres.

Les comportements en fréquence des pertes diélectriques des trois échantillons de verre sont comparables jusqu'à 10kHz. Au-delà, une dispersion est observée.

- **En température**

Les évolutions de ε' et de ε'' des trois échantillons de verre, en fonction de la température, entre -40°C et $+80^{\circ}\text{C}$, sont présentées *Figure II.18*, à 1kHz.

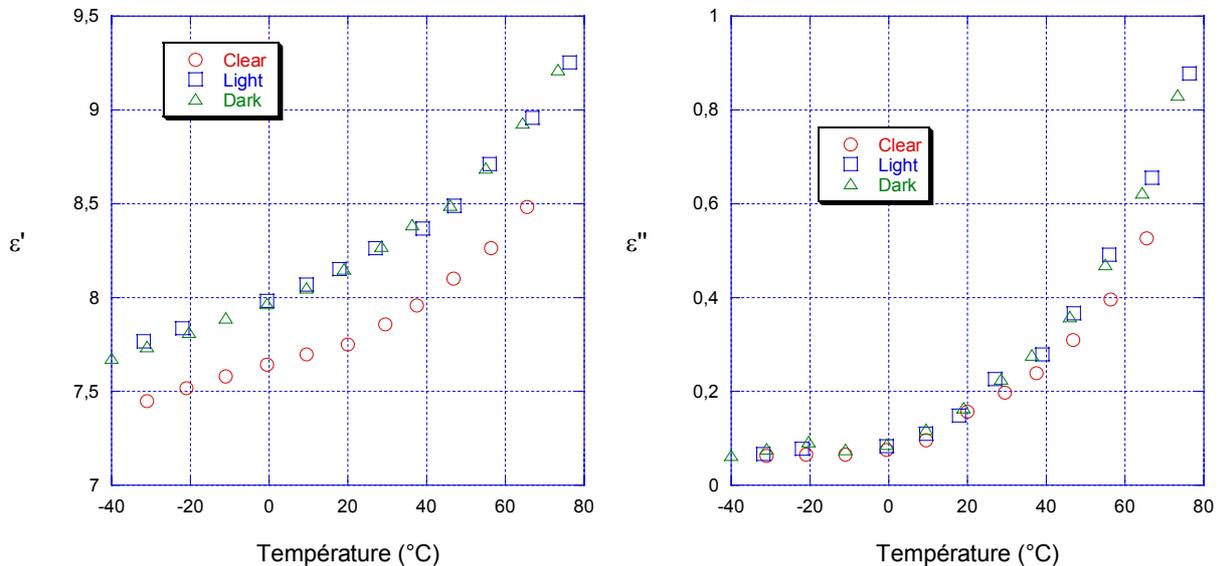


Figure II. 18 : variation de ε' et de ε'' des trois échantillons de verre en fonction de la température à 1kHz

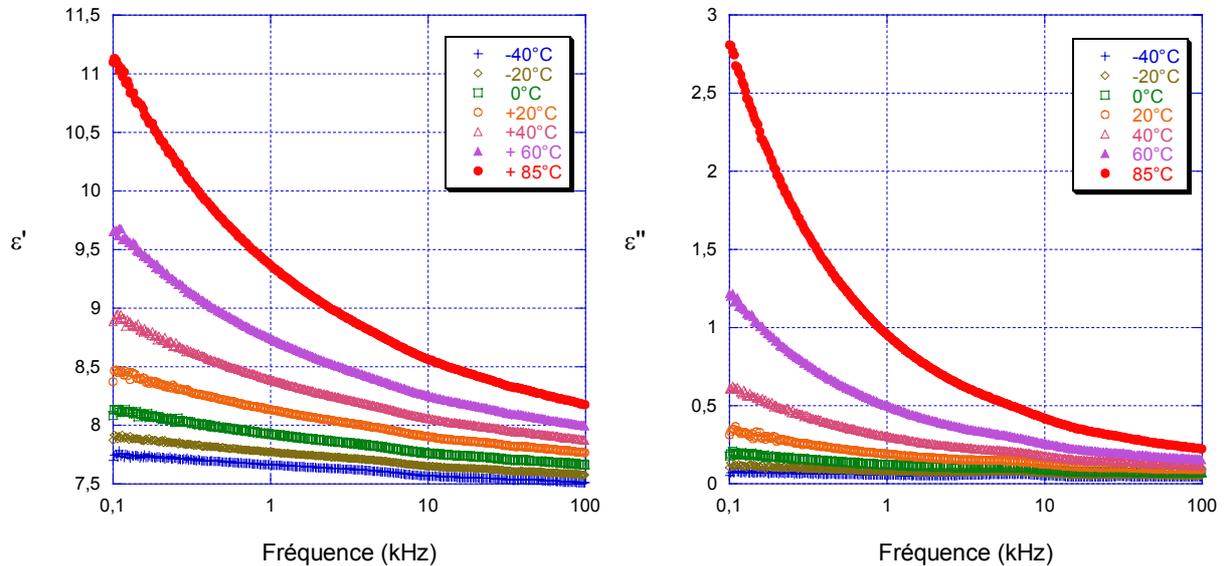
Quel que soit le verre considéré, **les parties réelle et imaginaire de la permittivité diélectrique augmentent avec la température**. Les verres *Dark* et *Light* présentent des permittivités similaires en température, supérieures à celle du verre *Clear*.

Les variations de ε' et de ε'' des verres diffèrent notablement des courbes théoriques du modèle de Debye représentées *Figure II.8*. Ce dernier n'explique qu'imparfaitement les phénomènes de polarisation dans les solides qui sont essentiellement dus, à basse fréquence, aux transferts de charges limités dans l'espace. Le verre est un mélange amorphe, constitué de plusieurs types de dipôles auxquels correspondent autant de temps de relaxation. Les spectres obtenus représentent la superposition des réponses de chacun des dipôles.

IV.3.b. Approche quantique des phénomènes diélectriques

Les trois échantillons de verre présentent des comportements similaires aussi bien en température qu'en fréquence. Dans ce qui suit, seul le verre *Light* est considéré.

Les évolutions de ε' et de ε'' du verre *Light* en fonction de la fréquence, entre 100Hz et 100kHz, sont présentées *Figure II.19* pour différentes températures comprises entre -40°C et $+85^{\circ}\text{C}$.



*Figure II.19 : variation de ε' et de ε'' du verre *Light* en fonction de la fréquence pour différentes températures*

Comme pour le PVB en dessous de la température de transition vitreuse, la polarisation dans les verres sodocalciques ($T_g \approx 540^{\circ}\text{C}$) est essentiellement induite par des transferts d'électrons d'un site à un autre. L'expression (61) permet donc a priori de représenter la dépendance de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' du verre à la température et à la fréquence. Cependant, d'après *Figure II.19*, à haute fréquence, ε' tend vers une valeur traduisant la permittivité induite par les processus de polarisation optique et/ou moléculaire ε_{∞} , indépendante de la température. A la différence du PVB, les phénomènes de polarisation optique et/ou moléculaire dans le verre *Light* apparaissent dès nos fréquences de travail. La loi (61) ne suffit donc pas à décrire correctement la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' du verre. Dans ce cas, le terme ε_{∞} doit être ajouté à la loi (61), conformément à l'expression (55), tel que :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = \varepsilon_{\infty} + A_{(T)}\omega^{n-1} \quad (67)$$

Sur la courbe relative aux pertes diélectriques ε'' , le pic visible aux alentours de 6kHz correspond à un artefact de mesures, et non à une relaxation dipolaire (le pic ne se déplace pas avec la température).

Les paramètres ε_∞ , $A(T)$ et n sont calculés numériquement dans l'intervalle de fréquence [100Hz à 100kHz] pour chaque température. L'évolution de $A(T)$ et n avec la température est présentée *Figure II.20*.

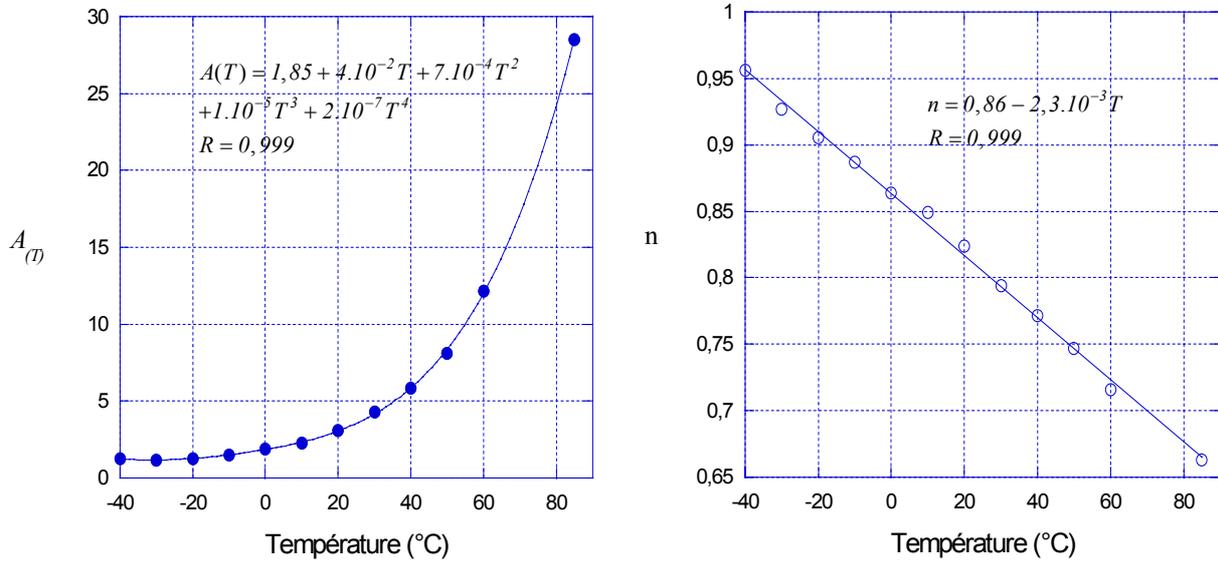


Figure II. 20 : variation de $A(T)$ et de n du verre Light avec la température

Pour représenter correctement l'évolution de $A(T)$ avec la température, un polynôme d'ordre 4 est nécessaire. L'exposant n , quant à lui, diminue linéairement avec la température.

La dépendance de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' du verre *Light* à la température et à la fréquence peut être modélisée par :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = \varepsilon_\infty + A(T)\omega^{n-1} \quad (68)$$

où $A(T) = 1,85 + 4.10^{-2}T + 7.10^{-4}T^2 + 1.10^{-5}T^3 + 2.10^{-7}T^4$

$$n = 0,86 - 2,3.10^{-3}T$$

$$\varepsilon_\infty = 7,4 + 8.10^{-3}T - 9.10^{-5}T^2 + 8.10^{-7}T^3$$

Remarque : Cette expression de ε_∞ n'a pas de réalité physique. En effet, la permittivité induite par les processus de polarisation optique et/ou moléculaire ε_∞ est normalement indépendante de la température. Cependant, le domaine de fréquence que nous considérons ne permet pas d'estimer correctement ε_∞ car d'autres phénomènes de polarisation, activés thermiquement, interviennent.

L'expression (68) permet de rendre compte des variations de ε' du verre *Light* sur tout l'intervalle de fréquence [100Hz à 100kHz] et de température [-40 à +80°C] étudié.

V. Conclusion

La connaissance des permittivités diélectriques des matériaux est indispensable à la phase de dimensionnement du capteur. Une banque de données, regroupant les permittivités diélectriques du PVB et de trois types de verre utilisés dans la confection des pare-brises, a donc été constituée expérimentalement, pour des fréquences comprises entre 100Hz et 100kHz, entre -40°C et +80°C. Globalement, **les permittivités diélectriques du verre et du PVB diminuent avec la fréquence et augmentent avec la température.**

Afin de modéliser leur variation respective, nous nous sommes basés sur des considérations théoriques. Le PVB et le verre sont des matériaux amorphes, ce qui implique que le modèle de Debye est insuffisant pour traduire leur comportement diélectrique. Aux basses fréquences auxquelles nous travaillons, la polarisation est principalement induite par des transferts de charges limité dans l'espace, qui dépendent de la température. En utilisant la modélisation en double puits de potentiel et en admettant une distribution de temps de relaxation, nous avons obtenu une loi exprimant la dépendance de ε' à la fréquence et à la température, telle que $\varepsilon'_{(\omega,T)} = A_{(T)}\omega^{n-1}$. Cependant, cette dépendance ne s'exprime pas simplement car la température intervient au travers de différents paramètres par l'intermédiaire de $A_{(T)}$ et de n . Ainsi que nous l'avons déjà mentionnés, même s'il existe une incertitude quant à la réalité physique de ces paramètres, ces derniers permettent néanmoins de rendre compte du comportement de la permittivité ε' du PVB et des verres de pare-brise, dans les gammes de fréquence et de température concernées par l'application du capteur.

Grâce à cette étude, il est possible de :

- choisir une fréquence de fonctionnement pour le capteur et procéder à son dimensionnement par simulation numérique. Ce point fait l'objet du chapitre suivant.
- prévoir l'influence des fluctuations de température [-40 à +80°C] sur les capacités pour des fréquences comprises entre 100Hz et 100kHz par l'utilisation, dans les programmes de simulation, des expressions semi-empiriques traduisant le comportement expérimental de ε' du verre et du PVB. Ce point fera l'objet du dernier chapitre.

Bibliographie

- [And66] J.C. Anderson, *Diélectriques*, Monographie Dunod, 1966
- [Coe93] R. Coelho, B. Aladenize, *Les diélectriques : propriétés diélectriques des matériaux isolants*, Traité des Nouvelles Technologies série Matériaux, Editions Hermes, 1993
- [Deb29] P. Debye, *Polar molecules : the chemical catalog*, New York, 1929
- [Dha02] A. K. Dhaliwal, J. N. Hay, *The characterization of polyvinyl butyral by thermal analysis*, *Thermochimica Acta* 391 (2002) 245-255
- [EIS01] M. A. El-Sherbiny, N. Saieh, A. El-Rehim, *Spectroscopic and dielectric behaviour of pure and nickel-doped polyvinyl butyral films*, *Polymer Testing* 20 (2001) 371-378
- [Jon73] A. K. Jonscher, *The role of contacts in frequency-dependant conduction in disordered solids*, *Journal of Physics and Chemistry : Solid State Physic* 6 (1973) L235
- [Jon75] A. K. Jonscher, *New interpretation of dielectric loss peaks*, *Nature* 256 (1975) 566-568
- [Jon77] A. K. Jonscher, *The universal dielectric response*, *Nature* 267 (1977) 673-679
- [Pol61] M. Pollack, T. H. Geballe, *Low-frequency conductivity due to hopping processes in silicon*, *Physical Review* 122 (1961) 1742-1753
- [Psa03] PSA, *Communication privée*, 2003

- [Rig96] B. Rigaud, J. P. Morucci, N. Chauveau, *Bioelectrical impedance techniques in medicine*, Part I: Bioimpedance measurement, Second section: Impedance spectroscopy, *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, Vol 24 (4-6) (1996) 257-351
- [Saa95] G.R. Saad, E. El-Shafe, M.W. Sabaa, *Dielectric and mechanical properties in the photodegradation of poly(vinyl butyral) films*, *Polymer Degradation and Stability* 47 (1995) 209-215
- [Tre02] B. Trégon, *Evaluation et caractérisation d'une technologie d'assemblage MCM-L pour environnement haute pression forte température (120 MPa, 175°C)*, Thèse de Doctorat soutenue le 25 octobre 2002, Université Bordeaux 1, France

CHAPITRE III

Dimensionnement des capteurs par simulation numérique et fabrication

I. Introduction.....	81
II. Règles de dimensionnement des capteurs capacitifs	82
II.1. Relation entre les écartements séparant les électrodes	83
II.2. Relations entre les écartements séparant les électrodes et l'épaisseur du verre	83
II.3. Relation entre la largeur des électrodes et l'épaisseur du PVB	84
II.4. Relation entre la largeur des électrodes et la largeur de la couche athermique	84
II.5. Relations entre les écartements entre électrodes et la longueur des électrodes.....	84
III. Estimation des capacités par la méthode des capacités partielles	86
III.1. Condensateurs coplanaires bicouches	86
III.2. Condensateurs coplanaires multicouches.....	88
III.3. Limitations des modèles analytiques.....	94
IV. Calcul des capacités par la méthode des éléments finis.....	94
IV.1. Principe de la méthode	94
IV.2. Méthode de programmation	96
V. Dimensionnement du capteur par simulation numérique.....	98
V.1. Simulations numériques en 2D.....	98
V.1.a. Choix de la fréquence de fonctionnement du capteur	99
V.1.b. Initialisation des valeurs	100
V.1.c. Optimisation des paramètres dimensionnels	102
V.2. Simulations numériques en 3D.....	105
V.2.a. Configurations du capteur	105
V.2.b. Dimensionnement des capteurs en condition sèche	108
VI. Fabrication des capteurs simplifiés	113
VI.1. Dépôts des électrodes par sérigraphie : technologie couche épaisse	115
VI.1.a. Choix de l'encre	115
VI.1.b. Sérigraphie	116

VI.1.c. Traitement thermique	120
VI.1.d. Caractérisation	120
VI.2. Dépôts des électrodes par évaporation thermique sous vide : technologie couche mince	122
VI.2.a. Méthode directe	123
VI.2.b. Méthode indirecte (résine photosensible positive).....	125
VII. Conclusion	126
Bibliographie	128

I. Introduction

A l'issue de l'étude bibliographique, un capteur de type capacitif différentiel est sélectionné pour la détection de pluie sur un pare-brise. Outre la validité théorique du concept, cette analyse a montré l'intérêt de lancer une phase d'approfondissement dans le but d'identifier les paramètres sensibles influant sur le fonctionnement du capteur. En particulier, le dimensionnement de l'élément sensible conduisant à l'égalité des capacités C_1 et C_2 à sec et à un déséquilibre optimal en présence d'eau sur la surface du pare-brise doit être déterminé. Pour des raisons évidentes de coût de revient et de temps, il est exclu de fabriquer au hasard des capteurs sans avoir déterminé au préalable leur configuration géométrique. C'est pourquoi, afin de réduire le champ des investigations expérimentales, une étude par simulation numérique est nécessaire. La phase de dimensionnement du capteur se décompose en deux étapes. Une étude numérique préalable en 2D permet d'identifier les paramètres sensibles influant sur le fonctionnement du capteur et d'en faire une première estimation. Cette étude fournit les bases du calcul numérique en 3D, conduisant au dimensionnement complet du capteur. Deux configurations d'électrodes sont étudiées : électrodes linéaires et électrodes interdigitées.

Dans sa configuration complète, le capteur, intégré au pare-brise, se compose de trois électrodes coplanaires, déposées sur la face interne du feuillet de verre extérieur. Ces électrodes délimitent les deux capacités sensibles permettant la détection de l'eau. Sur la face interne du feuillet de PVB, se trouve l'électrode de garde assurant à la fois le blindage électromagnétique et la directionnalité de la détection. Au laboratoire, il nous est difficile de fabriquer le capteur complet car nous ne disposons pas des moyens d'assemblage verre/PVB/verre. De ce fait, nous ne pouvons pas valider expérimentalement les résultats de simulations relatifs au capteur complet. Afin de contourner ce problème de fabrication, nous considérons un capteur simplifié, composé uniquement de la zone sensible du capteur, c'est-à-dire du substrat de verre sur lequel sont déposées les trois électrodes, ainsi que la couche athermique. Le capteur simplifié, dimensionné par simulation numérique, est alors fabriqué selon différentes méthodes de dépôt :

- en couches épaisses par sérigraphie,
- et en couches minces par évaporation thermique sous vide.

Les mesures de capacité que nous effectuerons avec le capteur simplifié seront ensuite comparées aux résultats de simulations numériques. Nous postulons que si les résultats concordent, il en ira de même pour le capteur complet, ce qui permettra de valider l'ensemble des simulations.

II. Règles de dimensionnement des capteurs capacitifs

Avant d'initier la phase de dimensionnement du capteur par simulation numérique, une étude bibliographique préalable permet de dégager un certain nombre de règles de dimensionnement pour les capteurs capacitifs. Dans la littérature, il a été montré que le fonctionnement optimal d'un capteur capacitif à champ dispersif impliquait le respect de certaines relations entre paramètres dimensionnels. L'utilisation de ces règles permet de raccourcir la phase de simulation en partant sur des bases éprouvées.

La *Figure III.1* représente la vue en coupe du capteur intégré à la couche athermique du pare-brise. Le second feuillet de verre du pare-brise, qui se trouve sous l'électrode de garde E_4 , n'est pas représenté et ne sera pas modélisé lors des simulations numériques, car l'électrode de garde assure un blindage électromagnétique permettant d'écranter le système de toute influence intérieure. Ce point a été vérifié numériquement.

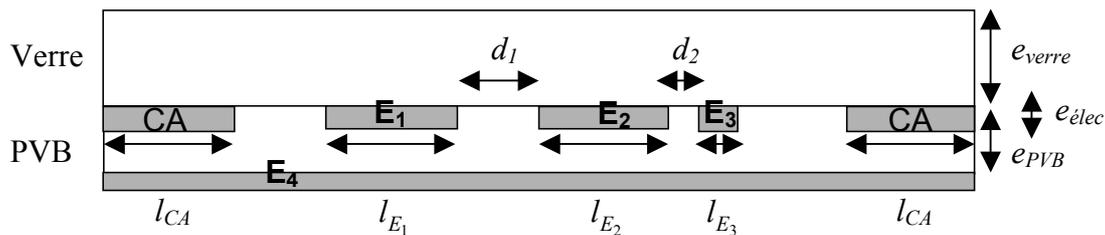


Figure III. 1 : vue en coupe du capteur intégré à la couche athermique du pare-brise

Nous adoptons les notations suivantes pour définir les différents éléments du capteur :

- E_1, E_2 et E_3 : les trois électrodes coplanaires,
- E_4 : l'électrode de garde,
- CA : la couche athermique.

Les paramètres dimensionnels utilisés sont notés :

- l_{E_1} , l_{E_2} et l_{E_3} : les largeurs respectives des électrodes E_1 , E_2 et E_3 ,
- l_{CA} : la largeur de la couche athermique,
- d_1 : la distance séparant les électrodes E_1 et E_2 ,
- d_2 : la distance séparant les électrodes E_2 et E_3 ,
- e_{verre} : l'épaisseur du verre,
- e_{PVB} : l'épaisseur du PVB,
- e_{elec} : l'épaisseur des électrodes.

Nous rappelons que la capacité sensible, notée C_1 , est délimitée par les électrodes E_1 et E_2 et la capacité de référence, C_2 , par les électrodes E_2 et E_3 .

En premier lieu, nous choisissons de prendre les électrodes E_1 et E_2 identiques.

II.1. Relation entre les écartements séparant les électrodes

La profondeur de pénétration des lignes de champ entre les électrodes est liée à la distance les séparant. Plus l'écartement est grand, plus les lignes de champs sont susceptibles de sortir du verre et d'être influencées par l'eau [Zar88]. Les électrodes E_1 et E_2 doivent donc être suffisamment éloignées de manière à rendre la capacité C_1 sensible à la présence d'eau. Au contraire, les électrodes E_2 et E_3 doivent être très proches afin que les lignes de champs restent confinées dans le verre et que C_2 ne soit pas influencée par l'eau. Il faut donc que : $d_1 > d_2$.

II.2. Relations entre les écartements séparant les électrodes et l'épaisseur du verre

Pour les raisons précédentes, il est préférable de choisir $\frac{d_1}{e_{verre}} > 1$. Dans ces conditions, la dispersion des lignes de champ s'accroît et celles-ci sortent alors plus largement du verre.

Par opposition, $\frac{d_2}{e_{\text{verre}}} < 1$, de manière à ce que les lignes de champ restent confinées dans la couche de verre.

II.3. Relation entre la largeur des électrodes et l'épaisseur du PVB

Selon la référence [Wal93], la sensibilité du capteur est grandement améliorée lorsque la largeur des électrodes E_1 et E_2 , délimitant la capacité sensible, est grande par rapport à l'épaisseur du PVB : $l_{E_1} = l_{E_2} \gg e_{PVB}$.

II.4. Relation entre la largeur des électrodes et la largeur de la couche athermique

Toujours d'après la référence [Wal93], le rapport Signal/Bruit du capteur est amélioré lorsque la couche athermique entourant le capteur présente une largeur très supérieure à celle des électrodes : $\frac{l_{CA}}{l_{E_1}} = \frac{l_{CA}}{l_{E_2}} \gg 1$.

II.5. Relations entre les écartements entre électrodes et la longueur des électrodes

La *Figure III.2* représente une vue en coupe des électrodes coplanaires du capteur en 3D.

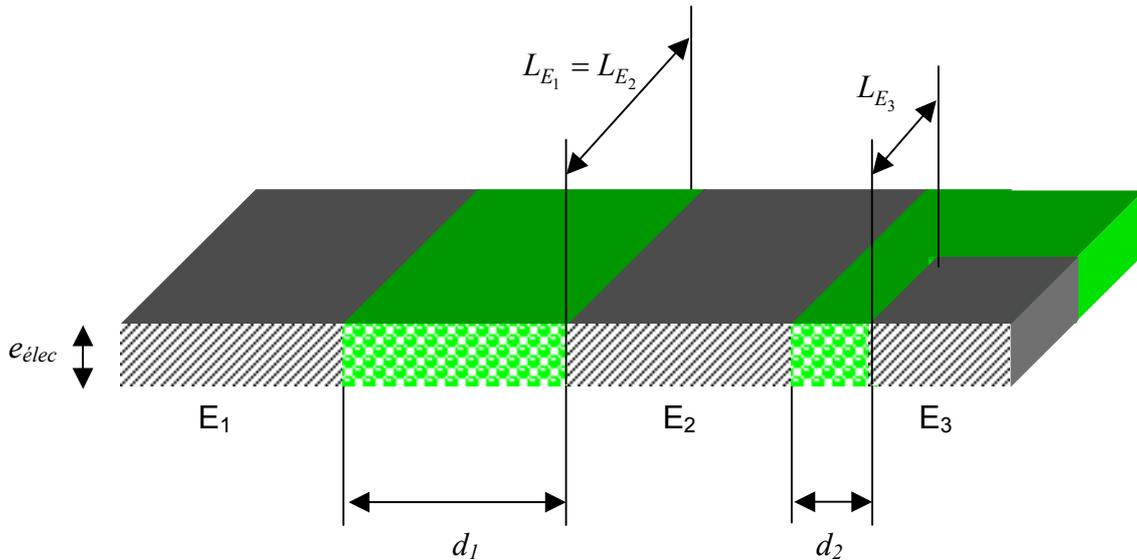


Figure III. 2 : vue en coupe des électrodes coplanaires en 3D

Selon le modèle du condensateur plan, que nous utilisons en première approximation, deux condensateurs réalisés à partir d'un même diélectrique, présentent la même capacité, s'ils présentent le même rapport $\frac{S}{d}$, S étant la surface des électrodes et d leur écartement. Pour obtenir l'égalité des capacités à sec, la surface des électrodes $S = e.L$, où e représente l'épaisseur des électrodes et L leur longueur, doit être dans le même rapport que leur écartement : $\frac{L_{E_1}}{d_1} = \frac{L_{E_2}}{d_1} = \frac{L_{E_3}}{d_2}$. L'épaisseur des électrodes étant identiques en raison du mode de fabrication, les longueurs des électrodes doivent être ajustées.

L'ensemble de ces relations va permettre de faire une première estimation des paramètres dimensionnels du capteur, conduisant à l'égalité des capacités C_1 et C_2 à sec. Pour cela, divers modèles analytiques ont été développés.

III. Estimation des capacités par la méthode des capacités partielles

Dans la littérature, différents modèles ont été proposés dans le but d'évaluer les capacités dans les systèmes coplanaires. Les plus courants reposent sur la méthode des capacités partielles qui utilisent les transformations conformes [Bro96]. Ces transformations mathématiques analytiques permettent de calculer, à partir de la formule connue du condensateur plan, les capacités dans les systèmes coplanaires à l'aide d'un rapport d'intégrales elliptiques $K(k)$, tel que :

$$C = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon' \frac{K(k')}{K(k)} \quad (1)$$

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

$$\text{et } K(k) = \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 k^4 + \left(\frac{1.3.5}{2.4.6}\right)^2 k^6 + \dots \right] \quad (3)$$

Dans la relation (1), ε_0 représente la constante diélectrique du vide, ε' la partie réelle de la permittivité diélectrique, $K(k)$ est l'intégrale elliptique totale du premier ordre et k son module.

III.1. Condensateurs coplanaires bicouches

En 1991, H.E. Endres propose un modèle permettant d'estimer la capacité d'un condensateur coplanaire compris entre un substrat diélectrique et de l'air [End91]. En remplaçant la permittivité de l'air par celle du diélectrique de substitution comme dans la référence [Ong00], ce modèle permet de faire une approximation des capacités du capteur en condition sèche. Dans notre configuration, représentée *Figure III.3*, la capacité entre deux électrodes se décompose en trois capacités partielles C_{verre} , $C_{\text{PVB inter-élec}}$ et C_{PVB} connectées en parallèle.

La capacité totale C est alors égale à la somme des trois capacités partielles :

$$C = C_{\text{verre}} + C_{\text{PVB inter-élec}} + C_{\text{PVB}} \quad (4)$$

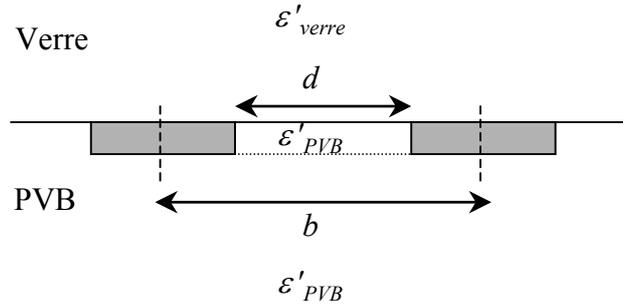


Figure III. 3 : vue en coupe d'un condensateur coplanaire bicouches selon le modèle de Endres

Les capacités partielles linéiques C_{verre} et C_{PVB} sont calculées à l'aide de la méthode des transformations conformes :

$$C_{verre} + C_{PVB} = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon'_{verre} + \varepsilon'_{PVB}}{2} \frac{K \left[\sqrt{1 - \left(\frac{d}{b}\right)^2} \right]}{K \left(\frac{d}{b}\right)} \quad (5)$$

où d représente la distance inter-électrodes et b la distance séparant le milieu des électrodes.

La capacité partielle linéique $C_{PVB \text{ inter-élec}}$ est calculée à l'aide de l'approximation du condensateur plan :

$$C_{PVB \text{ inter-élec}} = \varepsilon_0 \varepsilon'_{PVB} \frac{e_{élec}}{d} \quad (6)$$

où $e_{élec}$ représente l'épaisseur des électrodes.

Dans les formules (5) et (6), les capacités partielles C_{verre} , C_{PVB} et $C_{PVB \text{ inter-élec}}$ sont calculées par unité de longueur ($F.m^{-1}$). Chacune des capacités linéiques doit ensuite être multipliée par la longueur L des électrodes pour obtenir la capacité 3D.

Bien que ce modèle ait été initialement conçu pour des électrodes non recouvertes (face supérieure des électrodes en contact direct avec l'air), il permet, en remplaçant la permittivité diélectrique de l'air par celle du PVB, de faire une approximation des capacités en condition sèche. Néanmoins, ce modèle est insuffisant pour calculer les capacités en présence d'eau (impossibilité de considérer plusieurs couches superposées).

III.2. Condensateurs coplanaires multicouches

Dans le modèle précédent, les épaisseurs du verre et du PVB ne sont pas prises en compte. Or, dans le cas de la capacité C_I , les lignes de champ qui sortent du verre sont significativement influencées par l'air et/ou l'eau qui se trouve au-dessus du feuillet de verre, comme le représente la *Figure III.4*.

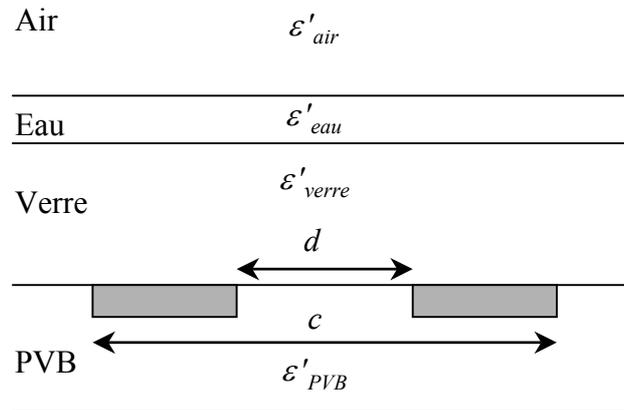


Figure III. 4 : vue en coupe d'un condensateur coplanaire multicouches

Afin de tenir compte de la superposition des différents diélectriques, O.G. Vendik propose un modèle qui repose également sur la méthode des capacités partielles [Ven99]. Il définit des permittivités diélectriques partielles ε^* , qui prennent en compte l'influence mutuelle des différentes couches de diélectriques sur la distribution des lignes de champ dans chacune d'elles. Cependant, ce modèle, comme le précédent, suppose que les électrodes sont en contact direct avec l'air. En remplaçant l'air par une couche de PVB, la capacité totale se décompose en deux (condition sèche) ou trois capacités (en présence d'un film d'eau) connectées en parallèle, comme le représente la *Figure III.5*. Dans ce modèle, la capacité liée à l'épaisseur des électrodes est négligée.

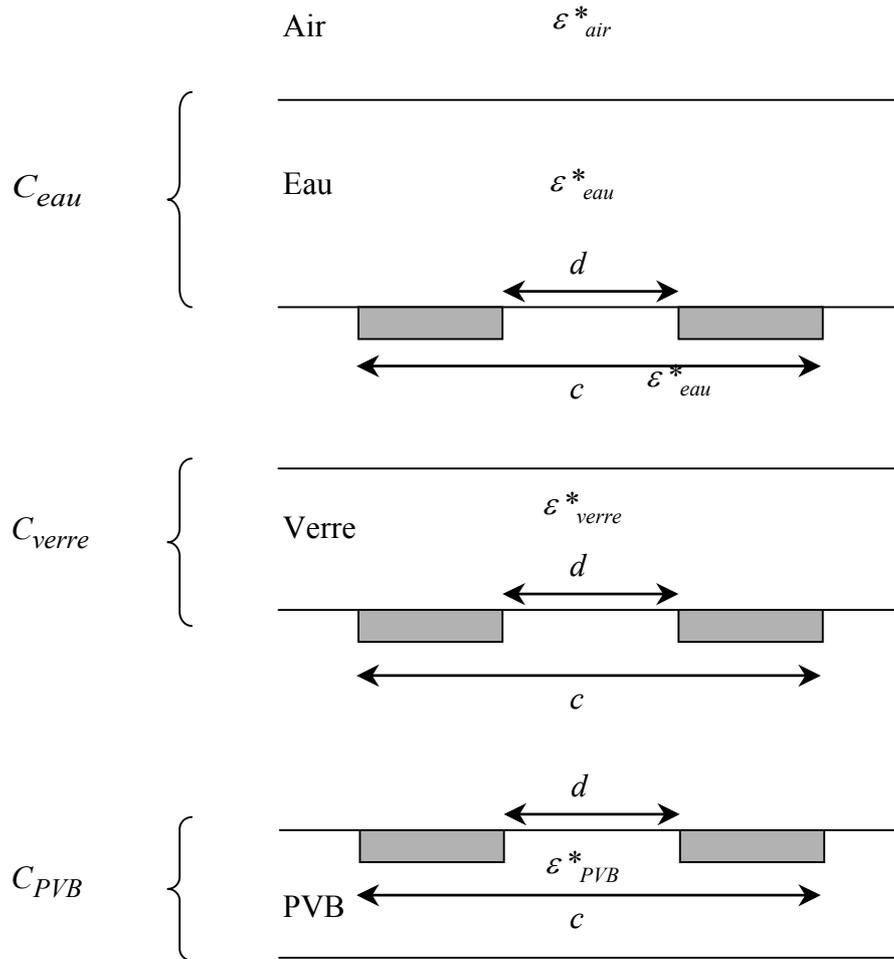


Figure III. 5 : représentation des capacités partielles C_{PVB} , C_{verre} et C_{eau} selon le modèle de Vendik

En condition sèche (sans film d'eau), les permittivités diélectriques partielles ε^* sont définies par :

$$\varepsilon^*_{verre} = \varepsilon_{verre} - \varepsilon'_{air} \quad (7)$$

$$\varepsilon^*_{PVB} = \varepsilon'_{PVB} \quad (8)$$

car l'électrode de garde, qui se trouve sous le feuillet de PVB, l'écrante de toutes influences extérieures.

La capacité totale s'écrit alors :

$$C = C_{verre} + C_{PVB} \quad (9)$$

Les capacités partielles C_{verre} et C_{PVB} sont calculées à l'aide la méthode des transformations conformes :

$$C_{verre\ ou\ PVB} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon^*_{verre\ ou\ PVB} \frac{K(k'_{verre\ ou\ PVB})}{K(k_{verre\ ou\ PVB})} \quad (10)$$

$$\text{avec } \frac{K(k'_{verre\ ou\ PVB})}{K(k_{verre\ ou\ PVB})} = \pi \left[\ln \left(2 \frac{1+k_{verre\ ou\ PVB}^{0,5}}{1-k_{verre\ ou\ PVB}^{0,5}} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

$$\text{et } k_{verre\ ou\ PVB} = \frac{\tanh\left(\frac{\pi d}{4.e_{verre\ ou\ PVB}}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi c}{4.e_{verre\ ou\ PVB}}\right)} \quad (12)$$

En présence d'un film d'eau, la capacité totale devient :

$$C = C_{verre} + C_{PVB} + C_{eau} \quad (13)$$

Les permittivités diélectriques partielles ε^* sont maintenant définies par :

$$\varepsilon^*_{eau} = \varepsilon'_{eau} - \varepsilon'_{air} \quad (14)$$

$$\varepsilon^*_{verre} = \varepsilon'_{verre} - \varepsilon'_{eau} \quad (15)$$

$$\varepsilon^*_{PVB} = \varepsilon'_{PVB} \quad (8)$$

Dans ce cas (présence d'un film d'eau), la relation (15) conduit à une permittivité diélectrique partielle négative et donc à une capacité partielle négative pour le feuillet de verre. En effet, Vendik a conçu ce modèle pour des électrodes coplanaires recouvertes d'une fine couche ferroélectrique de permittivité diélectrique bien plus élevée que celle du feuillet de verre présent dans notre configuration. Dans la référence [Ven99], il est précisé que ce modèle n'est

applicable que si l'inégalité $d \leq 10.e_{ferro\ ou\ verre}$ est vérifiée pour $\frac{\varepsilon'_{ferro\ ou\ verre}}{\varepsilon'_{air}} > 10^2$ en

condition sèche ou $\frac{\varepsilon'_{ferro\ ou\ verre}}{\varepsilon'_{eau}} > 10^2$ en présence d'un film d'eau, ce qui n'est pas le cas

avec nos matériaux.

En 2004, R. Igraja propose un modèle général, applicable à n'importe quelle structure multicouches d'électrodes coplanaires interdigitées, dont un exemple est donné *Figure III.6* [Igr04]. Ce modèle reprend les mêmes bases que le modèle précédent (méthode des capacités et des permittivités diélectriques partielles).

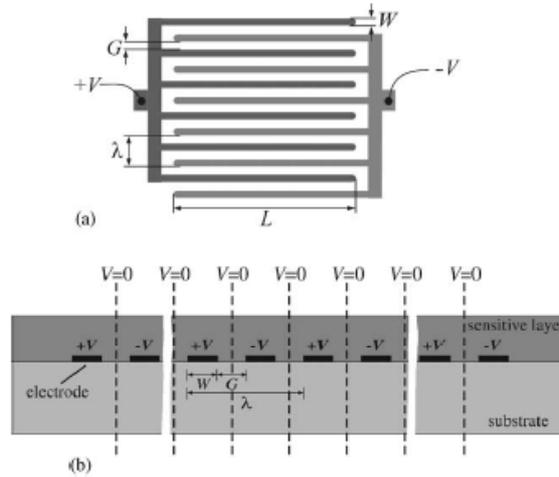


Figure III. 6 : (a) motif représentant deux électrodes interdigitées et (b) vue en coupe du réseau d'électrodes interdigitées et distribution des potentiels électriques selon [Igr04]

Chaque électrode est connectée à un potentiel fixe (+V et -V). Comme le représente la *Figure III.7*, deux types de capacité sont alors définies en fonction de leur localisation dans le réseau interdigité :

- la capacité C_I entre une électrode « interne » au réseau et le potentiel nul,
- la capacité C_E entre une électrode « externe » au réseau et le potentiel nul.

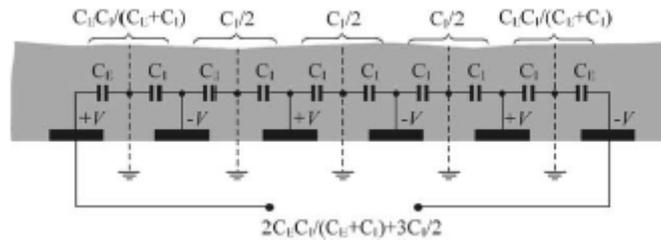


Figure III. 7 : exemple du circuit équivalent à une structure multicouches d'électrodes interdigitées à six électrodes selon [Igr04]

La capacité totale de la structure interdigitée s'écrit :

$$C = (N - 3) \frac{C_I}{2} + 2 \frac{C_I C_E}{C_I + C_E} \text{ avec } N > 3 \quad (16)$$

où N représente le nombre total d'électrodes.

Dans notre cas, en condition sèche, les capacités C_I et C_E , calculées à l'aide de la méthode des capacités partielles, s'écrivent :

$$C_I = C_{I,air} + C_{I,verre} + C_{I,PVB}$$

$$C_I = \varepsilon_0 L \left[\frac{K(k_{I\infty})}{K(k'_{I\infty})} + (\varepsilon'_{verre} - 1) \frac{K(k_{I,verre})}{K(k'_{I,verre})} + \varepsilon'_{PVB} \frac{K(k_{I,PVB})}{K(k'_{I,PVB})} \right] \quad (17)$$

et

$$C_E = C_{E,air} + C_{E,verre} + C_{E,PVB}$$

$$C_E = \varepsilon_0 L \left[\frac{K(k_{E\infty})}{K(k'_{E\infty})} + (\varepsilon'_{verre} - 1) \frac{K(k_{E,verre})}{K(k'_{E,verre})} + \varepsilon'_{PVB} \frac{K(k_{E,PVB})}{K(k'_{E,PVB})} \right] \quad (18)$$

Les capacités partielles liées au verre, $C_{I,verre}$ et $C_{E,verre}$, tiennent compte de l'influence de la couche d'air infinie par le biais de la permittivité diélectrique partielle du verre (relation (7) avec $\varepsilon'_{air} = 1$). Pour traduire la présence de l'électrode de garde, les capacités partielles liées au feuillet de PVB, $C_{I,PVB}$ et $C_{E,PVB}$, ne dépendent que de la permittivité diélectrique ε'_{PVB} du PVB (relation (8)).

D'après la *Figure III.7*, dans le cas d'un système constitué uniquement de deux électrodes linéaires, la capacité est assimilable à une capacité unitaire entre deux électrodes « externes » telle que :

$$C = \frac{C_E}{2} \quad (19)$$

Les équations détaillées, indispensables aux calculs des capacités partielles, sont fournies dans le *Tableau III.1*.

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

 Tableau III. 1 : équations utilisées pour le calcul des capacités C_I et C_E selon [Igr04]

Le rapport de métallisation η , utilisé dans certaines équations, est défini par :

$$\eta = \frac{W}{W + G} = \frac{2W}{\lambda} \quad (20)$$

où G représente la distance inter-électrode, W la largeur des électrodes et λ la longueur d'onde spatiale du réseau périodique (Figure III.6).

En présence d'un film d'eau, les capacités C_I et C_E deviennent :

$$C_I = C_{I,air} + C_{I,eau} + C_{I,verre} + C_{I,PVB}$$

$$C_I = \varepsilon_0 L \left[\frac{K(k_{I\infty})}{K(k'_{I\infty})} + (\varepsilon'_{eau} - 1) \frac{K(k_{I,eau})}{K(k'_{I,eau})} + (\varepsilon'_{verre} - \varepsilon'_{eau}) \frac{K(k_{I,verre})}{K(k'_{I,verre})} + \varepsilon'_{PVB} \frac{K(k_{I,PVB})}{K(k'_{I,PVB})} \right] \quad (21)$$

et

$$C_E = C_{E,air} + C_{E,eau} + C_{E,verre} + C_{E,PVB}$$

$$C_E = \varepsilon_0 L \left[\frac{K(k_{E\infty})}{K(k'_{E\infty})} + (\varepsilon'_{eau} - 1) \frac{K(k_{E,eau})}{K(k'_{E,eau})} + (\varepsilon'_{verre} - \varepsilon'_{eau}) \frac{K(k_{E,verre})}{K(k'_{E,verre})} + \varepsilon'_{PVB} \frac{K(k_{E,PVB})}{K(k'_{E,PVB})} \right] \quad (22)$$

Comme pour le modèle de Vendik, les capacités partielles $C_{I,verre}$ et $C_{E,verre}$ sont négatives en raison de la forte permittivité diélectrique de l'eau, ce qui n'a pas de réalité physique.

III.3. Limitations des modèles analytiques

Avec de petites modifications, les modèles de Endres (remplacement de l'air par du PVB) et de Igreja (calcul de la capacité unitaire entre deux électrodes linéaires) permettent d'estimer la valeur des capacités en condition sèche. Les résultats sont donnés dans le *Tableau III.8* (cf. p111) pour faciliter la comparaison avec les résultats numériques. Le modèle de Vendik ne peut quant à lui être appliqué à notre configuration, en raison de son application trop spécifique (couche ferroélectrique).

Si les modèles de Endres et de Igreja permettent d'évaluer facilement la capacité C_1 entre les deux électrodes E_1 et E_2 identiques, la capacité C_2 est plus difficile à calculer. Cette dernière est délimitée par les électrodes E_2 et E_3 , de longueurs et de largeurs différentes. La difficulté consiste à déterminer les longueurs et largeurs efficaces qu'il est nécessaire de considérer lors des calculs de capacité.

Un autre problème concerne l'électrode de garde, reliée à la masse, dont nous ne connaissons pas l'influence sur les capacités et qu'il est difficile de prendre en compte avec les modèles analytiques. De plus, aucun de ces modèles ne permet d'évaluer les capacités en présence d'un film d'eau, et encore moins de gouttes de pluie.

Pour toutes ces raisons, nous choisissons de dimensionner le capteur par une méthode numérique : la méthode des éléments finis. Cette méthode offre une plus grande souplesse vis à vis des modifications des paramètres dimensionnels et permettra d'étudier l'influence de l'eau sous diverses formes (film uniforme et gouttes d'eau de volumes variables) sur le capteur.

IV. Calcul des capacités par la méthode des éléments finis

IV.1. Principe de la méthode

L'étude numérique est réalisée à l'aide du logiciel ANSYS 7.0 qui permet de résoudre les problèmes d'électrostatique gouvernés par les équations aux dérivées partielles. Le principe du calcul repose sur la méthode des éléments finis (FEM) qui résout l'équation de Poisson par

linéarisation des équations différentielles sur de petits domaines, en tenant compte des conditions imposées aux limites. Il s'agit d'une technique particulière d'approximation des fonctions solutions par sous-domaines où les inconnues sont des valeurs de ces fonctions solutions en certains points ou nœuds de chaque sous-domaine.

La zone à analyser doit être subdivisée en éléments finis, ou sous-domaines, comme le montre la *Figure III.8*.

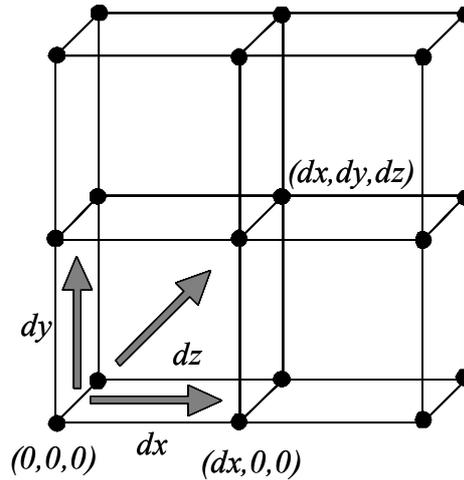


Figure III. 8 : représentation des nœuds des sous-domaines

Le potentiel sur le premier nœud étant connu grâce aux conditions aux limites, le logiciel calcule les potentiels sur les nœuds suivants à l'aide de la loi de Poisson :

$$\Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} = 0 \quad (23)$$

où ρ = la densité volumique de charges,

ϵ_0 = la permittivité du vide,

ϵ_r = la permittivité relative du milieu,

ΔV = le Laplacien de V .

Le Laplacien de V s'écrit en fonction des coordonnées d'espace (x, y, z) :

$$\Delta V = \frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} \quad (24)$$

où dx , dy et dz représentent les déplacements des coordonnées d'espace.

Dans chaque élément, V_x , V_y et V_z constituent les inconnues du problème.

IV.2. Méthode de programmation

Le logiciel ANSYS offre deux modes d'utilisation possibles. La première solution consiste en l'écriture d'un programme constitué de commandes textuelles dans une fenêtre d'éditeur de texte. La seconde possibilité est l'utilisation directe des menus disponibles dans l'interface graphique. Bien que la seconde alternative soit plus conviviale et simple d'utilisation, la programmation textuelle offre une plus grande souplesse vis à vis des modifications des paramètres dimensionnels. Nous optons donc pour cette dernière solution.

Les différentes étapes de la programmation sous ANSYS, pour un problème purement électrostatique, sont les suivantes :

- déclaration des différents matériaux (verre, PVB, air, eau, métal) et attribution des valeurs de permittivité diélectrique ε' déterminées expérimentalement au chapitre précédent,
- choix des éléments de maillage¹,
- définition des paramètres dimensionnels du capteur et attribution des valeurs numériques,
- fabrication de la géométrie du capteur,
- fabrication des sous-domaines nécessaires au maillage,
- déclaration des surfaces (2D) ou des volumes (3D) et attribution d'un matériau (ε') et d'un élément de maillage,
- définition des conditions aux limites et attribution des potentiels²,
- élaboration d'un maillage adapté,
- calcul des potentiels et de l'énergie électrostatique,
- calcul des capacités³,
- affichage numérique (valeurs des capacités) et graphique (cartographie des potentiels et de l'énergie électrostatique) des résultats.

¹ Le choix des éléments de maillage s'opère parmi les éléments dédiés à l'électrostatique, en accord avec la géométrie du volume à mailler. Chaque élément sélectionné comporte un seul degré de liberté par nœud, le potentiel. Pour les simulations en 2D, un élément quadrilatéral composé de huit nœuds (*plane121*) est systématiquement utilisé. Pour les simulations en 3D, la gamme de choix de l'élément de maillage est plus variée. Un élément parallélépipédique comprenant vingt nœuds (*solid122*) et un élément tétraédrique de dix nœuds (*solid123*) sont classiquement utilisés (éléments « h »). Cependant, un second jeu d'éléments (éléments « p ») dont la géométrie et le nombre de nœuds sont similaires aux précédents (respectivement

solid128 et *solid127*) sont également disponibles. Ces éléments utilisent un ordre polynomial supérieur lors de l'approximation des fonctions solutions, ce qui nécessite des temps de calcul plus longs. Bien que les résultats soient plus précis, le peu de différence observée entre les solutions obtenues avec les deux jeux d'éléments ne justifie pas l'utilisation des éléments « p ».

De façon générale, les éléments tétraédriques permettent un maillage plus facile mais conduisant à des résultats moins précis, parfois erronés. Outre le fait qu'ils contiennent moins de noeuds, ils supportent difficilement les déformations. Il est donc préférable, tant que la géométrie le permet, de mailler avec l'élément *solid122* et de compléter avec le *solid123*.

² L'environnement électrostatique du capteur (potentiel nul à l'infini) est modélisé par des éléments infinis (*infin110*) pour les simulations en 2D et par un domaine de Trefftz en 3D [ANS], auxquels nous attribuons le matériau air. La méthode de Trefftz est la version améliorée, du point de vue efficacité et simplicité d'utilisation, de la méthode des éléments infinis pour les études numériques tridimensionnelles.

³ Le logiciel ANSYS offre la possibilité d'obtenir les valeurs des capacités de deux façons distinctes :

- en écrivant textuellement les formules adaptées dans le programme de simulation (le logiciel calcule l'énergie électrostatique W à partir de laquelle la capacité C peut être déduite : $C = \frac{2W}{V^2}$),
- en utilisant la commande «CMATRIX» qui effectue directement le calcul. «CMATRIX» est une macro de ANSYS, conçue pour résoudre les problèmes les plus complexes d'électrostatique, mettant en jeu plusieurs conducteurs et/ou diélectriques. Cette commande permet de calculer l'ensemble des capacités mutuelles d'une structure (fabrication d'une matrice).

Nous choisissons cette seconde option car l'utilisation de la commande «CMATRIX» permet de s'affranchir de l'estimation de la zone de diélectrique sous l'influence du champ électrostatique (indispensable au calcul des capacités à partir de l'énergie électrostatique) ainsi que des coefficients d'influence existant entre les différents conducteurs.

V. Dimensionnement du capteur par simulation numérique

L'étude par simulation numérique a pour but de déterminer la configuration géométrique optimale du capteur conduisant à :

- l'égalité des capacités à sec : $C_1 = C_2$,
- une augmentation de la capacité sensible C_1 en présence d'eau, se traduisant par une variation relative maximale de C_1 , notée $\frac{\Delta C_1}{C_1} = \left(\frac{C_{1eau} - C_1}{C_1} \right) * 100$ (%), et une variation relative minimale (idéalement nulle) de la capacité de référence C_2 , $\frac{\Delta C_2}{C_2} = \left(\frac{C_{2eau} - C_2}{C_2} \right) * 100$ (%).

Un bon rapport Signal/Bruit nécessite un signal d'amplitude suffisante. Cette amplitude est directement liée à la variation relative de la capacité en présence d'eau, elle-même dépendante de la valeur de la capacité en condition sèche. L'optimisation de la capacité repose d'une part sur le choix de la fréquence de fonctionnement du capteur dont dépendent les permittivités diélectriques des matériaux, et d'autre part, sur le bon dimensionnement des paramètres géométriques des électrodes (longueurs, largeurs, épaisseurs et écartements).

Les simulations numériques sont d'abord effectuées à partir de modèles en 2D, permettant de dégager les grandes tendances du problème et de faire apparaître les bases du calcul en 3D. Cette simplification des calculs permet en outre de gagner un temps précieux, les calculs en 3D étant beaucoup plus longs que ceux en 2D.

V.1. Simulations numériques en 2D

Les simulations numériques en 2D conduisent à des capacités linéiques $\frac{dC}{dL}$ (en F/m). C'est donc la variation des capacités C_1 et C_2 en fonction des paramètres dimensionnels qui est étudiée ici.

V.1.a. Choix de la fréquence de fonctionnement du capteur

L'étude des propriétés diélectriques des matériaux permet d'orienter le choix de la fréquence de fonctionnement du capteur. Nous cherchons à obtenir une variation relative maximale de la capacité sensible C_I en présence d'eau. C'est donc principalement la permittivité diélectrique de l'eau qui va conditionner le choix de la fréquence. Comme la capacité évolue dans le même sens que la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' , plus ε' est élevée, plus la capacité sera grande. Dans cette optique, il est préférable de travailler à une fréquence où ε' de l'eau est maximale. La *Figure III.9* représente la variation de ε' de l'eau en fonction de la fréquence et de la température [Fen05].

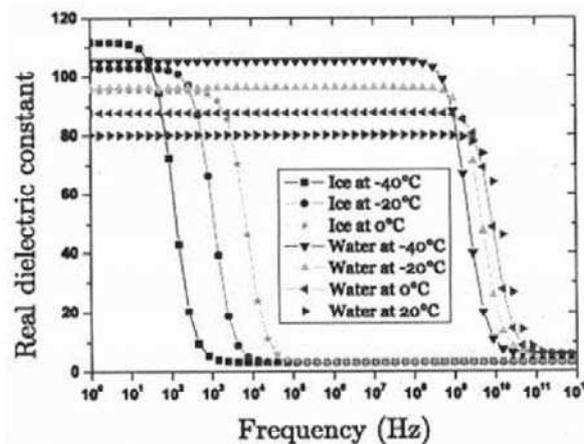


Figure III. 9 : variation de la partie réelle de la permittivité diélectrique de l'eau en fonction de la fréquence et de la température [Fen05]

Jusqu'à une fréquence de 1GHz, la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' de l'eau ne varie pas (≈ 80 à 20°C). Au-delà de cette fréquence, ε' chute brutalement. Il faut donc travailler à une fréquence inférieure à 1GHz.

Nous cherchons également à obtenir des valeurs de capacité suffisamment grandes conduisant à un rapport Signal/Bruit acceptable. De ce fait, la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' des matériaux du pare-brise doit être élevée. Au chapitre précédent, nous avons vu que ε' du verre et du PVB diminue avec la fréquence. Des valeurs maximales de ε' sont donc obtenues à basse fréquence. De plus, le comportement capacitif des diélectriques est maximal lorsque la partie imaginaire de la permittivité diélectrique ε'' , traduisant les pertes, est minimale. Lors de l'étude des propriétés diélectriques des matériaux, nous avons constaté que les pertes ε'' du verre et du PVB, bien que globalement très faibles (isolants), diminuent avec

la fréquence jusqu'à 10kHz, puis augmentent (excepté pour le verre *Clear*). Il semble donc judicieux de se placer à une fréquence comprise entre 1kHz et 10kHz, où $\varepsilon'' < 0,15$ quel que soit le matériau à température ambiante.

Enfin, la fréquence de fonctionnement doit être compatible avec les conditions d'utilisation du capteur comme matériel embarqué dans une automobile (notamment la compatibilité électromagnétique et le coût). Nous choisissons donc de travailler à une fréquence de 1kHz [Psa03].

V.1.b. Initialisation des valeurs

- **Permittivités diélectriques**

Les simulations numériques sont réalisées avec les valeurs des permittivités diélectriques ε' du verre *Light* et du PVB mesurées à 1kHz à température ambiante. Les électrodes métalliques sont définies en tant que conducteurs. Les permittivités de l'eau et de l'air sont quant à elles fournies dans la littérature. Le *Tableau III.2* rassemble les valeurs des permittivités diélectriques utilisées dans les programmes de simulation.

Matériaux	Verre (<i>Light</i>)	PVB	eau	air
ε' à 1kHz à 20°C	8,15	3,85	80	1

Tableau III. 2 : valeurs des permittivités diélectriques des différents matériaux à 1kHz, à 20°C, utilisées dans les programmes de simulation

- **Paramètres dimensionnels**

Les programmes de simulation sont initialisés avec des valeurs de paramètres dimensionnels en accord avec les règles de dimensionnement précédemment établies. La plupart de ces paramètres restent cependant dépendants des paramètres géométriques existants et difficilement modifiables du pare-brise, telles que les épaisseurs des diélectriques, verre et PVB, ainsi que celle de la couche athermique, imposées par le fabricant. Bien que l'épaisseur de cette couche soit très faible ($e_{CA} < 200\text{nm}$), le logiciel impose des ordres de grandeur

comparables entre les dimensions des différents éléments. Dans le cas contraire, le maillage est inhomogène et le calcul ne converge pas. Nous fixons donc cette épaisseur, notée e_{CA} , à $120\mu\text{m}$. Dans l'hypothèse où les électrodes sont gravées dans la couche athermique, nous considérons que les épaisseurs des électrodes e_{elec} sont égales à e_{CA} . Afin d'assurer la compatibilité avec les autres dimensions, nous fixons l'épaisseur de l'air à 3mm . La présence d'eau est, dans un premier temps, grossièrement modélisée par un film continu et uniforme, comme le montre la *Figure III.10*, de façon à ce que la variation de la capacité sensible soit clairement perceptible. De ce fait, nous choisissons une épaisseur notable de 1mm .

L'ensemble des valeurs d'épaisseur utilisées dans les programmes de simulation sont rappelées dans le *Tableau III.3*.

Epaisseurs	Valeurs adoptées (mm)
e_{verre}	2,10
e_{PVB}	0,80
e_{elec}	0,12
e_{air}	3,00
e_{eau}	1,00

Tableau III. 3 : valeurs des épaisseurs utilisées dans les programmes de simulation

Afin de diminuer le nombre de variables dans les programmes de simulation et ainsi simplifier le problème, toutes les grandeurs dimensionnelles du capteur sont paramétrées en fonction de l'épaisseur du verre.

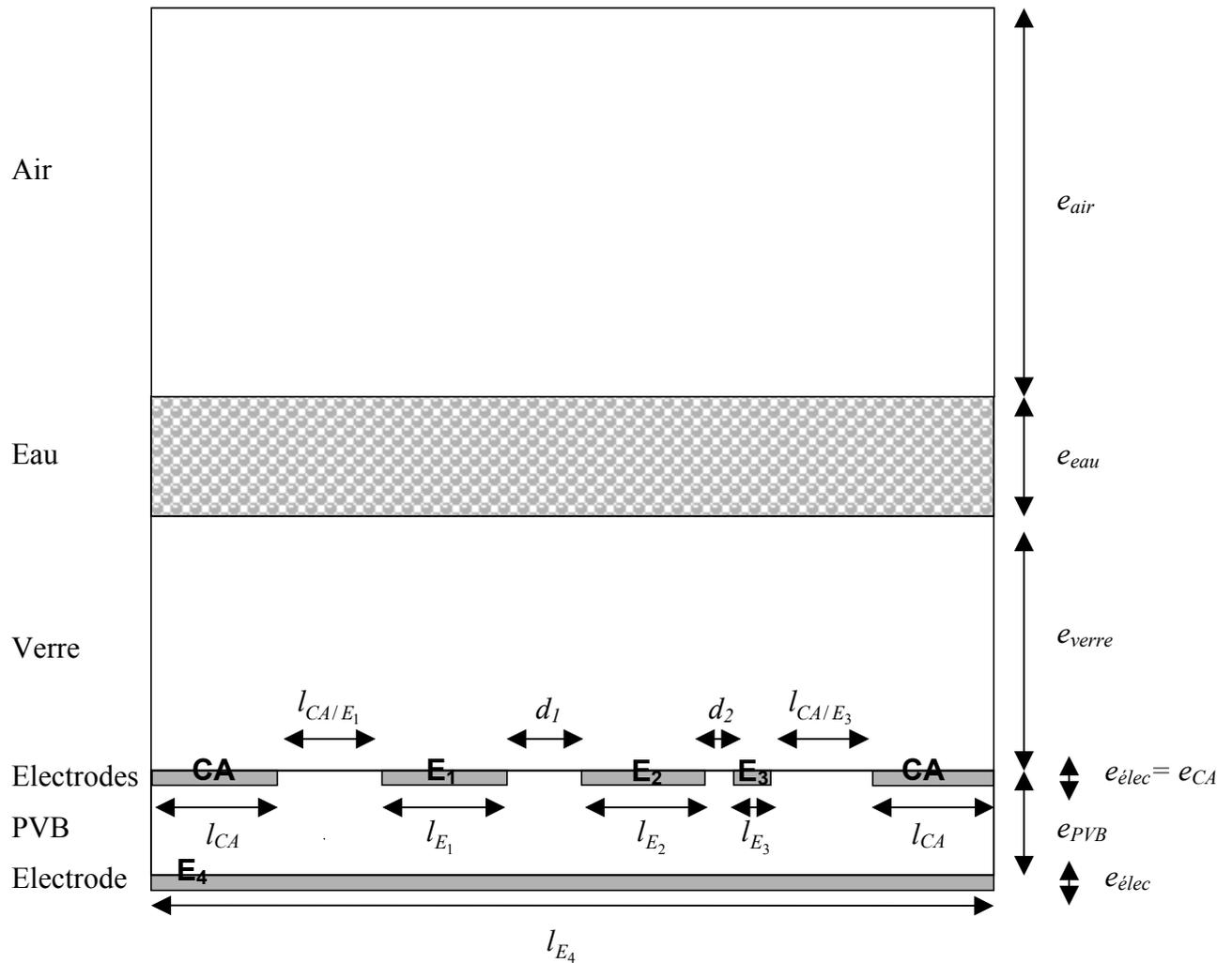


Figure III. 10 : modélisation du capteur en 2D

V.1.c. Optimisation des paramètres dimensionnels

La configuration optimale du capteur est obtenue en faisant varier successivement chacun des paramètres suivant :

- les écartements entre les électrodes d_1 et d_2 ,
- les largeurs des électrodes l_{E_1} , l_{E_2} , l_{E_3} et l_{E_4} ,
- les écartements entre les électrodes et la couche athermique l_{CA/E_1} et l_{CA/E_3} ,
- la largeur de la couche athermique l_{CA} ,

jusqu'à obtenir une variation maximale de C_1 en présence d'eau, tout en maintenant C_2 inchangée.

L'incidence de chaque paramètre sur la variation relative des capacités est détaillée dans le rapport industriel [Bor03¹] pour PSA.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec le jeu de valeurs présenté dans le *Tableau III.4*.

Paramètres dimensionnels	Valeurs optimisées (mm)
d_1	3,150
d_2	0,525
l_{E_1}	4,200
l_{E_2}	4,200
l_{E_3}	0,525
l_{E_4}	52,600
l_{CA/E_1}	15,000
l_{CA/E_3}	15,000
l_{CA}	5,000

Tableau III. 4 : jeu de paramètres dimensionnels optimisés

Conformément aux deux premières règles de dimensionnement des capteurs capacitifs à champ dispersif, exposées dans les parties II.1 et II.2, nous vérifions que $d_1 > e_{\text{verre}} > d_2$ avec

$$\frac{d_1}{e_{\text{verre}}} = 1,5(>1) \text{ et } \frac{d_2}{e_{\text{verre}}} = 0,25(<1).$$

Plus l'écartement entre les électrodes E_1 et E_2 est grand, plus la surface concernée par la mesure est importante. Cependant, la capacité diminue avec l'écartement. Afin de pallier à ce problème, la surface des électrodes (leur largeur en 2D) est augmentée. La règle commentée en II.3 est ainsi également vérifiée puisque $l_{E_1} = l_{E_2} = 4,2\text{mm} \gg e_{PVB} = 0,8\text{mm}$. A l'inverse, l'électrode E_3 , participant à la capacité de référence, est plus étroite (0,525mm).

Les simulations numériques montrent que les valeurs des capacités sont peu influencées par la largeur de l'électrode de garde E_4 . Cependant, afin d'assurer la directionnalité de la détection,

nous choisissons de conserver la plus grande largeur possible pour E_4 , soit toute la largeur du système (*Figure III.10*). En effet, en deçà d'une certaine largeur, la qualité de l'écrantage diminue.

Enfin, en accord avec la règle présentée en II.4, nous avons $\frac{l_{CA}}{l_{E_1}} = \frac{l_{CA}}{l_{E_2}} = 1,2 > 1$. En pratique,

la couche athermique est beaucoup plus large que les électrodes puisqu'elle s'étend sur toute la surface du pare-brise. Cependant, pour des raisons intrinsèques au logiciel de calcul, toutes les dimensions doivent avoir des ordres de grandeur comparables. Des simulations montrent que la valeur de ce paramètre ne joue pas un rôle déterminant dans la variation des capacités. Une largeur faible permet de diminuer la zone à mailler et ainsi de raccourcir les temps de calcul.

Les valeurs de C_1 et C_2 , obtenues avec les dimensions optimisées, ainsi que leur variation relative en présence d'un film d'eau de 1mm d'épaisseur, sont exposées dans le *Tableau III.5*.

	A sec (pF.cm ⁻¹)	+ film d'eau (1mm) (pF.cm ⁻¹)	Variation relative (%)
Capacité sensible C_1	0,23	0,37	60,9
Capacité de référence C_2	0,74	0,73	-1,4

Tableau III. 5 : valeurs et variations relatives de C_1 et de C_2 obtenues avec le jeu de paramètres dimensionnels optimisés

C_1 varie significativement en présence d'eau, contrairement à C_2 . Bien que les capacités obtenues soient très faibles (de l'ordre du picofarad pour des électrodes de 1cm de long), la variation de C_1 est suffisamment importante pour être détectée. La variation négative de C_2 n'a pas de réalité physique. Elle peut cependant être attribuée aux erreurs de calculs du logiciel générées lors du maillage. Ceci rappelle la confiance toute relative qu'il faut accorder à la précision des simulations.

Les simulations numériques en 2D ont permis d'identifier les paramètres dimensionnels influant sur le fonctionnement du capteur et d'en estimer les dimensions optimales. Cette étude constitue la base des calculs en 3D suivants.

V.2. Simulations numériques en 3D

Si en 2D, seules les variations des capacités étaient accessibles, en 3D, nous cherchons à déterminer la configuration optimale du capteur permettant d'obtenir à la fois l'équilibre des capacités à sec, et la variation maximale de la capacité sensible en présence d'eau. Pour cela, la longueur de chaque élément du capteur doit être adaptée en conséquence. Les valeurs des paramètres dimensionnels obtenues en 2D sont conservées.

V.2.a. Configurations du capteur

- **Electrodes linéaires / Electrodes interdigitées**

Deux motifs d'électrodes sont étudiés. Un capteur à électrodes linéaires, correspondant à la configuration 2D, à laquelle des longueurs d'électrodes sont affectées, est d'abord considéré. Ce capteur est représenté sur la *Figure III.11*.

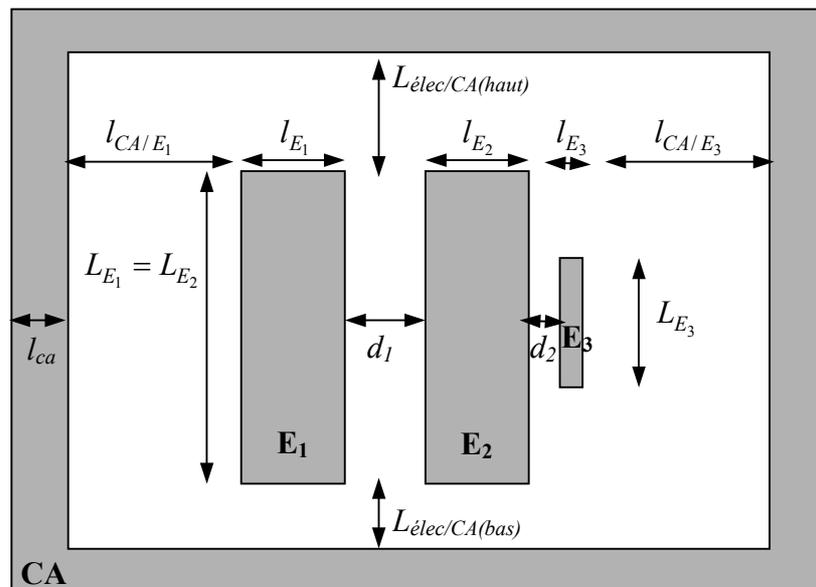


Figure III. 11 : capteur à électrodes linéaires

Afin d'améliorer le rapport Signal/Bruit, un capteur à électrodes interdigitées est ensuite développé. Les systèmes interdigités sont habituellement utilisés pour augmenter la longueur effective des électrodes et donc la valeur des capacités. La recherche d'une forme de capteur compacte, nous amène à fixer des limites aux longueurs des électrodes ainsi qu'au nombre de motifs : nous choisissons de considérer des électrodes à cinq doigts. Afin de simplifier le motif du capteur et de diminuer le nombre de variables dans les programmes de simulation, l'électrode E_3 est positionnée de façon à jouxter l'électrode E_2 sur toute sa longueur. De ce fait, la longueur de E_3 dépend entièrement du dimensionnement de l'électrode E_2 . La configuration proposée pour le capteur à électrodes interdigitées est présentée *Figure III.12*.

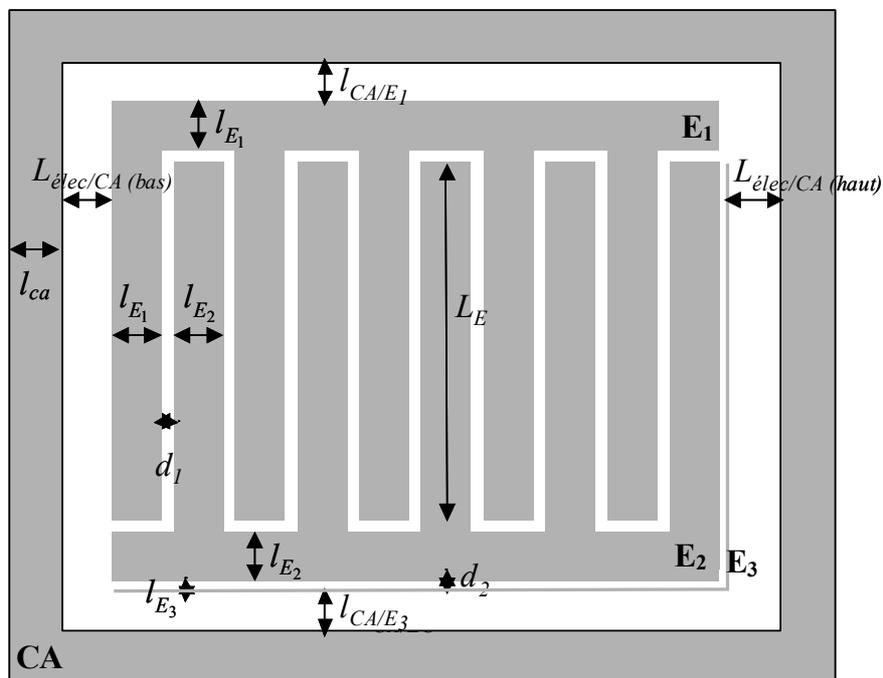


Figure III. 12 : capteur à électrodes interdigitées

Par souci de clarté, les notations utilisées pour le capteur à électrodes linéaires sont conservées.

- **Capteur complet / Capteur simplifié**

Au laboratoire, il nous est difficile de fabriquer le capteur complet, tel qu'il est représenté sur la *Figure III.13*, car nous ne disposons pas des moyens d'assemblage verre/PVB/verre. De ce

fait, il ne nous est pas possible de valider expérimentalement les résultats de simulations relatifs au capteur complet.

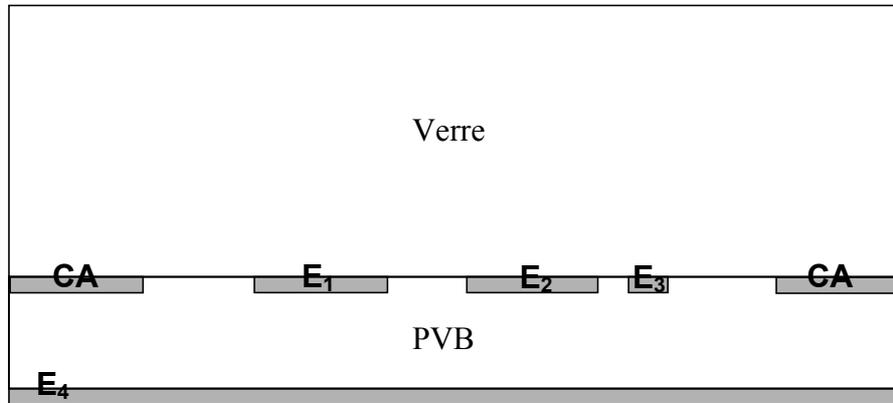


Figure III. 13 : capteur complet

Afin de contourner ce problème, nous considérons un capteur simplifié, composé uniquement de la zone sensible du capteur, à savoir le substrat de verre sur lequel sont déposées les trois électrodes E_1 , E_2 et E_3 , ainsi que la couche athermique CA. Ce capteur est représenté *Figure III.14*.

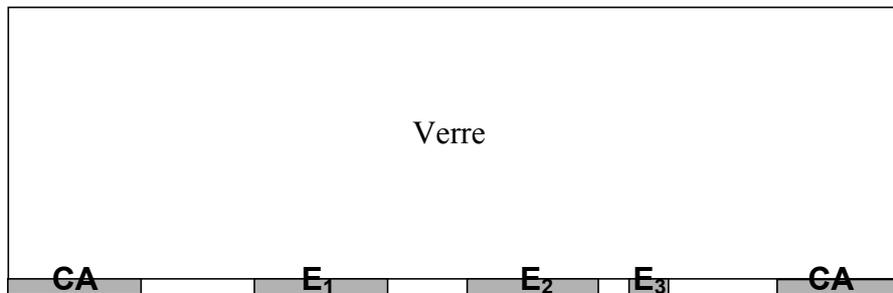


Figure III. 14 : capteur simplifié

Si les mesures effectuées sur le capteur simplifié concordent avec les simulations, cet accord sera selon toute vraisemblance également vérifié pour le capteur complet, ce qui permettra de valider l'ensemble des simulations.

Quatre configurations différentes du capteur sont donc considérées dans la suite de l'étude :

- un capteur simplifié à électrodes linéaires,
- un capteur complet à électrodes linéaires,
- un capteur simplifié à électrodes interdigitées,
- un capteur complet à électrodes interdigitées.

V.2.b. Dimensionnement des capteurs en condition sèche

Nous cherchons à obtenir l'égalité des capacités $C_1 = C_2$ à sec. Pour cela, la longueur de chaque élément du capteur doit être ajustée en conséquence.

- **Capteurs à électrodes linéaires**

Le Tableau III.6 rassemble les valeurs des paramètres dimensionnels 3D (cf. Figure III.11) choisis sur la base des résultats des simulations 2D.

Paramètres dimensionnels	Valeurs optimisées (mm)
L_{E_3}	5
l_{CA}	5
$L_{elec/CA(haut)}$	15
$L_{elec/CA(bas)}$	10
l_{CA/E_1}	15
l_{CA/E_3}	15

Tableau III. 6 : paramètres dimensionnels 3D du capteur à électrodes linéaires

La longueur de l'électrode E_3 est fixée arbitrairement à 5mm. La règle de dimensionnement, énoncée en II.5, permet d'estimer la longueur des électrodes E_1 et E_2 . Cependant, l'approximation du condensateur plan utilisée ne tient compte ni de la dispersion des lignes de

champ générées par les électrodes coplanaires, ni des effets de bord. Les longueurs L_{E_1} et L_{E_2} doivent donc être affinées jusqu'à obtenir l'égalité des capacités. Nous rappelons que les électrodes E_1 et E_2 sont identiques ($L_{E_1} = L_{E_2}$).

A l'issue des simulations, **l'égalité des capacités en condition sèche est obtenue pour :**

- le **capteur complet** avec $L_{E_1} = L_{E_2} = 22\text{mm}$ ce qui conduit à $C_1 = C_2 = \mathbf{0,50pF}$,
- le **capteur simplifié** avec $L_{E_1} = L_{E_2} = 10\text{mm}$ ce qui conduit à $C_1 = C_2 = \mathbf{0,49pF}$.

Les longueurs des électrodes conduisant à l'égalité des capacités sont très différentes suivant la configuration du capteur considérée. Avec $L_{E_1} = L_{E_2} = 22\text{mm}$ (longueur des électrodes du capteur complet), les capacités C_1 et C_2 du capteur simplifié ne sont plus équilibrées. Les simulations donnent : $C_1 = 1,04\text{pF}$ et $C_2 = 0,53\text{pF}$. Bien que le film de PVB, l'électrode de garde et le second feuillet de verre soient situés sous la zone de détection, ces éléments influent significativement sur la valeur des capacités et notamment de la capacité sensible C_1 .

Les capacités obtenues avec les électrodes linéaires étant faibles, nous nous intéressons à un capteur à électrodes interdigitées. L'augmentation des capacités, générée par l'allongement des électrodes, tend, a priori, à améliorer le rapport Signal/Bruit.

- **Capteurs à électrodes interdigitées**

Les valeurs des paramètres dimensionnels (cf. *Figure III.12*) sont initialisées à partir des valeurs optimisées des capteurs à électrodes linéaires, en augmentant la longueur effective des électrodes. Ces valeurs sont rassemblées dans le *Tableau III.7*.

Paramètres dimensionnels	Valeurs optimisées (mm)
l_{CA}	5
$L_{elec/CA(haut)}$	10
$L_{elec/CA(bas)}$	20
l_{CA/E_1}	10
l_{CA/E_3}	10

Tableau III. 7 : paramètres dimensionnels 3D du capteur à électrodes interdigitées

Une simple multiplication des longueurs ne suffit pas car, dans les systèmes interdigités, le champ dispersif est plus important, en raison des effets de bords à chaque branche [Mam04]. Ici encore, le dimensionnement de la longueur des électrodes doit être affiné jusqu'à l'obtention de l'égalité des capacités. En raison de la géométrie des électrodes (*Figure III.12*), c'est uniquement sur la valeur de la longueur des doigts des électrodes L_E que nous jouons.

A l'issue des simulations, **l'égalité des capacités en condition sèche est obtenue pour :**

- le **capteur complet** avec $L_E = 30\text{mm}$ ce qui conduit à $C_1 = C_2 = 7,31\text{pF}$,
- le **capteur simplifié** avec $L_E = 11,5\text{mm}$ ce qui conduit à $C_1 = C_2 = 6,48\text{pF}$.

Globalement, pour une même configuration du capteur (complète ou simplifiée), les capacités augmentent dans le même rapport que la longueur effective des électrodes, ce qui traduit des effets de bords négligeables.

Si l'augmentation des capacités tend à améliorer le rapport Signal/Bruit, il faut noter cependant, que la valeur de C_1 ne doit pas être trop élevée de façon à conserver une variation significative en présence d'eau. En effet, l'augmentation des capacités résulte de l'augmentation du volume de diélectrique sous influence. Nous pouvons penser qu'en présence d'eau, l'augmentation des capacités liée à l'eau sera sensiblement la même pour les deux configurations de capteur. Par contre, la variation relative sera fatalement plus faible dans le cas du capteur à électrodes interdigitées, d'où une diminution de la sensibilité.

• **Validité des modèles analytiques**

Le *Tableau III.8* rassemble les valeurs des capacités obtenues numériquement pour les différentes configurations du capteur et les compare aux valeurs calculées à l'aide des modèles analytiques de Endres [End91] et de Igreja [Igr04]. Pour le calcul des capacités du capteur simplifié, la couche finie de PVB est remplacée par une couche infinie d'air.

Méthode utilisée	Capteur simplifié				Capteur complet			
	Electrodes linéaires		Electrodes interdigitées		Electrodes linéaires		Electrodes interdigitées	
	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
Modèle de Endres	0,50pF	0,43pF	7,28pF	5,20pF	1,44pF	1,08pF	20,47pF	8,72pF
Modèle de Igreja	0,40pF	0,41pF	6,33pF	4,98pF	1,02pF	0,94pF	14,92pF	7,56pF
Simulations par éléments finis	0,49pF	0,49pF	6,48pF	6,48pF	0,50pF	0,50pF	7,31pF	7,31pF

Tableau III. 8 : valeurs des capacités obtenues avec différentes méthodes de calcul

Capteur simplifié : Le modèle simple de Endres permet de retrouver la valeur numérique de la capacité sensible C_1 du capteur à électrodes linéaires. Le modèle de Igreja, dédié à l'étude des structures multicouches à électrodes interdigitées, est adapté au calcul de la capacité C_1 du capteur à électrodes interdigitées. En revanche, la capacité de référence C_2 est plus difficile à estimer avec les modèles analytiques, en raison de la différence de longueur et de largeur des deux électrodes qui la délimitent. Les résultats présentés dans le *Tableau III.8* sont calculés avec les longueurs et les largeurs moyennes des électrodes. Cependant, les capacités C_2 obtenues pour les deux motifs d'électrodes du capteur simplifié semblent faibles, ce qui indique que les valeurs des dimensions efficaces qu'il est nécessaire de considérer lors des calculs sont sous-estimées.

Capteur complet : Les valeurs des capacités calculées selon les modèles de Endres et de Igreja sont nettement supérieures aux valeurs obtenues numériquement. Le modèle de Igreja conduit à la meilleure approximation car ce dernier permet en partie de tenir compte de la présence de l'électrode de garde, en considérant la couche de PVB comme finie et écranée de l'influence extérieure. Etant donné l'écart avec les simulations, il semble que les méthodes analytiques soient malgré tout insuffisantes pour traduire l'influence globale de l'électrode de garde sur la distribution des lignes de champ du capteur. Dans la littérature, il a été montré que la présence d'une électrode de garde engendrait une diminution notable des capacités [Tsa05]. Ce point sera développé au chapitre suivant.

Les simulations par éléments finis permettent d'estimer les capacités quelle que soit la configuration du capteur, contrairement aux modèles analytiques, dont la validité est limitée aux configurations les plus simples (électrodes identiques, pas d'électrode de garde, condition sèche).

- **Validité du dimensionnement des capteurs**

Le dimensionnement des capteurs a été effectué avec la permittivité du verre *Light* mesurée à 1kHz, à température ambiante ($\epsilon' = 8,15$). Dans le chapitre II, nous avons constaté que les verres *Dark* et *Light* présentaient des permittivités diélectriques identiques, supérieures à celle du verre *Clear*. De ce fait, le dimensionnement des capteurs est également valable avec le verre *Dark*. Mais qu'en est-il du verre *Clear*? De nouvelles simulations sont réalisées en remplaçant la permittivité ϵ' du verre *Light* par celle du verre *Clear* mesurée à 1kHz, à température ambiante ($\epsilon' = 7,75$), en conservant les valeurs des paramètres dimensionnels optimisés pour le verre *Light*. Les résultats sont présentés dans le *Tableau III.9* pour les deux motifs d'électrodes du capteur complet.

Motif des électrodes	Type de verre (ϵ')	C_1 (pF)	C_2 (pF)
Electrodes linéaires	Light/Dark (8,15)	0,50	0,50
	<i>Clear</i> (7,75)	0,48	0,48
Electrodes interdigitées	Light/Dark (8,15)	7,31	7,31
	<i>Clear</i> (7,75)	6,90	7,00

Tableau III. 9 : influence du type de verre sur les capacités du capteur complet

L'égalité des capacités en condition sèche est conservée avec le verre *Clear*, malgré une diminution des capacités, notamment de la capacité sensible C_1 . Le volume de diélectrique sous influence du champ électrique étant plus important dans le cas de la capacité C_1 , cette dernière est proportionnellement la plus affectée par la modification des propriétés diélectriques. Lorsque le volume de verre sous influence augmente (cas des électrodes interdigitées), l'équilibre des capacités est menacé. Par conséquent, le dimensionnement des capteurs reste valable quel que soit le verre utilisé pour confectionner les pare-brises, à condition de ne pas augmenter la taille des capteurs.

Notons également que l'égalité des capacités en condition sèche est conservée sur une large gamme de fréquence autour de 1kHz car la variation des permittivités diélectriques des matériaux avec la fréquence est faible (cf. *Figure II.12* et *Figure II.19*).

Enfin, une dernière remarque à propos de la compatibilité entre la fréquence de fonctionnement du capteur et son dimensionnement. Dans les systèmes à électrodes interdigitées, la longueur d'onde du signal d'excitation et la longueur d'onde spatiale relative à la périodicité du réseau ne doivent pas interférer. Pour le dimensionnement optimisé, effectué à 1kHz, la fréquence de résonance est de $2 \cdot 10^{10}$ Hz. Il n'existe donc pas de risque d'interférence.

VI. Fabrication des capteurs simplifiés

Initialement, nous avons considéré l'éventualité de graver directement les électrodes dans la couche athermique, qui s'étend sur toute la surface du pare-brise. Cette fine couche métallique, déposée sur la face interne du feuillet de verre extérieur par pulvérisation atomique, a pour fonction de filtrer le rayonnement infrarouge afin de limiter l'échauffement de l'habitacle en période estivale. Sa résistivité ρ est de $6 \cdot 10^{-08} \Omega\text{m}$, ce qui correspond à la résistivité du zinc, son composant majoritaire. L'analyse EDX d'un feuillet de verre recouvert d'une couche athermique, présentée *Figure III.15*, révèle également la présence d'argent et de titane.

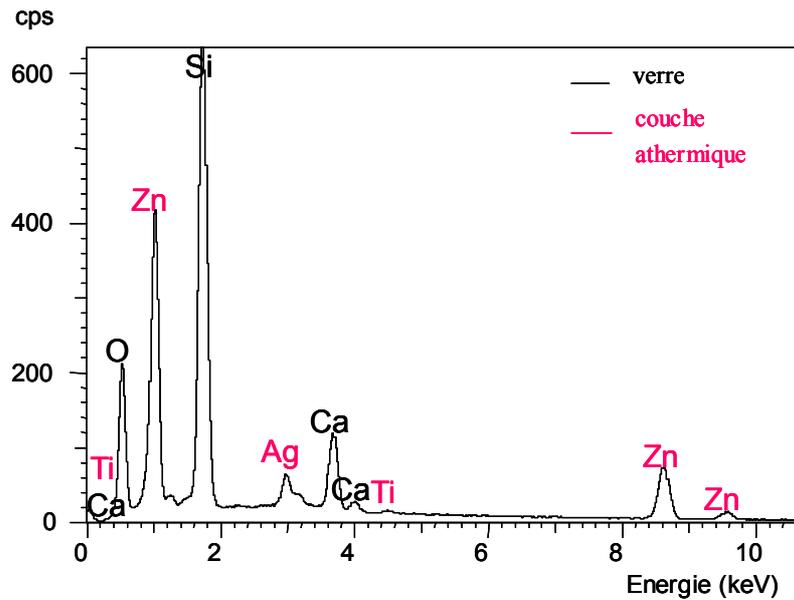


Figure III. 15 : analyse EDX d'un feuillet de verre recouvert d'une couche athermique

Malgré sa conductivité intéressante, la couche athermique s'avère beaucoup trop fragile dans les conditions de l'expérience pour pouvoir établir des contacts électriques avec une tenue mécanique suffisante du fait de sa faible épaisseur ($< 200\text{nm}$). Les électrodes doivent donc être fabriquées par dépôt conducteur sur le verre.

Au laboratoire, nous disposons de deux méthodes de dépôt pour les électrodes :

- en couches épaisses par sérigraphie,
- et en couches minces par évaporation thermique sous vide.

Pour des condensateurs à électrodes coplanaires d'épaisseur négligeable par rapport à leur largeur, la capacité dépend essentiellement de la surface des électrodes [Wan03]. Ce point a été confirmé pour nos capteurs par des simulations numériques. A priori, les deux techniques de dépôt peuvent donc être utilisées indifféremment.

Lors du dimensionnement des capteurs, les propriétés électriques du verre *Light* ont été utilisées. C'est pourquoi, afin de comparer les résultats expérimentaux et numériques, le verre *Light* est systématiquement utilisé comme substrat lors de la fabrication des capteurs.

VI.1. Dépôts des électrodes par sérigraphie : technologie couche épaisse

La sérigraphie, très utilisée en micro-électronique hybride, permet de déposer, selon la technique du pochoir, un réseau de conducteurs, de résistances ou de diélectriques, de quelques micromètres d'épaisseur sur un substrat plan [Cha92]. L'élaboration de ces couches épaisses comporte plusieurs étapes comme le montre la *Figure III.16*.

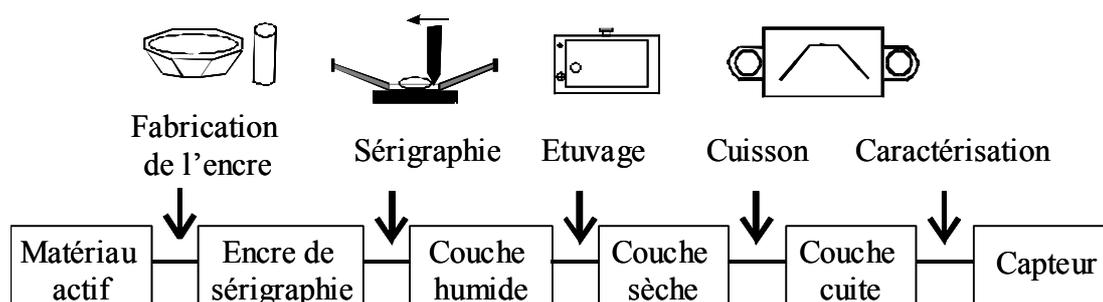


Figure III. 16 : étapes du procédé de sérigraphie

VI.1.a. Choix de l'encre

Une encre est essentiellement composée d'une phase organique (liquide) qui garantit l'impression de l'encre sur le substrat avant la cuisson et d'une phase minérale (poudre) qui assure les propriétés électrique et mécanique recherchées après la cuisson, comme l'explique la *Figure III.17*.

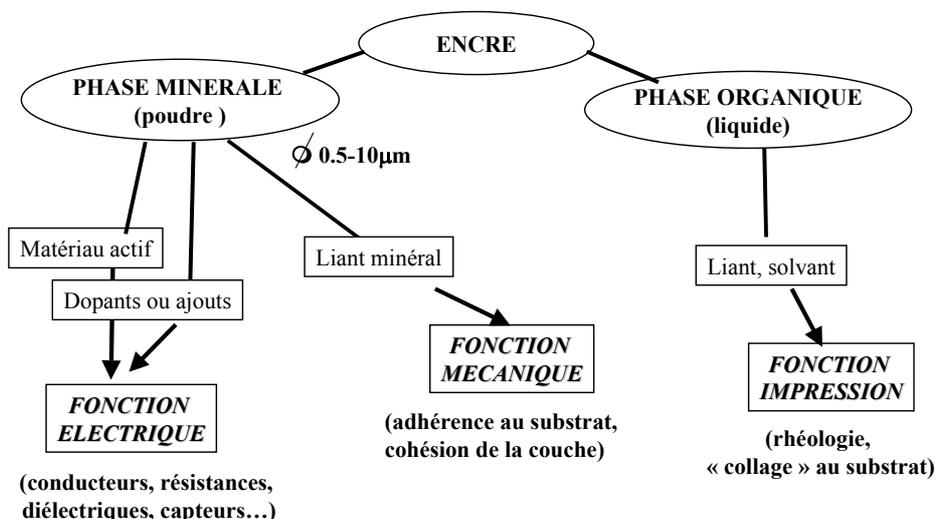


Figure III. 17 : composition d'une encre de sérigraphie

Plusieurs types d'encre commerciales ont été testées dans le cadre de ce travail. L'utilisation d'une encre classique nécessite une cuisson dans un four à passage, suivant un profil de température, comportant généralement un palier d'une dizaine de minutes entre 850 et 950°C. Cependant, la cuisson à haute température risque de modifier les caractéristiques électriques du substrat de verre. En effet, la température de transition vitreuse (T_g) des verres sodocalciques se situe aux environs de 540°C. A cette température, les propriétés optiques du verre sont modifiées : une coloration jaune apparaît. Nous avons donc opté pour une encre conductrice polymère argent (1901-S ESL) qui polymérise à basse température (calibration : 125°C / 10 minutes), la rendant compatible avec la plupart des substrats.

VI.1.b. Sérigraphie

L'impression, c'est-à-dire le dépôt de l'encre sur le substrat, s'effectue en salle blanche, à l'aide d'une machine à sérigraphier, à travers les mailles d'un écran comportant le motif désiré.

- Préparation des écrans

Un écran de sérigraphie est constitué d'une toile ajourée, le plus souvent en acier inoxydable, tendue dans un cadre. La toile est définie par son nombre de meshes, c'est-à-dire le nombre de fils par pouce (1 pouce = 25,4mm), fonction du diamètre d du fil et du vide de maille W (Figure III.18).

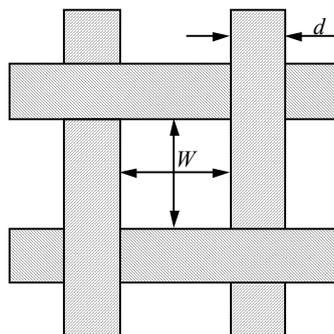


Figure III. 18 : maille d'une toile constituant un écran de sérigraphie

Le choix de l'écran dépend de l'encre utilisée lors la sérigraphie, notamment de la taille des grains la constituant. Pour l'encre conductrice polymère argent utilisée, il est préconisé

d'employer des écrans de 200 à 325 meshes avec un angle de maillage de 45° afin de faciliter le raclage.

La préparation des écrans s'effectue selon le principe de la photolithographie dans une pièce inactinique. Cette opération consiste à déposer sur l'écran un film mince de résine photosensible. Nous verrons que la résine peut également se présenter sous forme liquide suivant l'application. Ces résines sont des composés organiques, généralement des polymères thermoplastiques, dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV. Il en existe deux types :

- les résines négatives pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une polymérisation des zones exposées, conférant ainsi à ces zones une tenue particulière au solvant de révélation, alors que les parties non insolées disparaissent sélectivement dans ce solvant,
- les résines positives pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une rupture des macromolécules, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur.

Un film de résine négative de 50µm d'épaisseur (MS FILM 50, Murakomi Co), recouvert d'un feuillet plastique de protection, est déposée sur un écran vierge et propre. La résine est préalablement trempée dans de l'eau froide (solvant de révélation) de façon à bien imprégner les mailles de l'écran lors du séchage en étuve (50°C pendant une heure), comme le montre la *Figure III.19*.

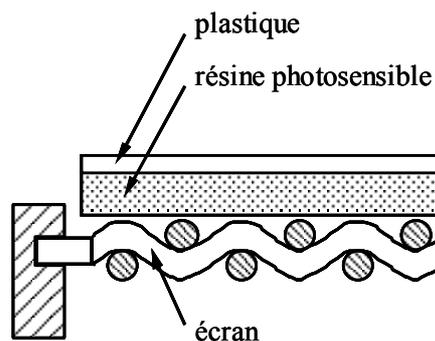


Figure III. 19 : préparation d'un écran de sérigraphie

Après avoir enlevé le film plastique, le typon, qui représente le motif des électrodes à sérigraphier, est plaqué contre la face supérieure, au centre de l'écran comme indiqué *Figure III.20*. Le typon est réalisé à l'aide d'un logiciel de dessin puis imprimé sur du papier de type calque de façon à laisser passer les UV. La durée de l'insolation est fonction de l'épaisseur du

film de résine. Pour une épaisseur de 50 μ m, trois à quatre minutes sont nécessaires pour que la résine non protégée polymérise sous l'effet du rayonnement UV.

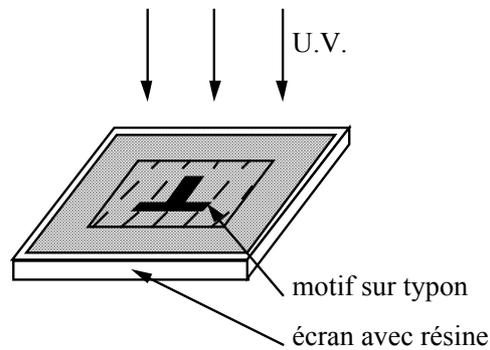


Figure III. 20 : insolation aux UV

Un rinçage à l'eau tiède permet d'enlever la résine négative non-insolée, et de conserver les parties insolées insolubles dans l'eau. L'écran est ensuite étuvé à 50°C pendant deux heures. La Figure III.21 représente un écran ainsi fabriqué destiné à la sérigraphie d'un capteur à électrodes linéaires. Nous avons ajouté des plots à la configuration initiale des électrodes afin de faciliter la prise de contact lors des mesures et de ne pas endommager les électrodes.

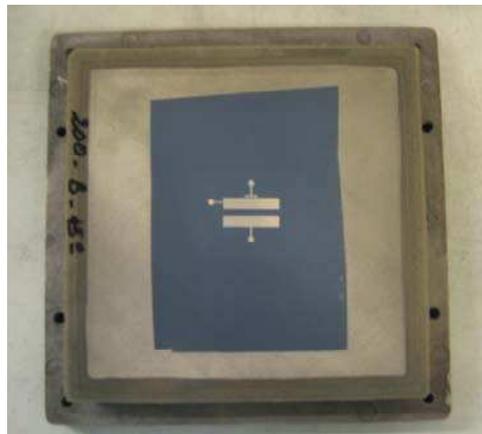


Figure III. 21 : écran (200 meshes, 45°) destiné à la sérigraphie d'un capteur à électrodes linéaires

- **Dépôt des électrodes**

Le substrat de verre est déposé au centre du support et maintenu par aspiration. L'écran est fixé sur le porte-écran au-dessus du substrat comme le montre la Figure III.22.

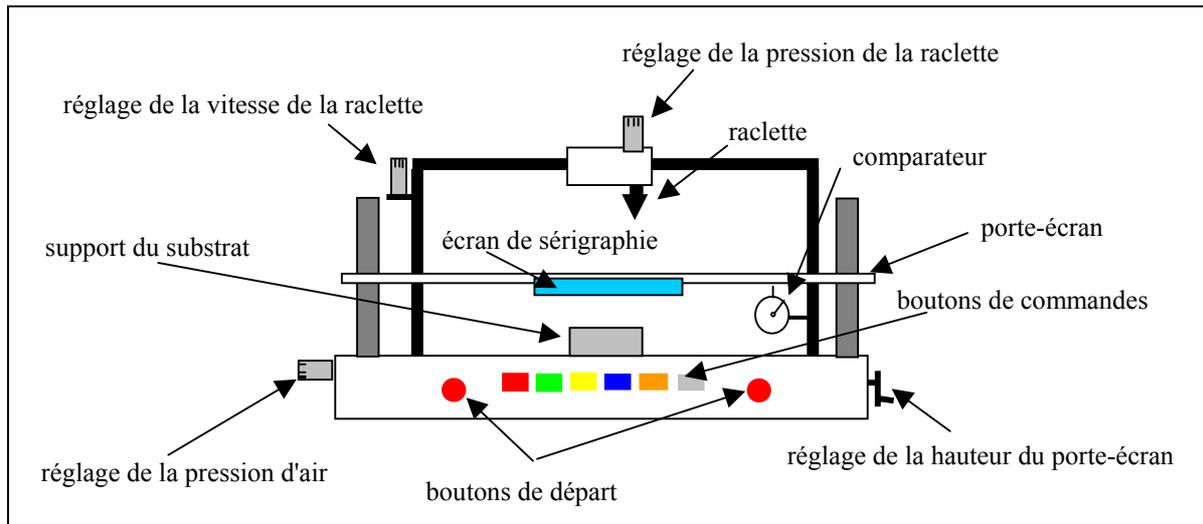


Figure III. 22 : schéma de la machine à sérigraphier du laboratoire IXL

Avant de procéder à la sérigraphie, différents types de réglage sont nécessaires : « hors-contact » (hauteur de l'écran par rapport au substrat), pression de la raclette, vitesse de déplacement de la raclette... Ces réglages, dont dépend l'épaisseur de la couche déposée, sont fonction du maillage de l'écran utilisé, de la viscosité de l'encre ainsi que de l'épaisseur de la résine.

Lors de la sérigraphie, l'encre doit être à température ambiante de façon à être suffisamment fluide. Une encre a un comportement pseudo-plastique, c'est-à-dire que sa viscosité diminue sous l'effet d'un cisaillement, ce qui facilite le passage à travers les mailles de l'écran sous l'effet de la raclette, et réaugmente ensuite, pour ne pas s'étaler sur le substrat. Comme indiqué *Figure III.23*, c'est le déplacement de la raclette sur le motif de l'écran et la pression exercée qui permettent de déposer l'encre sur le verre aux emplacements des électrodes. Dès que l'écran quitte la surface du substrat, le nappage commence.

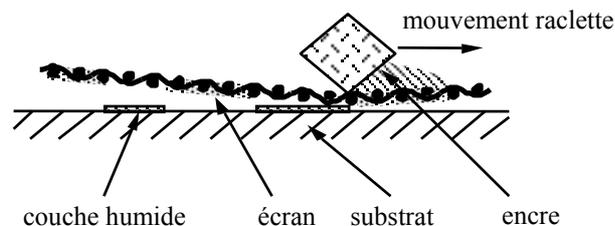


Figure III. 23 : principe de l'impression sérigraphique

VI.1.c. Traitement thermique

La couche humide est d'abord séchée à 100°C pendant dix minutes de manière à éliminer les solvants, puis étuvée à 125°C dix minutes également, afin de polymériser et d'acquérir les propriétés recherchées. Dans le cas des encres polymères, c'est la polymérisation qui confère au film ses propriétés de solidité, de stabilité (adhérence au substrat, cohésion de la couche, frittage suffisant...), mais aussi fonctionnelles (électriques et mécaniques). A cette température, les caractéristiques du verre ne sont pas modifiées.

VI.1.d. Caractérisation

L'épaisseur de la couche humide, mesurée à l'aide d'un microscope à coupe optique, est de quelques dizaines de micromètres (environ 40 μ m). Après le traitement thermique en étuve, l'épaisseur de la couche sérigraphiée se trouve réduite suite à l'élimination du véhicule organique présent dans l'encre.



Figure III. 24 : capteur simplifié à électrodes linéaires déposées par sérigraphie

Des mesures au profilomètre optique permettent de déterminer l'épaisseur des couches sèches sérigraphiées. Pour le capteur présenté *Figure III.24*, l'épaisseur des électrodes est de l'ordre de 15-20 μ m comme le montre la *Figure III.25*. Pour les mêmes réglages de la machine à sérigraphier, cette valeur d'épaisseur de couche est reproductible.

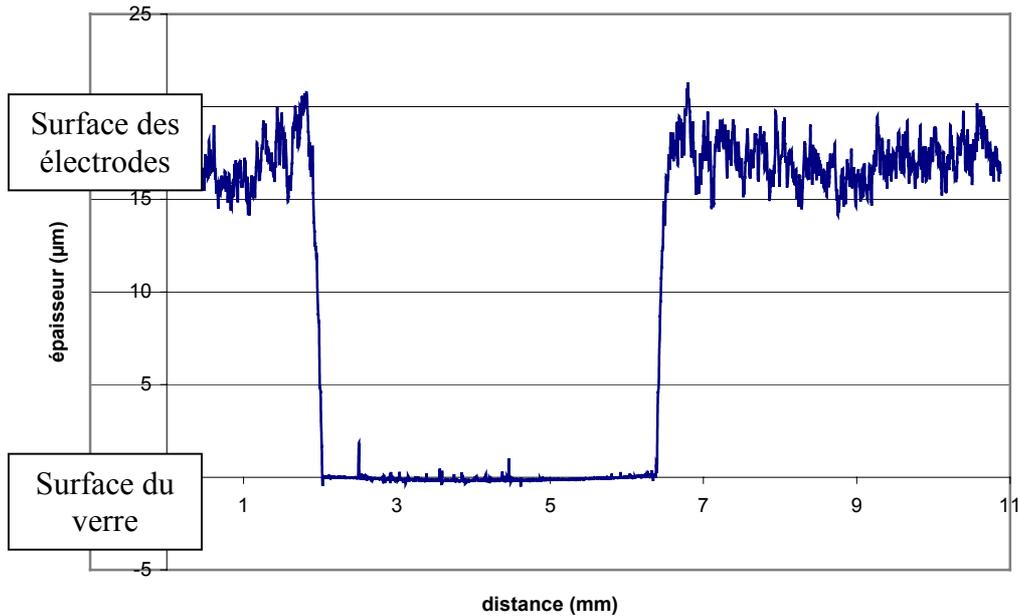


Figure III. 25 : épaisseur des couches sérigraphiées mesurées au profilomètre optique

L'observation des capteurs sérigraphiés au microscope optique met en évidence un surdimensionnement systématique des longueurs et des largeurs des électrodes. Lors du nappage, l'encre s'étale sur le verre, engendrant des écartements inter-électrodes sous-dimensionnés. Ce phénomène est lié au comportement thixotrope de l'encre (évolution de la viscosité dans le temps) [Cha92]. En raison de leurs faibles dimensions, l'électrode E_3 ($525\mu\text{m} * 5000\mu\text{m}$) ainsi que la distance d_2 ($525\mu\text{m}$) sont proportionnellement les plus affectées, ce qui altère notablement la valeur de la capacité C_2 . Cet effet peut être atténué en augmentant la pression de la raclette sur l'écran. Dans ce cas, l'épaisseur de la couche est plus faible et l'étalement de l'encre sur le verre réduit. Cependant, malgré les modifications apportées aux paramètres de réglage, des erreurs notables de dimensionnement subsistent.

Ce problème peut être résolu en jouant sur l'épaisseur de la résine photosensible utilisée pour la fabrication des écrans ($<50\mu\text{m}$) ou en changeant d'encre (même caractéristiques fonctionnelles, température de polymérisation comparable mais thixotropie plus faible). Néanmoins, chaque essai est fastidieux puisqu'il nécessite la fabrication d'un nouvel écran ainsi que plusieurs essais de réglage lors de la sérigraphie. C'est pourquoi, si la méthode de métallisation des électrodes sous vide s'avère plus concluante, nous privilégierons ce mode de dépôt. Notons que, malgré un dimensionnement erroné, ces capteurs ont permis d'effectuer les premières mesures de capacité.

VI.2. Dépôts des électrodes par évaporation thermique sous vide : technologie couche mince

Le principe de la métallisation sous vide est le suivant : lorsque l'on chauffe un métal, sa pression de vapeur s'élève. L'évaporation du métal est d'autant plus importante que la pression environnante est faible. En effet, le vide doit être suffisamment poussé pour que les atomes métalliques, qui se propagent en ligne droite, ne rencontrent pas de molécules de gaz pendant leur trajet jusqu'au substrat à métalliser. Les vapeurs métalliques se condensent sur la première surface froide rencontrée en formant un dépôt en couche mince sur celle-ci.

La métallisation a lieu dans une enceinte reliée à un système de pompage (*Figure III.26*). Une pompe à palettes permet de faire un vide primaire puis une pompe à diffusion d'huile prend le relais pour atteindre un vide secondaire (de l'ordre de 10^{-6} mbar). Le métal à évaporer, l'aluminium, est déposé dans un creuset en tungstène chauffé par effet Joule.

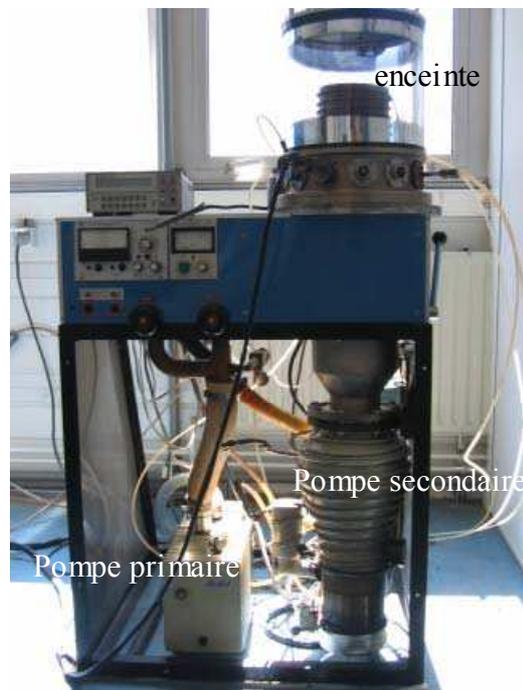


Figure III. 26 : station d'évaporation

Afin de métalliser les électrodes sur le verre, deux voies sont possibles :

- la méthode directe consistant à superposer un masque au verre lors de la métallisation, afin que ne soient métallisées que les zones réservées aux électrodes,
- la méthode indirecte consistant à métalliser toute la surface de verre et à éliminer ensuite les parties indésirables au moyen d'une gravure à l'aide d'un masque de résine.

VI.2.a. Méthode directe

Plusieurs modes de fabrication du masque sont envisagés.

- **Fabrication d'un masque indépendant réutilisable**

Dans un premier temps, la fabrication d'un masque souple, utilisable pour des dépôts successifs, est considérée. Après quelques essais peu concluants avec du papier cartonné et un film plastique (manque de précision lors de la découpe), des tests sont effectués avec le film de résine photosensible négative (MS FILM 50, Murakomi Co), utilisé pour la fabrication des écrans en sérigraphie. Afin de pallier au manque de rigidité du film dû à sa faible épaisseur (50 μ m), plusieurs films de résine sont superposés et collés les uns aux autres avec de l'eau. Après étuvage (50°C) et insolation sous UV pendant quelques minutes en présence du typon, un rinçage à l'eau permet de dissoudre la résine non-insolée, laissant apparaître l'emplacement des électrodes pour la métallisation. Cependant, malgré plusieurs épaisseurs de résine, le masque reste très fragile et inutilisable pour la fabrication des capteurs.

L'utilisation d'un masque rigide, par exemple en acier inoxydable, paraît inévitable. Les masques sont découpés par laser dans une tôle en inox de 200 μ m d'épaisseur, suffisamment épaisse pour être rigide, mais pas assez pour générer des zones d'ombre lors de la métallisation. La découpe est effectuée par une entreprise spécialisée dans l'usinage laser et la découpe au jet d'eau de la région bordelaise.

Pour métalliser les électrodes, le masque en acier est superposé au substrat de verre. L'ensemble est ensuite positionné dans l'enceinte de la station d'évaporation. Une fois un vide secondaire atteint, nous pouvons procéder à la métallisation des électrodes. L'épaisseur du dépôt est fonction de la durée de l'évaporation de l'aluminium. Des mesures au profilomètre optique révèlent une épaisseur de l'ordre de 200 à 400nm.

L'observation de ces capteurs au microscope optique met en évidence des problèmes de dimensionnement liés à la découpe des masques au laser, principalement au niveau des angles. Le laser ne permet pas de découper des angles droits. Ces derniers sont arrondis, ce qui influe sur la valeur des capacités. De plus, il existe un risque de distorsions dimensionnelles liées à la déformation du masque par gravité lors du dépôt des électrodes, notamment pour le capteur à électrodes interdigitées, dont la surface est plus grande.

A l'issue de ces différents essais, la fabrication d'un masque indépendant du substrat et donc réutilisable, permettant un dimensionnement correct des électrodes, semble difficile. Nous choisissons donc de solidariser le masque et le substrat de verre afin d'éviter tous les problèmes précédemment cités. Pour cela, nous utilisons un film de résine photosensible comme masque.

- **Dépôt du masque sur le verre (résine photosensible négative)**

Un film de résine photosensible négative (MS FILM 50, Murakomi Co) est déposé sur toute la surface du verre. Pour assurer une bonne adhésion, la résine est préalablement humidifiée. Un étuvage à 50°C pendant plusieurs jours permet d'éliminer toute trace d'eau susceptible de fragiliser la résine. Après insolation sous UV, pendant deux à trois minutes, un rinçage à l'eau permet d'enlever la résine non-insolée. Le verre est ensuite étuvé à 50°C pendant quelques heures.

L'observation à la binoculaire révèle la présence de bulles d'air entre la résine et le verre ainsi que des irrégularités au niveau de la démarcation des électrodes : les bords ne sont pas rigoureusement rectilignes en raison de la fragilité de la résine. De plus, il subsiste des traces de résine aux emplacements des électrodes. En temps normal, la projection d'eau sous pression permet d'enlever l'éventuelle résine restante, mais dans le cas présent, le film est beaucoup trop fragile pour procéder de la sorte.

Un autre problème lié à ce mode de fabrication, concerne la suppression de la résine insolée après la métallisation des électrodes. La résine insolée est soluble dans un solvant adéquat, le Pregasol. Cependant, il faut veiller à ne pas laisser trop longtemps le Pregasol en contact avec l'aluminium afin de réduire tout risque d'attaque chimique. Des tests ont montré qu'au bout de quelques minutes, l'aluminium est attaqué par le Pregasol, alors que toute la résine insolée n'est pas complètement dissoute.

La solution consiste à trouver une résine dont le solvant permet d'enlever la résine insolée, sans altérer l'aluminium. C'est le cas de la résine photosensible positive S1813 Shipley, qui utilise l'acétone comme solvant.

VI.2.b. Méthode indirecte (résine photosensible positive)

Dans le cas d'une résine positive, le substrat de verre doit, au préalable, être métallisé sur toute sa surface. L'opération de dépôt de la résine photosensible, sous forme liquide, s'effectue par centrifugation au moyen d'une tournette. Le substrat est maintenu par aspiration sur un support solidaire du plateau en rotation. Cette opération, également appelée laquage, s'effectue dans une pièce inactinique. L'épaisseur finale de la couche de résine est principalement fonction de la quantité de résine déposée sur l'échantillon, de sa viscosité et des conditions de rotation. Les paramètres choisis (vitesse : 3500 tours/mn, accélération : 1000 tours/mn/s, temps : 30 s) conduisent à des épaisseurs de résine de l'ordre de 400nm. La résine photosensible, visqueuse après son étalement sur le verre, est alors durcie sur une plaque chauffante à 100°C pendant huit minutes afin d'éliminer les solvants. Le verre recouvert de résine est ensuite insolé quatre secondes à travers un masque représentant le motif des électrodes. Ces masques, fabriqués au LAAS à Toulouse, sont directement gravés sur des plaques de verre chromées. Le rayonnement UV entraîne une rupture des chaînes, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur. Le verre recouvert de résine insolée est plongé trente secondes dans un mélange basique aqueux de façon à n'éliminer que la résine insolée. Il est ensuite placé sur une plaque chauffante à 120°C pendant 10 minutes afin que la résine non-insolée polymérise. Après avoir laissé refroidir le verre, les zones non protégées par la résine polymérisée sont gravées par attaque acide. Le mélange utilisé est constitué de 77% d'acide phosphorique, 9,5% d'acide nitrique et de 13,5% d'eau. Les restes de résine sont ensuite éliminés à l'aide d'acétone. L'aluminium résiste à tous les produits utilisés dans ce protocole, sans être altéré.

L'ensemble de ces opérations est effectué à Toulouse, dans les locaux de l'AIME.

La *Figure III.27* représente un capteur simplifié à électrodes interdigitées, déposées par évaporation thermique sous vide, selon le protocole précédemment décrit.

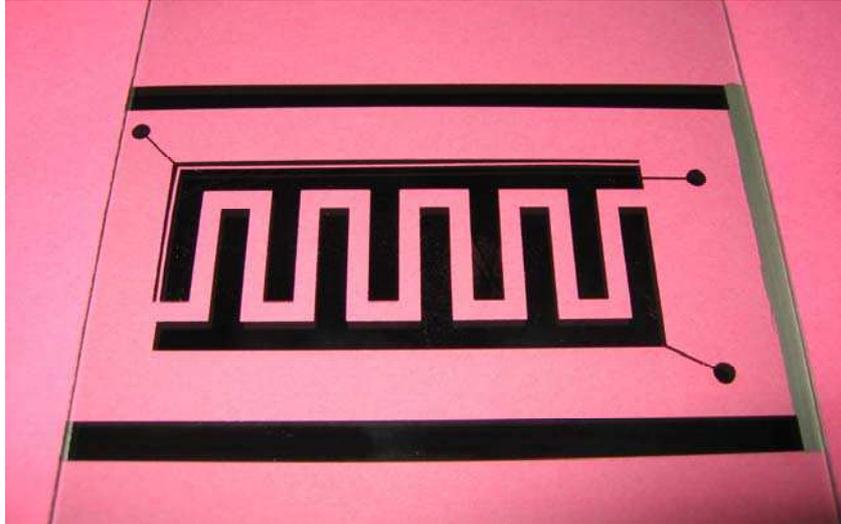


Figure III. 27: capteur simplifié à électrodes interdigitées déposées par évaporation thermique sous vide

Ce dernier procédé de fabrication permet d'obtenir la meilleure précision sur les dimensions des électrodes. Des mesures au microscope optique révèlent une précision de $\pm 3\mu\text{m}$.

Dans la mesure du possible (les capteurs étant réalisés au LAAS à Toulouse), nous privilégions cette méthode pour la fabrication des capteurs. En outre, la réalisation en couches minces semble plus appropriée car elle permet de faciliter l'intégration du capteur au sein du pare-brise. Notons à ce propos que les électrodes du capteur devront être transparentes pour ne pas gêner la vision du conducteur.

VII. Conclusion

Des simulations numériques, dont le principe repose sur la méthode des éléments finis, ont permis de déterminer le dimensionnement des capteurs conduisant à l'égalité des capacités en condition sèche (à 1kHz). Ce dimensionnement est valable quel que soit le verre utilisé (*Clear*, *Light* ou *Dark*) pour la confection des pare-brises. Deux motifs d'électrodes sont étudiés : électrodes linéaires et électrodes interdigitées. Le capteur complet n'étant pas réalisable au laboratoire, une variante simplifiée du capteur (sans PVB ni électrode garde) est simulée puis fabriquée dans le but de valider expérimentalement ses performances. Ces travaux ont fait l'objet de deux rapports industriels pour PSA [Bor03¹] [Bor03²] et de la conférence Eurosensors XVIII [Bor04²].

Il nous faut maintenant s'assurer de la sensibilité des capteurs à la présence d'eau. Une étude par simulation numérique permettra dans un premier temps de vérifier l'influence de l'eau sous diverses formes (film uniforme et gouttes d'eau de volumes variables) sur les capacités. Des mesures seront ensuite effectuées sur les capteurs simplifiés, en condition sèche puis en présence de gouttes d'eau. Les résultats permettront de statuer sur la validité et les limites de détection de chacun des capteurs étudiés.

Bibliographie

[ANS] ANSYS 7.0 Documentation

[Bor03¹] I. Bord, P. Tardy, F. Ménil, *Capteurs capacitifs d'humidité pour pare-brise : Détermination des paramètres clés par simulation numérique 2D*, Rapport d'avancement 1° Phase, Contrat PSA /IXL (janvier 2003)

[Bor03²] I. Bord, P. Tardy, F. Ménil, *Capteurs capacitifs d'humidité pour pare-brise : Détermination des paramètres clés par simulation numérique 3D*, Rapport final 1° Phase, Contrat PSA /IXL (novembre 2003)

[Bor04²] I. Bord, P. Tardy, F. Ménil, *Dimensioning and first tests of a differential capacitive humidity sensor*, Eurosensors XVIII, Rome, Italie, 12-15 Septembre 2004, 708-709

[Bro96] J.W. Brown, R.V. Churchill, *Complex Variables and Applications*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1996, pp 326-346

[Cha92] Y. Chable, *Circuits hybrides à couches épaisses*, Masson, Paris, 1992

[End91] E. Endres, S. Drost, *Optimization of the geometry of gas-sensitive interdigital capacitors*, Sensors and Actuators B Vol.4 (1991) 95-98

[Fen05] T. Fen-Chong, A. Fabbri, *Freezing and thawing porous media : experimental study with a dielectric capacitive method*, Comptes Rendus de Mécanique 333 (2005) 425-430

[Igr04] R. Igreja, C.J. Dias, *Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure*, Sensors and Actuators A 112 (2004) 291-301

[Mam04] A.V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, M. Zahn, *Interdigital sensors and transducers*, Proceedings of the IEEE 92, No 5 (2004) 808-845

- [Ong00] K.G. Ong, C.A. Grimes, *A resonant printed-circuit sensor for remote query monitoring of environmental parameters*, Smart Mater. Struct. 9 (2000) 421-428
- [Psa03] PSA, *Communication privée*, 2003
- [Tsa05] E.D. Tsamis, J.N. Avaritsiotis, *Design of planar capacitive type sensor for “ water content” monitoring in a production line*, Sensors and Actuators A 118 (2005) 202-211
- [Ven99] O.G. Vendik, S.P. Zubko, M.A. Nikol'skii, *Modeling and calculation of the capacitance of a planar capacitor containing a ferroelectric thin film*, Technical Physics Vol.44 No 4 (1999) 349-355
- [Wal93] F.A. Waldman et al. (Axiomatics Corp), (USA), *Apparatus and methods for measuring the dielectric constant and geometric properties of materials*, , US Patent 5223796, 38 pp, 29 Jun, (1993)
- [Wan03] Y. Wang, Y.L. Cheng, Y.W. Zhang, H.L.W. Chan, C.L. Choy, *Dielectric behaviors of lead zirconate titanate ceramics with coplanar electrodes*, Materials Science and Engineering B99 (2003) 79-82
- [Zar88] M.C. Zaretsky, L. Mouayad, J.R. Melcher, *Continuum properties from interdigital electrode dielectrometry*, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.23 No 6 (1988) 897-917

CHAPITRE IV

Influence de l'eau sur les capacités du capteur : étude par simulation numérique et validation expérimentale

I. Introduction.....	133
II. Cas simple : étude de l'influence d'un film d'eau par simulation numérique.....	134
II.1. Variation des capacités en présence d'un film d'eau	134
II.2. Comparaison des configurations complète et simplifiée.....	136
II.2.a. Electrodes linéaires	136
II.2.b. Electrodes interdigitées.....	137
II.3. Influence de l'électrode de garde.....	141
III. Cas réel : étude de l'influence de gouttes d'eau par simulation numérique et validation expérimentale	146
III.1. Capteurs à électrodes linéaires	147
III.1.a. Etude par simulation numérique.....	147
III.1.b. Validation expérimentale	150
III.2. Capteurs à électrodes interdigitées.....	153
III.2.a. Etude par simulation numérique.....	153
III.2.b. Validation expérimentale	154
III.2.c. Origine du manque de sensibilité	156
IV. Conclusion	162
Bibliographie	165

I. Introduction

L'objectif de ce travail consiste à étudier l'influence de l'eau sous diverses formes (film uniforme et gouttes de volumes variables) sur les capacités en fonction de la configuration du capteur (électrodes linéaires -*Figure III.11*- ou interdigitées -*Figure III.12*-, capteur complet -*Figure III.13*- ou simplifié -*Figure III.14*-). Quelle que soit sa configuration, le capteur doit satisfaire les deux conditions suivantes :

- l'égalité des capacités en condition sèche : $C_1 = C_2$,
- une variation relative maximale de la capacité sensible C_1 et une variation relative minimale (idéalement nulle) de la capacité de référence C_2 en présence d'eau.

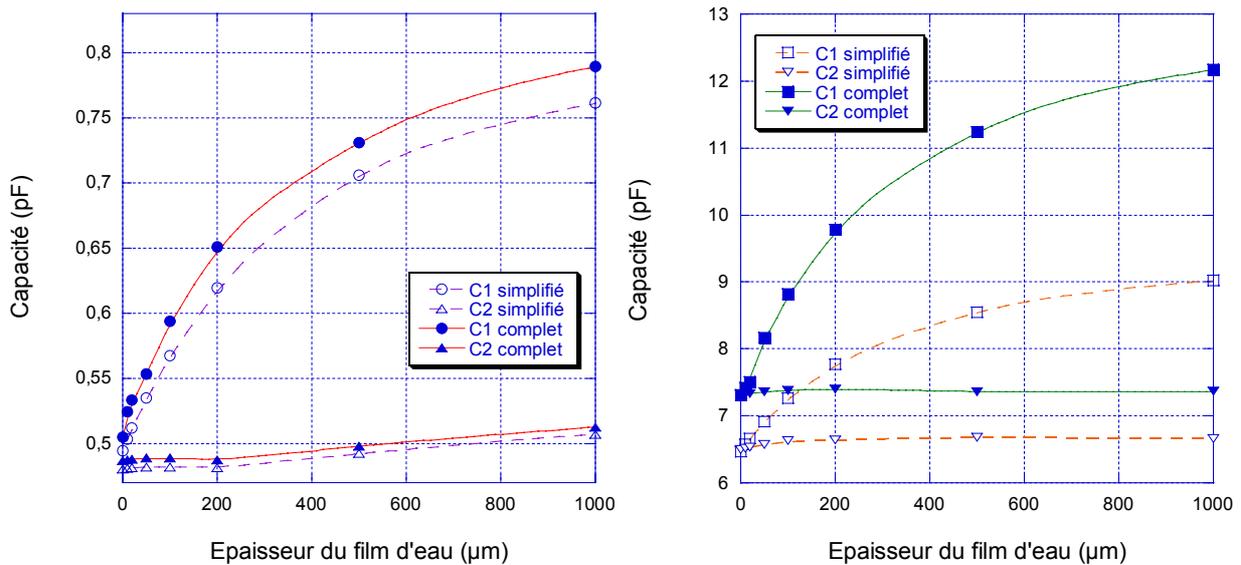
Le premier point a été vérifié numériquement au chapitre précédent. L'étape suivante consiste donc à s'assurer de la sensibilité du capteur à l'eau. Cette sensibilité est d'abord évaluée par simulation numérique, sur chacune des configurations du capteur. Des mesures de capacités sont ensuite effectuées sur les capteurs simplifiés, en condition sèche, puis en présence de gouttes d'eau. Comme nous l'avons expliqué au chapitre précédent, toutes les configurations du capteur ne peuvent pas être testées expérimentalement. Les capteurs complets n'étant pas réalisables au laboratoire qui ne dispose pas des moyens d'assemblage verre/PVB/verre, seuls les résultats numériques relatifs aux capteurs simplifiés pourront être comparés aux mesures. Si ces dernières concordent avec les simulations, cet accord sera, selon toute vraisemblance, également vérifié pour les capteurs complets, ce qui permettra de valider l'ensemble des simulations. A l'issue de cette étude, nous aurons une idée plus précise des performances et des limites de détection de chacune des configurations du capteur, ce qui permettra d'orienter le choix du motif d'électrodes (linéaires ou interdigitées) à retenir pour le capteur final.

II. Cas simple : étude de l'influence d'un film d'eau par simulation numérique

II.1. Variation des capacités en présence d'un film d'eau

Dans un premier temps, nous considérons un film d'eau recouvrant toute la surface du capteur (*Figure III.10*). La modélisation de la pluie par une couche d'eau continue et uniforme d'épaisseur variable permet d'évaluer rapidement la sensibilité de chacune des configurations du capteur. Dans ces simulations, nous faisons varier l'épaisseur du film d'eau dans un intervalle suffisamment large : [10 à 1000 μm]. Le résultat de ces simulations est présenté :

- *Figure IV.1(a)* : pour les capteurs complet et simplifié à électrodes linéaires,
- *Figure IV.1(b)* : pour les capteurs complet et simplifié à électrodes interdigitées.



(a) capteurs à électrodes linéaires

(b) capteurs à électrodes interdigitées

Figure IV. 1 : influence de l'épaisseur d'un film d'eau sur les capacités (a) des capteurs complet et simplifié à électrodes linéaires et (b) des capteurs complet et simplifié à électrodes interdigitées

En condition sèche, les capacités C_1 et C_2 sont équilibrées pour chacune des configurations du capteur. En présence d'un film d'eau, la capacité sensible C_1 augmente significativement avec l'épaisseur du film, alors que la capacité de référence C_2 est très peu affectée, quelle que soit la configuration du capteur. Au-delà d'une épaisseur d'eau de 200 μm , la capacité C_2 des

capteurs à électrodes linéaires augmente légèrement avec l'épaisseur du film. Cette variation reste cependant négligeable par rapport à celle de C_1 .

Afin d'étudier la sensibilité à l'eau des différentes configurations du capteur, nous nous intéressons à la variation relative $\frac{\Delta C}{C}$ des capacités C_1 et C_2 , donnée par :

$$\frac{\Delta C}{C} = \left(\frac{C_{eau} - C_{sec}}{C_{sec}} \right) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

où C_{eau} représente la capacité en présence d'eau et C_{sec} la capacité en condition sèche.

L'évolution de la variation relative de la capacité sensible C_1 en présence d'un film d'eau d'épaisseur variable [10 à 1000 μm] est présentée *Figure IV.2* pour chacune des quatre configurations du capteur. La variation relative de la capacité de référence C_2 n'est pas présentée car elle reste négligeable par rapport à la variation de C_1 quelle que soit l'épaisseur du film d'eau ($\frac{\Delta C_2}{C_2} < 8\%$).

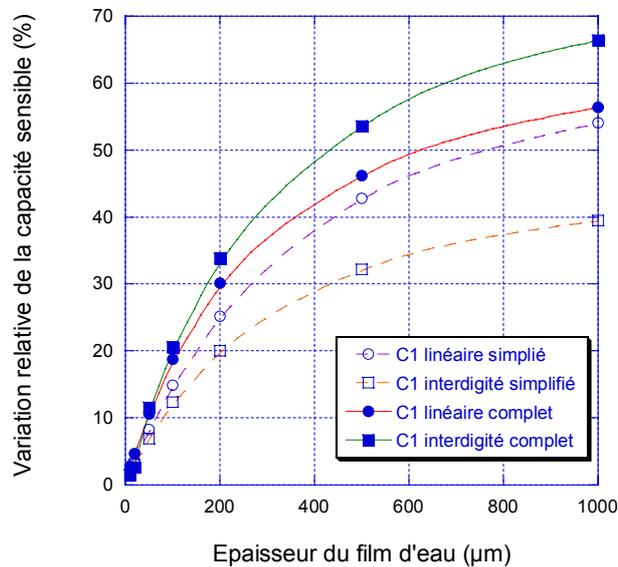


Figure IV. 2 : influence de l'épaisseur d'un film d'eau sur la variation relative de la capacité sensible pour chaque configuration du capteur

Globalement, toutes les configurations du capteur voient leur capacité sensible C_1 s'accroître de façon significative en présence d'eau.

Parmi les configurations du capteur étudiées, le capteur complet à électrodes interdigitées présente la meilleure sensibilité, dès une épaisseur d'eau de $40\mu\text{m}$. Un film de seulement $50\mu\text{m}$ d'épaisseur provoque une variation relative de C_I supérieure à 10%. Pour les plus faibles épaisseurs d'eau ($\leq 40\mu\text{m}$), c'est le capteur complet à électrodes linéaires qui conduit à une variation maximale de la capacité sensible. Bien que le capteur simplifié à électrodes interdigitées semble être le moins performant, la variation relative de C_I en présence d'un film d'eau de $50\mu\text{m}$ d'épaisseur reste malgré tout suffisante pour être détectée ($\approx 7\%$).

A ce stade de l'étude, il est imprudent de conclure quant au motif d'électrodes le plus sensible car les simulations des capteurs à électrodes linéaires et interdigitées ne sont pas effectuées exactement dans les mêmes conditions. En raison d'un nombre de nœuds limité par la version du logiciel que nous utilisons, les simulations des capteurs à électrodes interdigitées sont parfois réalisées sans modéliser de domaine de Trefftz. Des simulations en 2D montrent que les résultats obtenus avec et sans éléments infinis, conduisent à des résultats similaires. Il est donc intéressant et souvent nécessaire pour certains calculs lourds en 3D, de se passer de l'environnement électrostatique du capteur afin de limiter la taille des structures à modéliser. Notons que cette simplification reste tout à fait acceptable dans la mesure où les résultats numériques des simulations ne fournissent que des valeurs indicatives.

Afin d'analyser les différences de sensibilité observées *Figure IV.2*, nous allons comparer les deux configurations du capteur, complète et simplifiée, pour chaque motif d'électrodes.

II.2. Comparaison des configurations complète et simplifiée

II.2.a. Electrodes linéaires

Les deux configurations du capteur à électrodes linéaires ont la même valeur de capacité en condition sèche ($\approx 0,5\text{pF}$). Pourtant, le capteur complet présente une variation liée à la présence d'eau supérieure à celle du capteur simplifié.

II.2.b. Electrodes interdigitées

Parmi les deux configurations du capteur à électrodes interdigitées étudiées, le capteur complet présente également une meilleure sensibilité à l'eau. Cependant, dans ce cas, la valeur des capacités en condition sèche est différente, ce qui implique inéluctablement des variations relatives différentes.

Outre la valeur de la capacité, la longueur L_E des électrodes conduisant à l'égalité des capacités en condition sèche est différente.

Afin de comparer la sensibilité des deux configurations du capteur à électrodes interdigitées, nous allons ajuster chacun de ces paramètres.

- **Comparaison des deux configurations à surface active égale**

Nous définissons par surface active, la surface du capteur sur laquelle l'eau provoque une variation de la capacité sensible. Cette surface, représentée *Figure IV.3* pour les capteurs à électrodes interdigitées, correspond à la surface couverte par les électrodes, étirée de $\frac{\lambda}{3} \approx 5\text{mm}$ de chaque côté (λ représente la longueur d'onde spatiale du réseau périodique). En effet, il a été montré lors d'études précédentes [Zar88], que seul le diélectrique situé dans une région de $\frac{\lambda}{3}$ du plan de électrodes était sous influence du champ électrique généré par les électrodes interdigitées.

La longueur L_E des électrodes conduisant à l'égalité des capacités en condition sèche étant différente pour les configurations complète et simplifiée du capteur à électrodes interdigitées, leur surface active est également différente.

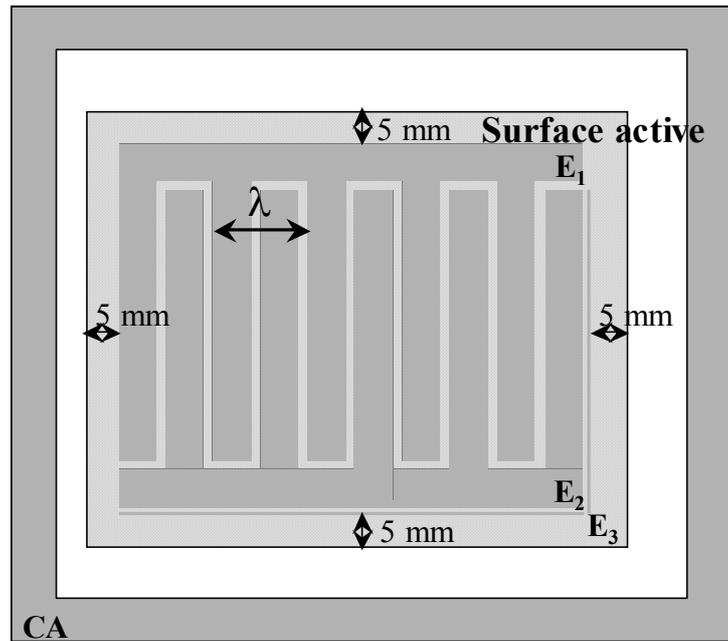


Figure IV. 3 : surface active du capteur à électrodes interdigitées

Nous cherchons à comparer la sensibilité des configurations complète et simplifiée du capteur à électrodes interdigitées à surface active S égale. Pour cela, de nouvelles simulations sont effectuées sur ces deux configurations en faisant varier leur surface active entre $S = 3032\text{mm}^2$ (surface active du capteur simplifié à électrodes interdigitées) et $S = 4538\text{mm}^2$ (surface active du capteur complet à électrodes interdigitées). La surface active est ajustée en jouant seulement sur la longueur L_E des électrodes. Les autres paramètres dimensionnels (largeurs, écartements entre électrodes, ...) ne sont pas modifiés.

L'évolution de C_I en fonction de S est tracée *Figure IV.4(a)*, pour les deux configurations du capteur, en condition sèche et en présence d'un film d'eau de $200\mu\text{m}$ d'épaisseur. L'évolution de $\frac{\Delta C_I}{C_I}$ est représentée *Figure IV.4(b)*.

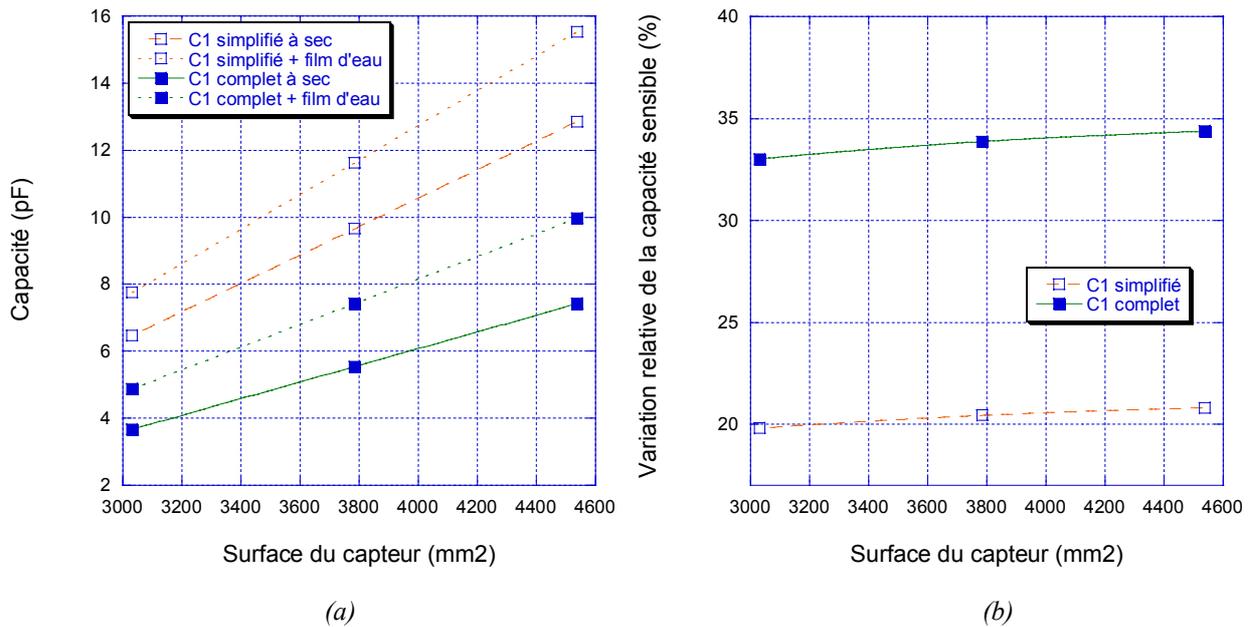


Figure IV. 4 : influence de la surface active des capteurs à électrodes interdigitées sur (a) la capacité sensible en condition sèche et en présence d'un film d'eau de 200µm d'épaisseur et sur (b) la variation relative de C_1

La capacité sensible augmente avec la surface active du capteur. A surface active égale, le capteur complet est nettement plus sensible à l'eau que le capteur simplifié. Quelle que soit la configuration du capteur à électrodes interdigitées, plus la surface active est grande, plus la variation relative de C_1 en présence d'eau est importante. Cette augmentation s'avère d'ailleurs plus rapide dans le cas du capteur complet.

- **Comparaison des deux configurations à capacité sensible égale**

Le *Tableau IV.1* présente la variation relative de la capacité sensible C_1 pour les configurations complète et simplifiée du capteur à électrodes interdigitées, à capacité sensible égale. D'après la *Figure IV.4(a)*, nous choisissons par exemple $C_1 = 6,43\text{pF}$.

Configuration du capteur (C_1 à sec = 6,43pF)	Surface active du capteur	Capacité C_1 avec un film d'eau (200 μ m)	Variation relative de C_1
Capteur simplifié	3031mm ²	7,72pF	20,06%
Capteur complet	4151mm ²	8,61pF	33,90%

Tableau IV. 1 : variation relative de C_1 pour les configurations complète et simplifiée du capteur à électrodes interdigitées à capacité sensible égale ($C_1 = 6,43pF$)

Comme pour les capteurs à électrodes linéaires, la variation relative de la capacité sensible liée à la présence d'eau est nettement supérieure pour le capteur complet.

Ainsi, pour un même motif d'électrodes (linéaires ou interdigitées), que ce soit à surface active ou à capacité à sec égales, la configuration complète du capteur présente toujours une meilleure sensibilité à l'eau que la configuration simplifiée.

- **Analyse des résultats**

Au chapitre III, lors de la phase de dimensionnement des capteurs, nous avons déjà remarqué que les longueurs des électrodes conduisant à l'égalité des capacités, étaient très différentes suivant la configuration du capteur (simplifiée ou complète). Avec les longueurs retenues pour les électrodes linéaires du capteur complet ($L_{E_1} = L_{E_2} = 22\text{mm}$ conduisant à $C_1 = C_2 = 0,50\text{pF}$), les capacités du capteur simplifié à électrodes linéaires ne sont non seulement plus équilibrées, mais aussi significativement augmentées, en particulier la capacité sensible ($C_1 = 1,04\text{pF}$ et $C_2 = 0,53\text{pF}$). Un phénomène similaire est observé pour le capteur à électrodes interdigitées.

Bien que le film de PVB, l'électrode de garde et le second feuillet de verre, présents dans la configuration complète du capteur, mais absents de la configuration simplifiée, soient situés sous la zone de détection, ces éléments ont une influence notable sur la valeur des capacités et donc sur la sensibilité des capteurs vis-à-vis de l'eau. Intéressons nous à l'influence respective de chacun de ces éléments :

- le second feuillet de verre, localisé sous l'électrode de garde, n'a pas d'incidence sur la valeur des capacités. Des simulations numériques ont permis de vérifier ce point. L'électrode de garde écran totalement le capteur des influences intérieures, assurant ainsi à la fois un blindage électromagnétique et un caractère directionnel à la détection.
- le film de PVB influe sur la valeur des capacités par le biais de sa permittivité diélectrique, environ quatre fois supérieure à celle de l'air ($\epsilon'_{PVB} = 3,85$ à 1kHz à 20°C). Dans ce cas, nous devrions constater une augmentation des capacités du capteur complet. Mais c'est le contraire qui est observé.
- la raison du décalage semble donc incomber à l'électrode de garde. C'est ce que nous nous proposons de vérifier dans la suite de l'étude.

II.3. Influence de l'électrode de garde

Afin de comprendre l'influence de l'électrode de garde sur la valeur des capacités, de nouvelles simulations sont effectuées sur le capteur complet à électrodes linéaires (*Figure IV.5*) auquel nous enlevons l'électrode de garde (*Figure IV.6*). Dans ces simulations, les dimensions des autres électrodes sont conservées.

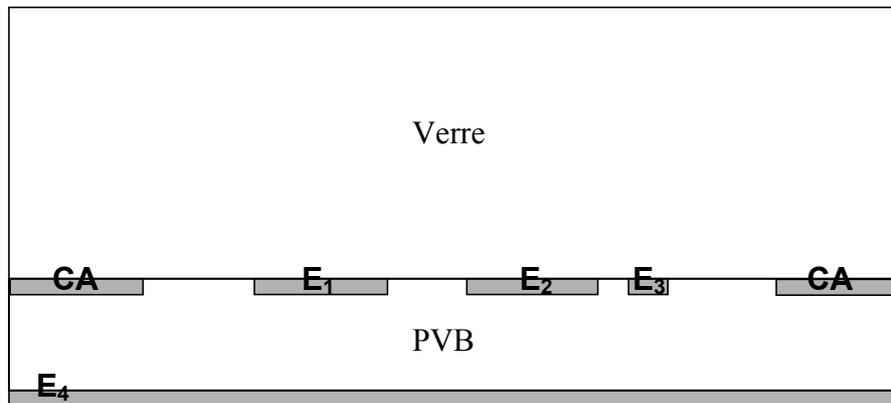


Figure IV. 5 : vue en coupe du capteur complet

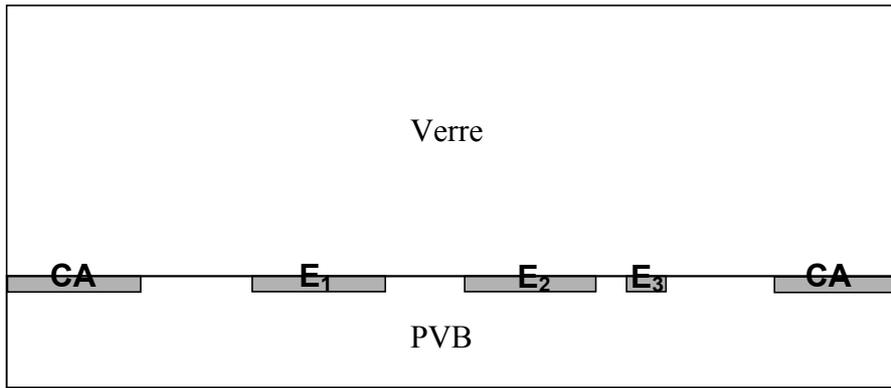


Figure IV. 6 : vue en coupe du capteur sans électrode de garde

L'évolution des capacités C_1 et C_2 du capteur à électrodes linéaires sans électrode de garde en fonction de l'épaisseur du film d'eau [10 à 1000 μm] est présentée Figure IV.7. Les résultats de simulation obtenus avec l'électrode de garde sont reportés pour comparaison.

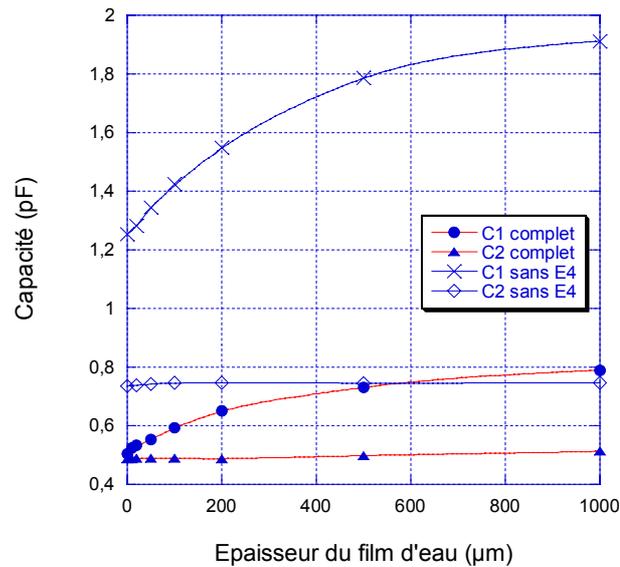


Figure IV. 7 : influence de l'épaisseur d'un film d'eau sur les capacités des capteurs à électrodes linéaires complet et sans électrode de garde

D'après la Figure IV.7, l'absence d'électrode de garde conduit à une augmentation notable des capacités, en particulier de la capacité sensible (d'où un déséquilibre des capacités en condition sèche). Une telle influence de l'électrode de garde a déjà été observée dans des travaux antérieurs [Tsa05].

Bien que la méthode des capacités partielles, exposée au chapitre III, soit insuffisante pour calculer les capacités du capteur complet, elle permet néanmoins de dégager des tendances et de comprendre l'influence de l'électrode de garde. Appliquons cette méthode aux deux configurations précédentes du capteur, dont les schémas électriques équivalents sont représentés :

- *Figure IV.8(a)* : capacité du capteur complet (avec électrode de garde),
- *Figure IV.8(b)* : capacité du capteur sans électrode de garde.

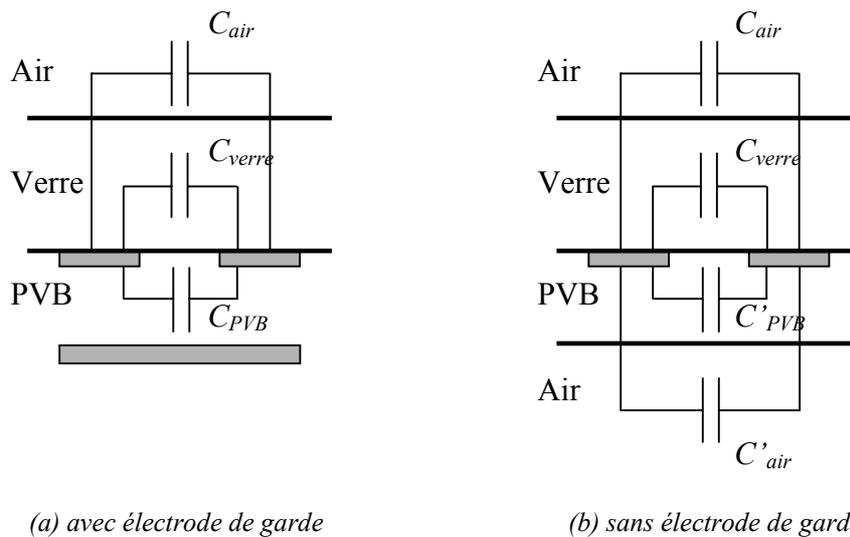


Figure IV. 8 : schémas électriques équivalents à la capacité sensible du capteur (a) avec et (b) sans électrode de garde

Dans la suite de l'étude, $C_{(a)}$ représente la capacité sensible avec électrode de garde et $C_{(b)}$ la capacité sensible sans électrode de garde.

En présence d'une électrode de garde (*Figure IV.8(a)*), les lignes de champs s'étendent dans le verre et l'air situés au-dessus des électrodes, ainsi que dans le PVB situé au-dessous. L'électrode de garde écrante le feuillet de PVB de toute influence extérieure. Dans ce cas, la capacité $C_{(a)}$ est la somme de trois capacités partielles :

$$C_{(a)} = C_{air} + C_{verre} + C_{PVB} \tag{2}$$

En l'absence d'électrode de garde (*Figure IV.8(b)*), le volume de diélectrique influencé par le champ électrique entre les électrodes augmente. Les lignes de champ s'étendent maintenant

dans l'air situé sous le feuillet de PVB. La capacité $C_{(b)}$ est donc la somme de quatre capacités partielles :

$$C_{(b)} = C_{air} + C_{verre} + C'_{PVB} + C'_{air} \quad (3)$$

En calculant chacune des capacités partielles par la méthode des transformations conformes (cf. chapitre III, paragraphe III.2), nous constatons que :

$$C_{PVB} < C'_{PVB} + C'_{air} \quad (4)$$

ce qui implique que :

$$C_{(a)} < C_{(b)} \quad (5)$$

L'électrode de garde limite le volume de diélectrique sous influence du champ électrique généré par les électrodes, ce qui provoque une diminution de la capacité.

Bien que l'électrode de garde influe sur les deux capacités C_1 et C_2 du capteur, la capacité sensible C_1 est la plus affectée, puisque la profondeur de pénétration des lignes de champ est directement liée à l'écartement entre les électrodes.

Intéressons nous maintenant à l'influence de l'électrode de garde en présence d'eau. D'après la *Figure IV.7*, le comportement du capteur sans électrode de garde vis-à-vis de l'eau est analogue à celui du capteur complet : la capacité sensible C_1 augmente avec l'épaisseur du film d'eau alors que la capacité de référence C_2 reste stable.

Afin d'étudier l'influence de l'électrode de garde sur la sensibilité des capteurs, nous calculons $\frac{\Delta C_1}{C_1}$ pour les deux configurations du capteur à électrodes linéaires, en présence d'un film d'eau d'épaisseur variable [10 à 1000 μ m]. Les résultats de ces calculs sont présentés *Figure IV.9*.

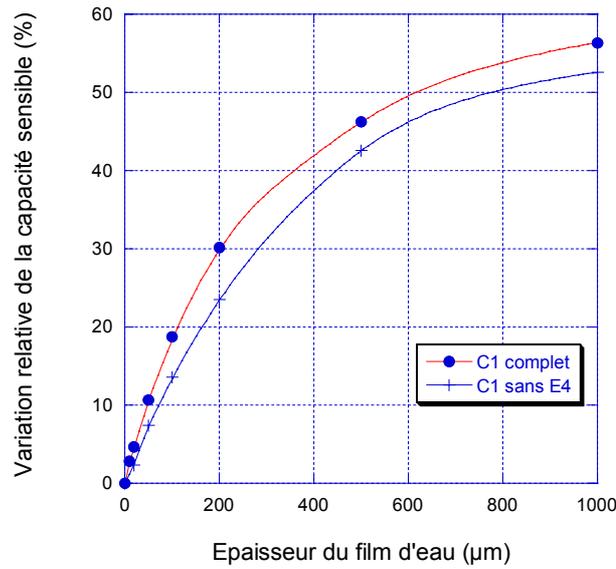


Figure IV.9 : influence de l'épaisseur d'un film d'eau sur la variation relative de la capacité sensible des capteurs à électrodes linéaires complet et sans électrode de garde

D'après la Figure IV.9, le capteur complet présente une meilleure sensibilité à l'eau.

Reprenons la Figure IV.8. à laquelle nous ajoutons un film d'eau (entre le verre et l'air) à chacune des configurations (a) et (b). En utilisant la méthode des capacités partielles, les capacités $C_{(a)}$ (avec électrode de garde) et $C_{(b)}$ (sans électrode de garde) en présence du film d'eau s'écrivent :

$$C_{(a)}(eau) = C''_{air} + C_{eau} + C_{verre} + C_{PVB} \quad (6)$$

$$C_{(b)}(eau) = C''_{air} + C_{eau} + C_{verre} + C'_{PVB} + C'_{air} \quad (7)$$

Les variations relatives des capacités avec et sans électrode de garde, sont calculées à l'aide de la formule (1) :

$$\frac{\Delta C_{(a)}}{C_{(a)}} = \left(\frac{C''_{air} + C_{eau} - C_{air}}{C_{(a)}} \right) \times 100 \quad (8)$$

$$\frac{\Delta C_{(b)}}{C_{(b)}} = \left(\frac{C''_{air} + C_{eau} - C_{air}}{C_{(b)}} \right) \times 100 \quad (9)$$

La variation liée à l'eau (expression du numérateur) est comparable dans les deux cas.

Or $C_{(a)} < C_{(b)}$, ce qui implique que :

$$\frac{\Delta C_{(a)}}{C_{(a)}} > \frac{\Delta C_{(b)}}{C_{(b)}} \quad (10)$$

A capacité à sec égale, la part de la capacité qui varie avec l'eau est donc plus importante pour un capteur comprenant une électrode de garde. C'est pourquoi la configuration complète du capteur conduit à une meilleure sensibilité à l'eau que la configuration sans électrode de garde.

Ce raisonnement s'appuie sur la méthode des capacités partielles qui, rappelons le, s'est avérée insuffisante pour le calcul des capacités du capteur avec électrode de garde. Dans cette méthode, nous considérons que les capacités partielles de part et d'autre des électrodes sont indépendantes, ce qui n'est pas rigoureusement vrai. Mais cette méthode permet malgré tout d'expliquer simplement l'influence de l'électrode de garde sur les variations de capacité.

La modélisation de la pluie sur un pare-brise par un film d'eau continu et uniforme a permis de vérifier rapidement la sensibilité des capteurs à la présence d'eau. Cependant, un tel modèle n'est pas très réaliste. Dans la suite de l'étude, le film d'eau est remplacé par des gouttes.

III. Cas réel : étude de l'influence de gouttes d'eau par simulation numérique et validation expérimentale

La réponse du capteur à la présence d'eau dépend de plusieurs paramètres : le nombre de gouttes, leur taille et leur position sur le capteur. Comme il n'est pas possible, et inutile de surcroît, de traiter tous les cas de figure par simulation numérique, nous ne considérons qu'une seule goutte d'eau, dont nous faisons varier le volume et la position. Cette étude permettra d'appréhender la pertinence et les limites de détection de chacune des configurations du capteur étudiées.

III.1. Capteurs à électrodes linéaires

III.1.a. Etude par simulation numérique

- Influence du volume de la goutte

Dans un premier temps, nous nous intéressons à l'influence du volume V de la goutte d'eau sur le comportement du capteur. Le diamètre D des gouttes de pluie est généralement compris entre 200 et 3000 μm [Erp98]. Le *Tableau IV.2* donne la correspondance entre D , le diamètre de la goutte de pluie lors de sa chute (modèle sphérique) calculé à partir du volume V , et D_i , le diamètre de la goutte étalée après l'impact sur le capteur (modèle de la calotte sphérique pour $D > 1200\mu\text{m}$ et modèle hémisphérique pour $D < 1200\mu\text{m}$ [Mar00]). D_i et h_i , la hauteur de la goutte après l'impact, sont les paramètres dimensionnels de la goutte utilisés lors des simulations numériques. Notons cependant que la forme des gouttes dépend beaucoup de l'état de la surface d'impact.

Dans ces simulations, nous faisons varier le volume de la goutte entre 4,2nl et 20000nl, volumes correspondants aux diamètres évoqués plus haut.

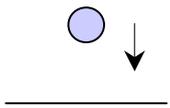
Volume de la goutte V (μl)	0,0042	1,8	4,2	5,0	10,0	15,0	20,0
Diamètre D de la goutte lors de sa chute (μm) 	200	1510	2000	2120	2670	3060	3370
Diamètre D_i de la goutte après l'impact (μm) 	252	2000	2800	3200	5000	6000	7000
Hauteur h_i de la goutte après l'impact (μm)	126	900	1150	1150	1200	1400	1500

Tableau IV. 2 : correspondance entre D le diamètre de la goutte, D_i et h_i , respectivement le diamètre et la hauteur de la goutte après l'impact sur le capteur, pour différents volumes V

Nous choisissons de localiser la goutte à la surface du capteur de façon volontairement favorable (entre les électrodes E_1 et E_2 où son influence sur les lignes de champ de C_1 est maximale), comme indiqué *Figure IV.10*.

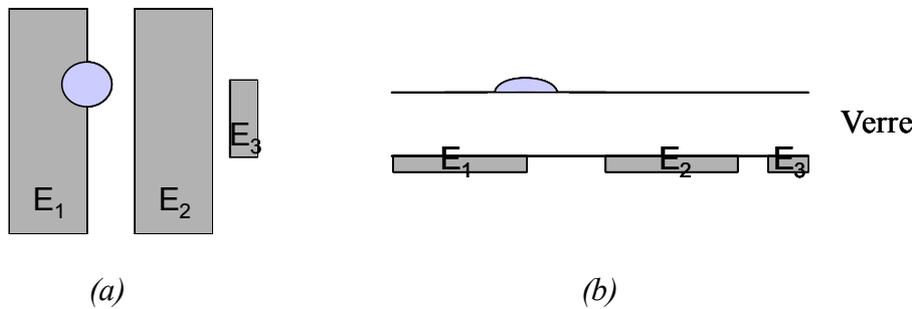


Figure IV. 10 : (a) vue de dessus et (b) vue en coupe de la goutte d'eau sur les capteurs à électrodes linéaires

La variation relative des capacités C_1 et C_2 en présence d'une goutte d'eau de volume variable est présentée *Figure IV.11* pour les configurations simplifiée et complète du capteur à électrodes linéaires.

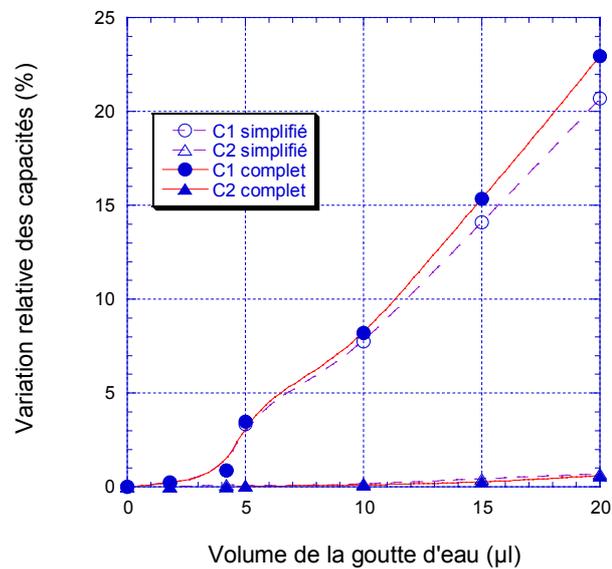


Figure IV. 11 : influence du volume de la goutte d'eau sur la variation relative des capacités des configurations simplifiée et complète du capteur à électrodes linéaires

Pour des gouttes d'eau de volume inférieur à $1,8\mu\text{l}$, aucune variation de la capacité sensible C_1 est observée. Pour des gouttes plus grosses, quelle que soit la configuration du capteur à électrodes linéaires, C_1 augmente avec le volume de la goutte d'eau. Une goutte de seulement

5 μ l engendre une variation relative de C_1 de 3,5%, contre une variation négligeable (0,03%) de C_2 . Pour un volume de goutte supérieur à 5 μ l, la variation de C_1 est légèrement supérieure avec le capteur complet, en raison de la présence de l'électrode de garde.

- **Influence de la position de la goutte**

L'influence de la position de la goutte sur le capteur est ensuite étudiée. Comme pour le capteur à électrodes interdigitées, nous définissons une surface active, représentée *Figure IV.12*.

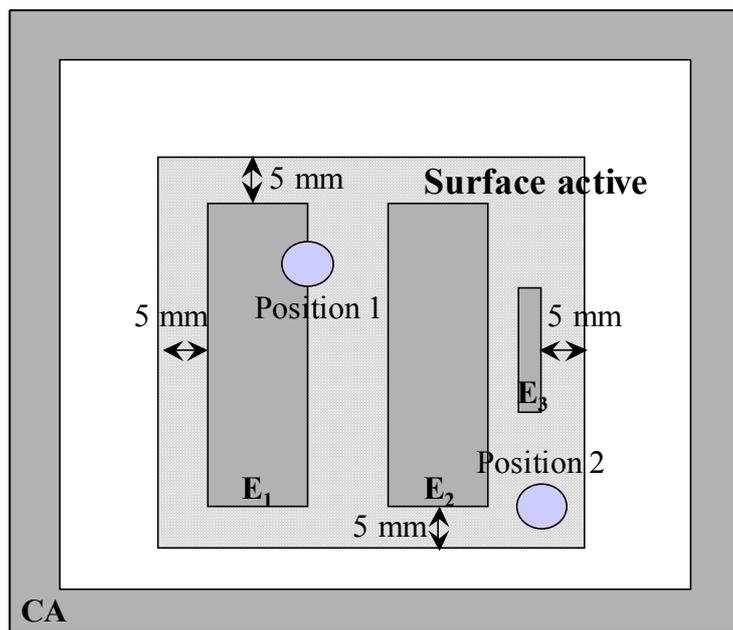


Figure IV. 12 : surface active du capteur à électrodes linéaires et localisation de la goutte d'eau

La position de la goutte précédemment considérée (position 1 de la *Figure IV.12*.) représente a priori un cas favorable pour la sensibilité du capteur. Intéressons nous maintenant à un cas plus défavorable correspondant à une position excentrée par rapport aux électrodes, mais qui reste cependant dans la surface active du capteur (position 2 de la *Figure IV.12*).

Les simulations sont effectuées dans cette nouvelle configuration avec un volume de goutte variable [1,8 à 20 μ l]. Les résultats sont présentés *Figure IV.13*.

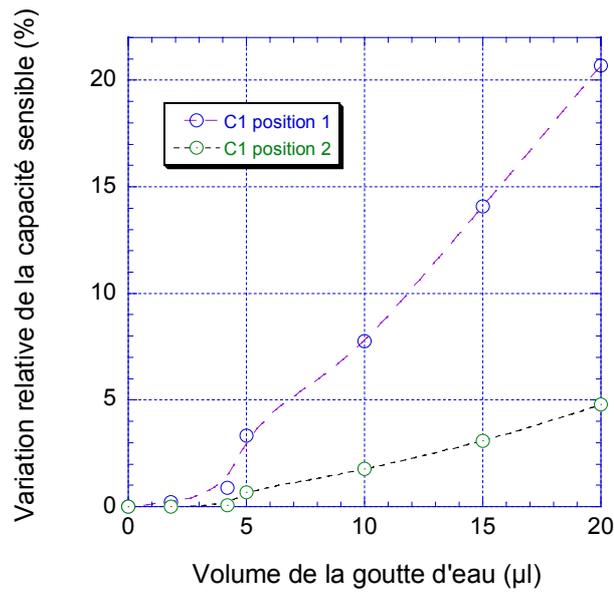


Figure IV. 13 : influence du volume de la goutte d'eau sur la variation relative de la capacité sensible du capteur simplifié à électrodes linéaires pour deux positions différentes de la goutte sur le capteur

Comme prévu, la variation relative de C_1 est supérieure lorsque la goutte est en position 1. En position 2, une variation de 2% nécessite une goutte de 10 μl , mais la sensibilité du capteur reste significative.

III.1.b. Validation expérimentale

Les mesures de capacité sont effectuées à l'aide d'un capacimètre (HP 4284A LCR Meter) dans les mêmes conditions que celles retenues pour les simulations numériques (1kHz, 20°C, 500mV). Les prises de contact sur les électrodes sont réalisées par des pointes de test au niveau des plots prévus à cet effet (Figure III.24). L'ensemble est placé dans une cage de Faraday reliée à la masse. Le montage est schématisé Figure IV.14.

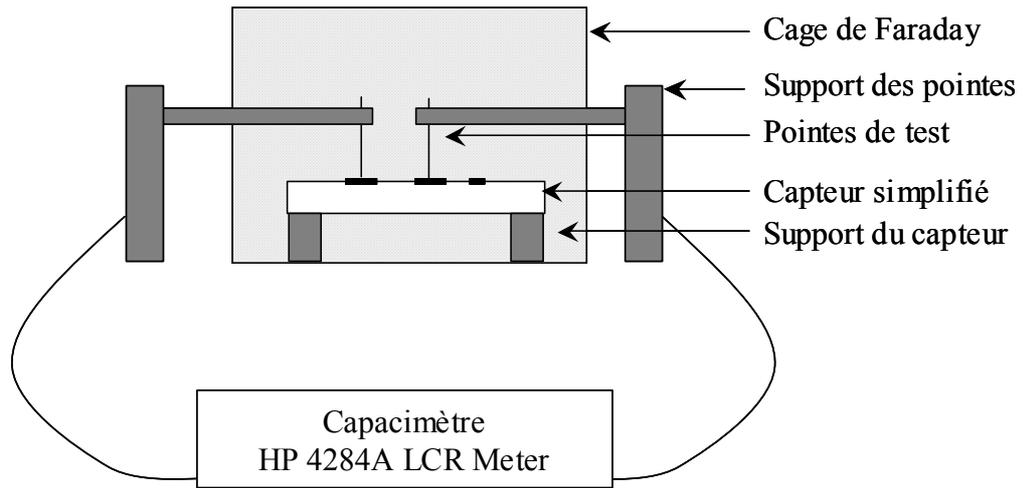


Figure IV. 14 : montage utilisé pour les mesures de capacité

Pour des raisons déjà évoquées, les mesures de capacités sont réalisées sur un capteur simplifié, dont le dimensionnement conduit, d'après les simulations numériques, à $C_1 = C_2 = 0,49\text{pF}$ en condition sèche.

Afin de vérifier l'égalité des capacités, les mesures (incertitude de $\pm 0,05\%$) sont d'abord effectuées en condition sèche, puis en présence d'une goutte d'eau (utilisation d'eau déminéralisée). La goutte est déposée sur le capteur, sur la face opposée aux électrodes, à l'aide d'une micropipette permettant de contrôler le volume de celle-ci.

L'évolution des capacités C_1 et C_2 du capteur simplifié à électrodes linéaires en présence d'une goutte d'eau de volume variable $[1,8 \text{ à } 20\mu\text{l}]$, localisée en position 1 (Figure IV.12), est présentée Figure IV.15. Les résultats de simulation sont reportés pour comparaison.

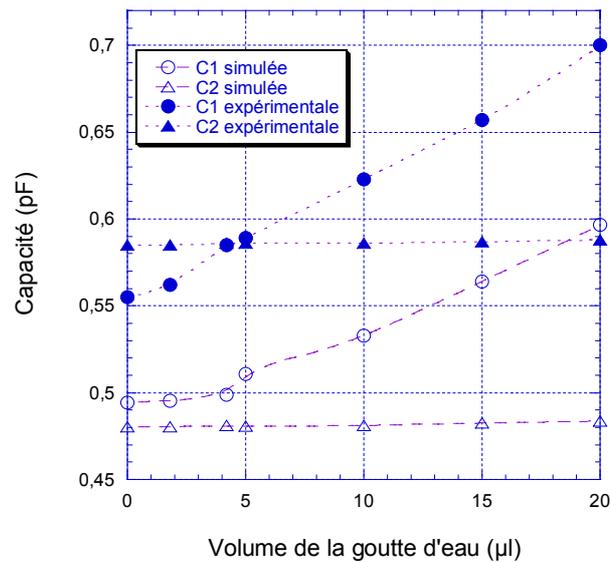


Figure IV. 15 : influence du volume de la goutte d'eau sur les capacités du capteur simplifié à électrodes linéaires obtenues expérimentalement et par simulation numérique

Nous remarquons au premier abord un décalage entre les valeurs simulées et les valeurs expérimentales, tel que $C_{simu} < C_{exp}$, déjà observé lors d'études précédentes [Mar00]. En effet, la méthode des éléments finis (FEM) a tendance à sous-estimer la valeur des capacités, parfois jusqu'à plus de 30%.

Par ailleurs, l'égalité des capacités en condition sèche n'est pas complètement respectée expérimentalement puisque $C_{2exp} > C_{1exp}$. En raison de la petite taille de l'électrode E_3 , la capacité C_2 est probablement affectée par l'incertitude dimensionnelle des électrodes, relative au processus de fabrication des capteurs.

Cependant, **conformément aux résultats de simulation numérique, la capacité sensible C_1 augmente avec le volume de la goutte d'eau, alors que la capacité de référence C_2 reste stable.**

La variation relative de la capacité sensible dans les conditions expérimentales précédentes est présentée Figure IV.16. Les résultats de simulation sont là encore indiqués pour comparaison.

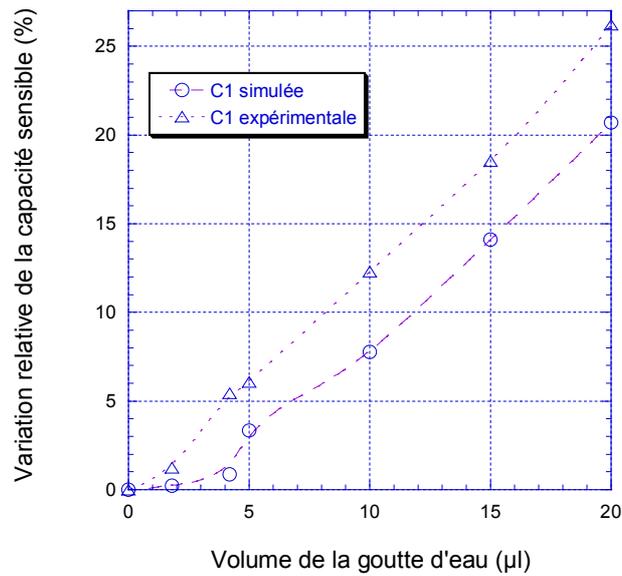


Figure IV. 16 : influence du volume de la goutte d'eau sur la variation relative de la capacité sensible du capteur simplifié à électrodes linéaires obtenue expérimentalement et par simulation numérique

Les variations relatives des capacités expérimentales se révèlent supérieures à celles calculées numériquement. La sensibilité des capteurs à électrodes linéaires est donc confirmée expérimentalement avec une goutte d'eau.

Intéressons nous maintenant aux capteurs à électrodes interdigitées.

III.2. Capteurs à électrodes interdigitées

III.2.a. Etude par simulation numérique

Les simulations numériques sont effectuées sur les deux configurations du capteur à électrodes interdigitées avec une goutte d'eau de volume variable $[1,8 \text{ à } 20\mu\text{l}]$, positionnée au centre du capteur, comme indiqué *Figure IV.17(b)*. Les résultats sont présentés dans le *Tableau IV.3.* pour le volume maximal de la goutte ($20\mu\text{l}$).

	Capteur simplifié	Capteur complet
$\frac{\Delta C_I}{C_I}$ avec une goutte de 20 μ l	1,05%	1,2%

Tableau IV. 3 : variation relative de C_I pour les deux configurations du capteur à électrodes interdigitées en présence d'une goutte d'eau de 20 μ l

Bien que la position centrale de la goutte (de volume maximal de 20 μ l) représente a priori un cas favorable pour la sensibilité du capteur, seule une très faible variation de la capacité sensible C_I est observée.

Deux raisons peuvent expliquer un tel résultat :

- Il est probable qu'un problème de maillage soit à l'origine de ce résultat. Les capteurs à électrodes interdigitées présentent une surface et donc un volume à mailler beaucoup plus grand que les capteurs à électrodes linéaires. Les différences notables d'ordre de grandeur entre la taille du capteur et celle de la goutte d'eau peuvent générer des distorsions lors du maillage, sources d'erreur dans les calculs. Ces distorsions sont, de plus, amplifiées par des géométries différentes, la goutte étant en partie sphérique et le capteur parallélépipédique. Un maillage localement affiné permettrait de résoudre ce problème, mais la version du logiciel avec laquelle nous travaillons limite le nombre de nœuds à 128000. Il est de plus impossible de réduire la zone d'étude, le capteur ne présentant pas de symétrie.
- Il est également possible que la variation de la capacité sensible soit effectivement très faible et que les simulations numériques les sous-estiment, comme pour le capteur à électrodes linéaires.

Pour éviter de perdre un temps précieux à résoudre les éventuels problèmes de simulation, nous passons directement à la phase expérimentale.

III.2.b. Validation expérimentale

Nous cherchons dans un premier temps à vérifier expérimentalement les résultats surprenants obtenus par simulation numérique en présence d'une goutte d'eau.

Les mesures de capacité sont effectuées sur le capteur simplifié, à l'aide du montage présenté *Figure IV.14*. D'après les simulations numériques, le dimensionnement du capteur conduit à $C_1 = C_2 = 6,48\text{pF}$ en condition sèche. Cependant, nous mesurons des capacités de l'ordre de seulement $5,8\text{pF}$. L'observation des capteurs à la loupe binoculaire révèle quelques rayures sur les électrodes, probablement causées par les pointes de test, qui peuvent générer une modification de la longueur des électrodes et donc des capacités. En effet, la couche d'aluminium, déposée par évaporation thermique sous vide, est très fine ($< 400\text{nm}$) et donc très fragile. Les capacités mesurées sont ainsi sous-estimées.

Une goutte d'eau, dont nous faisons varier le volume [$1,8$ à $20\mu\text{l}$], est ensuite déposée au centre du capteur (*Figure IV.17(b)*).

La variation relative de la capacité sensible en fonction du volume de la goutte est représentée *Figure IV.18*. La variation de C_2 n'est pas présentée car elle reste négligeable quelle que soit le volume de la goutte ($\frac{\Delta C_2}{C_2} \leq 0,02\%$). Les résultats expérimentaux obtenus avec le capteur à électrodes linéaires, dans les mêmes conditions (nouvelle position centrale de la goutte représentée *Figure IV.17(a)*), sont reportés pour comparaison ($\frac{\Delta C_2}{C_2} \leq 0,2\%$).

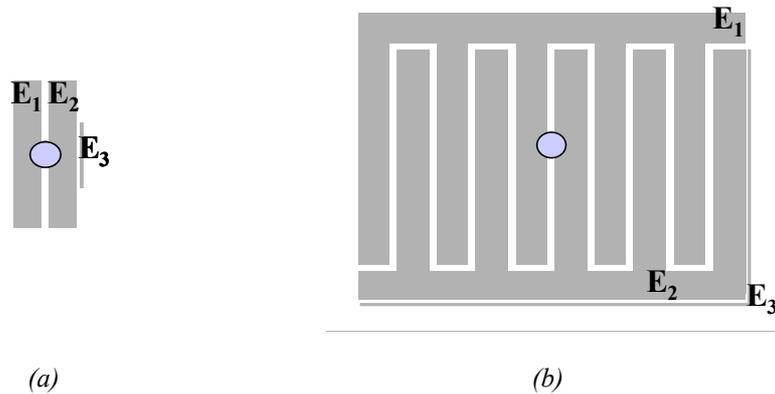


Figure IV. 17 : localisation de la goutte d'eau sur (a) le capteur à électrodes linéaires et sur (b) le capteur à électrodes interdigitées

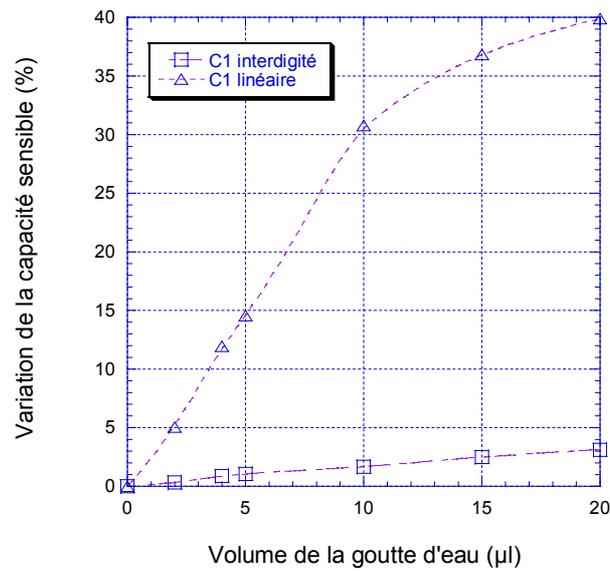


Figure IV. 18 : influence du volume de la goutte d'eau sur la variation relative de la capacité sensible des capteurs simplifiés à électrodes linéaires et interdigitées obtenue expérimentalement

Bien que la variation expérimentale de la capacité sensible en présence d'une goutte d'eau soit supérieure aux résultats de simulation, cette variation reste dérisoire par rapport à celle observée avec le capteur à électrodes linéaires. Notons d'ailleurs que la sensibilité de ce dernier est encore améliorée lorsque la goutte est exactement positionnée entre les électrodes E_1 et E_2 (influence maximale).

III.2.c. Origine du manque de sensibilité

Afin de comprendre l'origine du manque de sensibilité des capteurs à électrodes interdigitées en présence d'une unique goutte d'eau, nous allons comparer les deux motifs d'électrodes en conditions similaires.

- **Surface active différente : influence du nombre de gouttes**

Les capteurs à électrodes linéaires et les capteurs à électrodes interdigitées présentent des surfaces actives différentes. La surface active du capteur à électrodes interdigitées ($S \approx 3032\text{mm}^2$), représentée *Figure IV.3*, est près de sept fois supérieure à celle du capteur à électrodes linéaires ($S = 452\text{mm}^2$), présentée *Figure IV.12*. Dans les mêmes conditions de

pluie, une goutte déposée sur le capteur à électrodes linéaires, correspond statistiquement à sept gouttes sur le capteur à électrodes interdigitées.

Une nouvelle série de mesures est alors effectuée avec sept gouttes de 20 μ l (volume maximal considéré) chacune, déposées une par une sur le capteur, suivant la numérotation de la *Figure IV.19*. Une huitième goutte, excentrée par rapport aux électrodes, mais toujours comprise dans la surface active du capteur, est ajoutée afin de vérifier la sensibilité du capteur lorsqu'une goutte est localisée en position jugée défavorable.

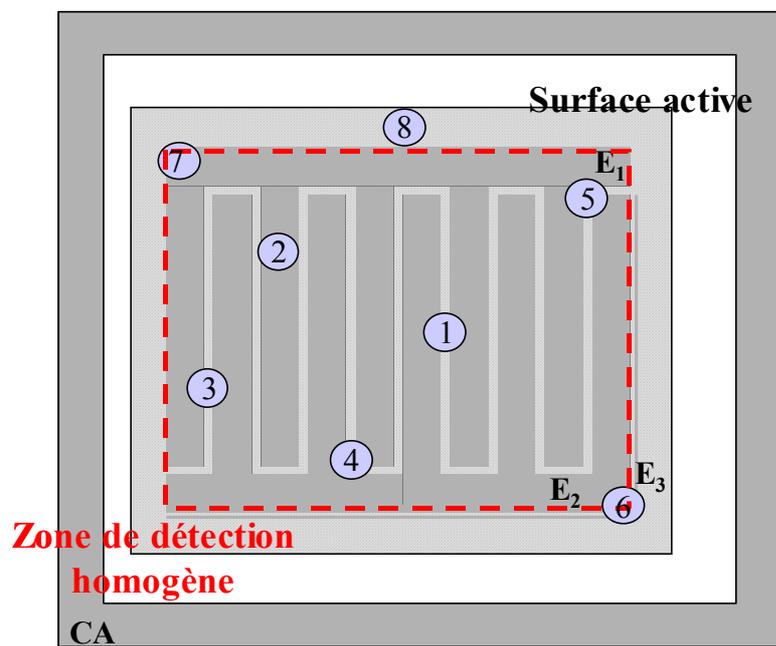


Figure IV. 19 : répartition des sept gouttes d'eau sur le capteur à électrodes interdigitées

Les capacités C_1 et C_2 sont mesurées après le dépôt de chaque goutte. Ces mesures vont permettre d'étudier l'influence du nombre de gouttes sur les capacités mais également l'influence de la position des gouttes sur la surface active du capteur.

Le résultat de ces mesures est présentée *Figure IV.20*.

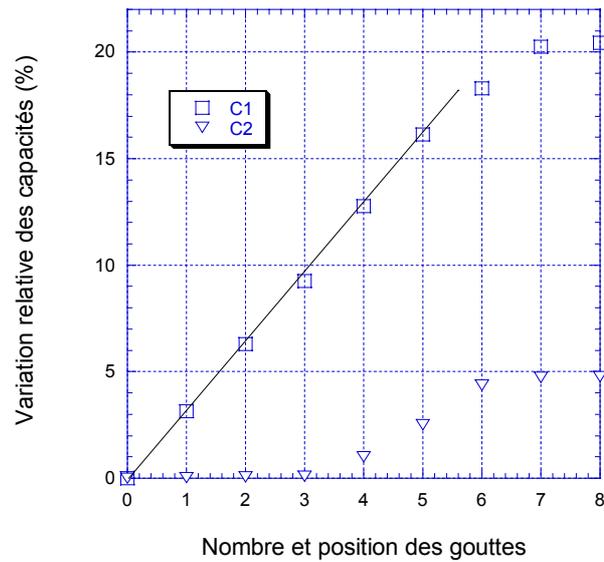


Figure IV. 20 : influence du nombre et de la position des gouttes sur la variation relative expérimentale des capacités

La capacité sensible augmente avec le nombre de gouttes. Cette augmentation est directement liée à la position de la goutte sur le capteur. Nous définissons une zone de détection homogène dans laquelle une goutte de $20\mu\text{l}$ provoque une variation de la capacité sensible d'environ 3%, quelle que soit sa position dans cette zone (position 1 à 5 de la Figure IV.19). Dans cette zone, la variation de C_I augmente donc de façon linéaire avec le nombre de gouttes. En position 6 et 7, la goutte n'est que partiellement comprise dans la zone de détection homogène. De ce fait, la variation relative de la capacité sensible est plus faible mais reste significative ($\approx 2\%$). Enfin, lorsque la goutte est située en position 8, position excentrée par rapport aux électrodes et exclue de la zone de détection homogène, la variation de C_I est négligeable (0,18%). Plus la goutte s'éloigne de la zone de détection homogène et plus la variation de C_I diminue.

Quant à la capacité de référence, la présence de sept gouttes de $20\mu\text{l}$ provoque une variation de près de 5%. Les gouttes 5 et 6 engendrent la plus forte augmentation de la capacité en raison de la proximité avec l'électrode E_3 .

Le Tableau IV.4 rappelle les variations relatives de la capacité sensible mesurées pour chaque motif d'électrodes du capteur simplifié en présence de gouttes d'eau de $20\mu\text{l}$.

Motif des électrodes	Nombre de gouttes (Volume = 20 μ l)	Variation relative de C_1
Electrodes linéaires	1	39,88%
Electrodes interdigitées	1	3,14%
	7	20,25%

Tableau IV. 4 : variation relative de C_1 pour les deux motifs d'électrodes du capteur simplifié en fonction du nombre de gouttes d'eau ($V=20\mu$ l)

Même ramenée à un ratio nombre de gouttes / surface identique, la sensibilité du capteur à électrodes interdigitées reste inférieure à celle du capteur à électrodes linéaires.

- **Capacité à sec différente**

Le capteur à électrodes linéaires présente une capacité en condition sèche beaucoup plus faible que le capteur à électrodes interdigitées. La variation relative de C_1 liée à une même quantité d'eau est donc logiquement plus importante dans le cas du capteur à électrodes linéaires, et devient significative dès un faible volume d'eau.

Nous pouvons cependant nous attendre à ce qu'une même quantité d'eau provoque une augmentation similaire de la capacité sensible pour les deux motifs d'électrodes. Mais, d'après les résultats expérimentaux, rassemblés *Tableau IV.5*, l'augmentation de C_1 générée par une même quantité d'eau, est plus importante pour le capteur à électrodes linéaires que pour celui à électrodes interdigitées.

Volume de la goutte	Motif des électrodes	Augmentation de C_1
2 μ l	Electrodes linéaires	0,025pF
	Electrodes interdigitées	0,017pF
10 μ l	Electrodes linéaires	0,152pF
	Electrodes interdigitées	0,086pF
20 μ l	Electrodes linéaires	0,197pF
	Electrodes interdigitées	0,161pF

Tableau IV. 5 : augmentation de C_1 pour les deux motifs d'électrodes du capteur simplifié en fonction du volume de la goutte d'eau

Cet effet peut avoir diverses origines : le motif des électrodes, la surface du capteur (longueur des électrodes) ou encore la valeur de la capacité.

Bien que les simulations numériques sous-estiment les variations de capacité, ces dernières permettent malgré tout de dégager des tendances. De nouvelles simulations sont donc réalisées avec les deux motifs d'électrodes du capteur simplifié, en présence d'une goutte d'eau de 20 μ l, à surface active égale puis à capacité égale. Ces effets sont obtenus en augmentant la longueur des électrodes linéaires. Les résultats sont présentés dans le *Tableau IV.6*.

Motif des électrodes	Surface active égale ($S = 3032\text{mm}^2$)	Capacité égale ($C_1 = C_2 = 6,48\text{ pF}$)
Electrodes linéaires	$\frac{\Delta C_1}{C_1} = 2,23\%$ ($L_{E_1} = L_{E_2} = 126\text{ mm}$ $L_{E_3} = 53\text{ mm}$)	$\frac{\Delta C_1}{C_1} = 1,70\%$ ($L_{E_1} = L_{E_2} = 142\text{ mm}$ $L_{E_3} = 60\text{ mm}$)
Electrodes interdigitées	$\frac{\Delta C_1}{C_1} = 1,05\%$	$\frac{\Delta C_1}{C_1} = 1,05\%$

Tableau IV. 6 : variation relative de C_1 pour les deux motifs d'électrodes du capteur simplifié à surface égale et à capacité égale

A surface égale et même à capacité égale, il semble que la sensibilité du capteur à électrodes linéaires reste supérieure à celle du capteur à électrodes interdigitées.

Remarque : Etat de surface

Le diamètre de la goutte après impact est fortement dépendant de l'état de la surface d'impact : plus la surface est sale, plus les gouttes s'étalent [Mar00]. Dans les conditions réelles, la goutte aura donc tendance à s'étaler sur un pare-brise pas rigoureusement propre. Afin d'étudier l'influence de la surface de recouvrement du capteur par l'eau, une dernière série de mesures, réalisée avec une goutte d'eau étalée sur le capteur, est effectuée pour chaque motif d'électrodes. Le *Tableau IV.7* donne la correspondance entre le volume V et le diamètre D_i de la goutte après impact lorsqu'elle est juste déposée (cas précédemment considéré) ou étalée sur le capteur. Le *Tableau IV.8* présente ces derniers résultats et les compare aux mesures précédentes.

Volume de la goutte V (μl)	Diamètre D_i de la goutte déposée (μm)	Diamètre D_i de la goutte étalée (μm)
10	5000	7500
20	7000	10500

Tableau IV. 7 : correspondance entre le volume V et le diamètre D_i de la goutte déposée et étalée

Motif des électrodes	Volume de la goutte (μl)	$\frac{\Delta C_1}{C_1}$ en condition de test du laboratoire (goutte déposée)	$\frac{\Delta C_1}{C_1}$ en condition réelle (goutte étalée)
Electrodes linéaires	10	30,77%	40,44%
	20	39,88%	55,15%
Electrodes interdigitées	10	1,68%	5,27%
	20	3,14%	13,13%

Tableau IV. 8 : variation relative de C_1 pour les deux motifs d'électrodes du capteur simplifié en fonction de l'étalement de la goutte

Ainsi, en plus du volume et de la position de la goutte sur le capteur, la variation de la capacité sensible dépend également de la surface de recouvrement du capteur par l'eau. Plus la goutte s'étale sur le capteur, plus la capacité sensible augmente, quel que soit le motif des électrodes.

IV. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'étudier l'influence de l'eau sur les capacités du capteur. Une première approche par simulation numérique a permis d'évaluer la sensibilité de chacune des configurations du capteur lorsque un film d'eau d'épaisseur variable recouvre sa surface. Quelle que soit la configuration du capteur, la capacité sensible C_1 augmente significativement avec l'épaisseur du film, alors que la capacité de référence C_2 est très peu affectée. **La meilleure sensibilité à l'eau est obtenue avec les capteurs complets qui possèdent une électrode de garde.** En plus d'écranter le capteur des influences extérieures, en assurant à la fois un blindage électromagnétique et une directionalité à la détection, l'électrode de garde permet d'augmenter la variation de la capacité sensible liée à la présence d'eau : le volume de diélectrique sous influence des électrodes est réduit par l'électrode de garde, ce qui augmente la part de la capacité qui varie avec l'eau.

Le modèle du film d'eau n'étant pas très réaliste, l'effet de gouttes sur les capacités du capteur a été étudié. Afin d'évaluer la limite de détection de chacune de ses configurations, une seule

goutte d'eau est considérée. Après une étude par simulation numérique, des mesures de capacité sont réalisées sur les configurations simplifiées du capteur. En voici les principaux résultats :

- Les capteurs à électrodes linéaires présentent une bonne sensibilité à l'eau dès un très faible volume d'eau. Une goutte de seulement 1,8 μ l, déposée au centre du capteur, provoque une variation de C_1 supérieure à 1,2%. Une goutte d'eau de 10 μ l, même excentrée par rapport aux électrodes, est toujours détectée. La capacité de référence C_2 reste inchangée.
- En présence d'une goutte d'eau, la réponse des capteurs à électrodes interdigitées est très faible. Pour expliquer un tel comportement, une comparaison est effectuée entre les deux motifs d'électrodes. D'abord, la surface active des capteurs à électrodes interdigitées est plus grande. Afin de comparer les sensibilités en conditions similaires, le nombre de gouttes d'eau est augmenté dans le même rapport que la surface active. Même dans ces conditions, la sensibilité des capteurs à électrodes interdigitées reste inférieure à celle des capteurs à électrodes linéaires, tandis que la capacité de référence devient sensible à la présence d'eau. Outre la surface active, la valeur de la capacité en condition sèche est beaucoup plus élevée dans le cas des capteurs à électrodes interdigitées. Ceci entraîne une variation relative de C_1 en présence de la même quantité d'eau plus faible que celle des capteurs à électrodes linéaires. Cependant, les mesures ont démontré que l'augmentation de C_1 générée par une même quantité d'eau, était toujours supérieure dans le cas du capteur à électrodes linéaires.

Dans la configuration simplifiée du capteur, les électrodes linéaires conduisent à une meilleure sensibilité à l'eau que les électrodes interdigitées. Associé à un système électronique approprié, le capteur à électrodes linéaires est capable de détecter de très faibles quantités d'eau, quelle que soit la position de la goutte sur la surface active du capteur. **Dans sa configuration complète**, ses performances sont encore améliorées par l'électrode de garde. Dans ce cas, les simulations numériques indiquent que, **dès une épaisseur d'eau de 40 μ m, la tendance s'inverse puisque le capteur à électrodes interdigitées conduit à une sensibilité supérieure.**

Il faut également ajouter que l'étude sur le capteur à électrodes linéaires a été effectuée en présence d'une seule goutte d'eau. Nous pouvons penser que plusieurs gouttes engendreront une réponse encore plus significative du capteur.

Ce travail a fait l'objet de deux rapports industriels pour PSA [Bor03²] [Bor05¹], des conférences JNRDM [Bor04¹] et Eurosensors XVIII [Bor04²] et d'un article dans la revue Sensors and Actuators B [Bor06].

Les performances des différentes configurations du capteur sont vérifiées à température ambiante. Cependant, comme nous l'avons expliqué au chapitre II, le fonctionnement du capteur dépend de plusieurs paramètres, notamment de la température. Le capteur, implanté à l'intérieur du pare-brise, sera soumis aux mêmes variations de température [-40 à +80°C] et devra fonctionner correctement dans cette gamme de température. C'est ce que nous nous proposons de vérifier dans le dernier chapitre.

Bibliographie

- [Bor03²] I. Bord, P. Tardy, F. Ménéil, *Capteurs capacitifs d'humidité pour pare-brise : Détermination des paramètres clés par simulation numérique 3D*, Rapport final 1^o Phase, Contrat PSA /IXL (novembre 2003)
- [Bor04¹] I. Bord, *Capteur de pluie de type capacitif différentiel*, Proceedings des VIIèmes Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique JNRDM, Marseille, France, 4-6 Mai 2004, pp 41-43.
- [Bor04²] I. Bord, P. Tardy, F. Ménéil, *Dimensioning and first tests of a differential capacitive humidity sensor*, Eurosensors XVIII, Rome, Italie, 12-15 Septembre 2004, 708-709
- [Bor05¹] I. Bord, P. Tardy, F. Ménéil, *Capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie/buée sur un pare-brise : Comparaison des performances des capteurs à électrodes rectilignes / interdigitées : simulation et validation expérimentale et Influence de la température*, Rapport d'avancement 2^o Phase, Contrat PSA /IXL (mai 2005)
- [Bor06] I. Bord, P. Tardy, F. Ménéil, *Influence of the electrodes configuration on a differential capacitive rain sensor performances*, Sensors and Actuators B, 114 (2) (2006) 640-645
- [Cha92] Y. Chable, *Circuits hybrides à couches épaisses*, Masson, Paris, 1992
- [Erp98] G. Erpul, D. Gabriels, D. Janssens, *Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel*, Soil Till. Res. 45 (1998) 455-463
- [Mam04] A.V. Mamishev, K. Sundara-Rajan, F. Yang, Y. Du, M. Zahn, *Interdigital sensors and transducers*, Proceedings of the IEEE 92, No 5 (2004) 808-845

- [Mar00] J. Marendic-Miljkovic, M. Tasic, S. Rajsic, Z. Vukmirovic, *Precipitation onset detection with a rain sensor of improved sensitivity*, Atmos. Environ. 34 (2000) 5175-5181
- [McG29] National Research Council, *International Critical Tables of Numerical Data, Physics and Technology*, Vol. 6, first edition, Mc-Graw-Hill., New York, 1929, p 78
- [Wal93] F.A. Waldman et al. (Axiomatics Corp), (USA), *Apparatus and methods for measuring the dielectric constant and geometric properties of materials*, , US Patent 5223796, 38 pp, 29 Jun, (1993)
- [Wan03] Y. Wang, Y.L. Cheng, Y.W. Zhang, H.L.W. Chan, C.L. Choy, *Dielectric behaviors of lead zirconate titanate ceramics with coplanar electrodes*, Materials Science and Engineering B99 (2003), pp 79-82
- [Zar88] M.C. Zaretsky, L. Mouayad, J.R. Melcher, *Continuum properties from interdigital electrode dielectrometry*, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.23 No 6 (1988) 897-917

CHAPITRE V

Influence de la température sur les performances du capteur : étude par simulation numérique et validation expérimentale

I. Introduction.....	169
II. Influence de la dilatation thermique des matériaux.....	169
II.1. Capteur simplifié	171
II.2. Capteur complet.....	171
III. Influence de la modification des propriétés diélectriques des matériaux.....	173
III.1. Capteur simplifié	173
III.1.a. Etude par simulation numérique.....	173
III.1.b. Validation expérimentale	174
III.2. Capteur complet	178
IV. Conclusion	181
Bibliographie	182

I. Introduction

Le capteur doit permettre de détecter la présence de pluie sur le pare-brise en restant insensible aux autres paramètres susceptibles d'entraîner un déclenchement intempestif des essuie-glaces. En particulier, les capteurs capacitifs sont généralement sensibles aux fluctuations de température [Isl05]. Implanté à l'intérieur du pare-brise, le capteur sera soumis aux mêmes variations de température $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$ et devra pouvoir fonctionner correctement dans cette gamme de température.

Le dimensionnement du capteur a été effectué à température ambiante (cf. chapitre III). Mais les fluctuations de température sont susceptibles d'affecter son comportement, notamment :

- la géométrie du capteur peut être modifiée, consécutivement aux phénomènes de dilatation thermique (modification des dimensions des électrodes, de leurs écartements et du volume des diélectriques sous l'influence du champ électrique),
- la permittivité diélectrique des matériaux varie avec la température. Ce point a été étudié au chapitre II.

Le fonctionnement en mode différentiel est choisi pour s'affranchir, ou au moins réduire, l'influence néfaste de la température. C'est ce que nous nous proposons de vérifier dans ce dernier chapitre.

Le but de cette étude est donc triple :

- déterminer dans quelle mesure les capacités sont modifiées par les variations de température en condition sèche,
- confirmer le bien fondé du mode différentiel vis à vis de l'influence de la température,
- vérifier l'effet de la température sur les performances du capteur.

II. Influence de la dilatation thermique des matériaux

La géométrie du capteur peut être modifiée consécutivement aux phénomènes de dilatation thermique. Sous l'influence d'une variation de température, les matériaux se dilatent ou se

rétractent, proportionnellement à leur coefficient de dilatation thermique (CTE) α . Le *Tableau V.1* rassemble les valeurs des CTE des matériaux du capteur mesurées à 20°C.

Matériaux	Verre sodocalcique	PVB	Aluminium
α à 20°C (10^{-6} C^{-1})	9	6600	24

Tableau V. 1 : coefficient de dilatation thermique des matériaux du capteur

Les variations dimensionnelles linéiques ΔL , induites par les phénomènes de dilatation thermique, sont calculées à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \tag{1}$$

où ΔT représente la variation de température et L_0 la dimension initiale (*Figure V.1*).

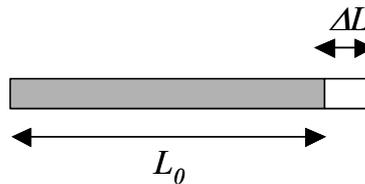


Figure V. 1 : variation dimensionnelle linéique

Les variations dimensionnelles de chaque élément du capteur sont calculées dans les trois dimensions de l'espace, pour les deux températures extrêmes -40°C et $+80^\circ\text{C}$. Les nouvelles dimensions sont ensuite injectées dans les programmes de simulation 3D. Afin de dissocier l'effet de la dilatation thermique de celui de la variation des propriétés diélectriques des matériaux sur les capacités, les valeurs des permittivités diélectriques mesurées à 20°C (*Tableau III.2*) sont conservées quelle que soit la température.

Cette étude est réalisée sur le capteur à électrodes linéaires en raison de la simplicité de sa géométrie, qui ne nécessite que des modifications mineures dans les programmes de simulation. Les deux configurations de ce capteur, simplifiée et complète, sont successivement traitées.

II.1. Capteur simplifié

Le capteur simplifié est uniquement constitué d'un substrat de verre et d'électrodes en aluminium, dont les CTE sont faibles (*Tableau V.1*). De ce fait, les variations dimensionnelles induites par les fluctuations de température sont infimes. Par exemple, la longueur de l'électrode métallique E_3 , L_{E_3} , fixée à 5mm à 20°C, subit une dilatation de +7,2 μm à 80°C et une rétraction de -7,2 μm à -40°C. De même, l'épaisseur du verre e_{verre} , égale à 2,1mm à 20°C, n'est modifiée que de ±1,1 μm dans ce même intervalle de température.

D'après les simulations numériques, la variation des capacités C_1 et C_2 , liée à la modification des paramètres géométriques du capteur simplifié, est négligeable (< 0,5%) dans la gamme de température étudiée. L'égalité des capacités C_1 et C_2 en condition sèche est donc respectée dans l'intervalle [-40 à +80°C] pour le capteur simplifié.

II.2. Capteur complet

A la dilatation thermique du verre et de l'aluminium, s'ajoute celle du feuillet de PVB. A l'instar de beaucoup de polymères, le PVB a un CTE élevé (*Tableau V.1*). Les variations dimensionnelles du film de PVB induites par les fluctuations de température sont donc supérieures à celles subies par le verre et l'aluminium. L'épaisseur du feuillet de PVB e_{PVB} , égale à 800μm à 20°C, subit ainsi une dilatation de ±31,6 μm entre -40°C et +80°C.

La *Figure V.2(a)* représente l'évolution des capacités C_1 et C_2 liée à la modification des paramètres géométriques du capteur complet avec la température. Afin de vérifier l'équilibre des capacités avec la température, nous traçons, *Figure V.2(b)*, la variation différentielle relative des capacités telle que :

$$\frac{C_1(T) - C_2(T)}{C_2(T)} \times 100 \quad (2)$$

Cette relation permet d'évaluer rapidement l'efficacité du mode différentiel quelle que soit la température.

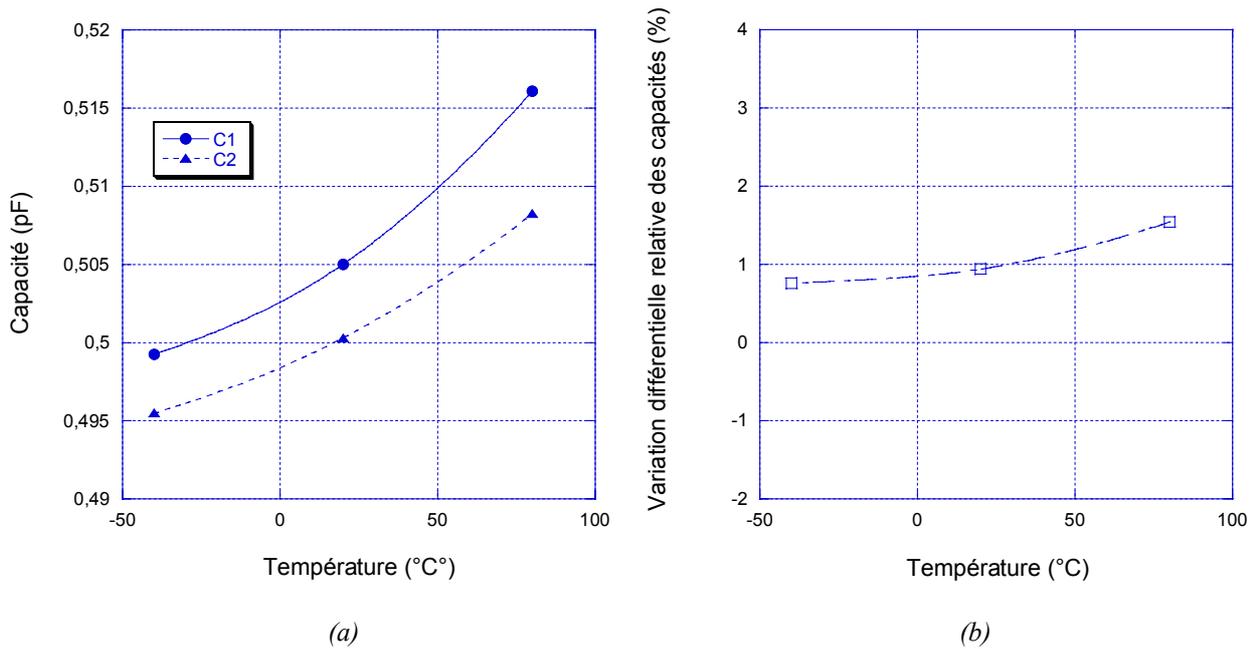


Figure V. 2 : influence de la dilatation thermique des matériaux sur (a) les capacités et (b) la variation différentielle relative des capacités du capteur complet à électrodes linéaires

L'augmentation des capacités C_1 et C_2 reste faible ($< 3,4\%$) dans l'intervalle de température considéré $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$ et s'opère dans des proportions similaires pour les deux capacités, bien que la capacité sensible soit davantage affectée par la modification de l'épaisseur du film de PVB. Cependant, ce dernier est inséré entre deux feuillets de verre dont le CTE est faible. Rien ne prouve que le PVB soit libre de se dilater en épaisseur dans ces conditions. Nous pouvons donc considérer que la dilatation thermique des matériaux n'a qu'une influence mineure sur les capacités et que l'égalité des capacités C_1 et C_2 en condition sèche est pratiquement respectée dans la gamme de température étudiée.

Les déformations dimensionnelles, liées à la dilatation thermique des matériaux ne modifient pas de façon significative l'équilibre des capacités des capteurs à électrodes linéaires dans notre intervalle d'étude $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$. Nous pouvons penser qu'il en sera de même pour le capteur à électrodes interdigitées, constitués des mêmes matériaux.

Intéressons nous maintenant à la variation des propriétés diélectriques des matériaux avec la température et à leur influence sur les performances du capteur.

III. Influence de la modification des propriétés diélectriques des matériaux

Comme nous l'avons montré au chapitre II, la permittivité diélectrique des matériaux varie avec la température. L'étude expérimentale a permis de constituer une banque de données regroupant les permittivités diélectriques ε' du verre et du PVB, dans la gamme de température $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$ et d'établir des expressions semi-empiriques permettant de rendre compte de leur dépendance en fréquence et en température. Dans cet intervalle, les permittivités considérées augmentent significativement avec la température. Nous pouvons donc nous attendre à ce que les capacités augmentent également avec la température.

Le capteur fonctionne en mode différentiel. Les deux condensateurs sont donc soumis aux mêmes contraintes thermiques. Cependant, ces derniers présentent une géométrie différente et ne sont pas constitués du même volume de diélectrique. Il est alors indispensable de déterminer l'incidence de la variation des permittivités diélectriques des matériaux sur chacune des capacités et ainsi sur les performances du capteur.

III.1. Capteur simplifié

III.1.a. Etude par simulation numérique

Pour la configuration simplifiée du capteur, seules les propriétés diélectriques du verre varient avec la température. L'expression semi-empirique (68), déterminée au chapitre II, permet de rendre compte du comportement de la partie réelle de la permittivité diélectrique ε' du verre *Light* dans les gammes de fréquence et de température utilisées pour l'application du capteur :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = \varepsilon_\infty + A_{(T)}\omega^{n-1} \quad (3)$$

$$\text{où } \varepsilon_\infty = 7,4 + 8.10^{-3}T - 9.10^{-5}T^2 + 8.10^{-7}T^3$$

$$A_{(T)} = 1,85 + 4.10^{-2}T + 7.10^{-4}T^2 + 1.10^{-5}T^3 + 2.10^{-7}T^4$$

$$n = 0,86 - 2,3.10^{-3}T$$

Ces expressions sont injectées dans les programmes de simulation. La fréquence est fixée à 1kHz, seule la température est modifiée.

Les simulations sont effectuées en condition sèche puis en présence d'un film d'eau d'épaisseur moyenne (200 μ m). La permittivité diélectrique de l'eau évolue avec la température suivant la loi [McG29] :

$$\varepsilon'_{eau} = 80 - 0,4(T - 20) \quad \text{avec } T \text{ en } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

En dessous de 0°C, la permittivité diélectrique de la glace chute notablement lorsque la température diminue, comme le montre la *Figure V.3* [McG29].

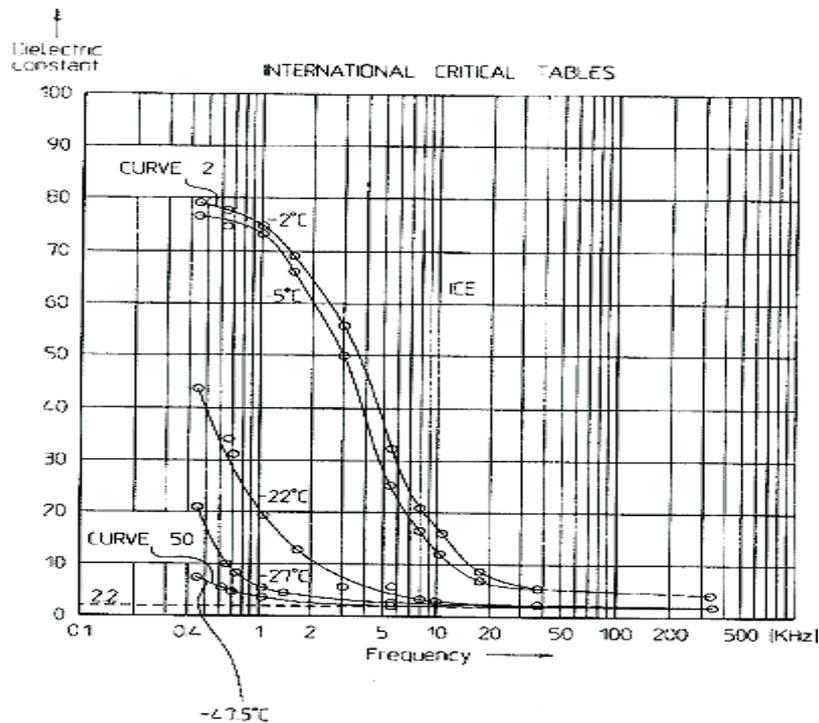


Figure V. 3 : variation de la partie réelle de la permittivité diélectrique de la glace en fonction de la fréquence pour différentes températures [McG29]

Les résultats de simulation sont présentés *Figure V.5* et *Figure V.6* avec les résultats expérimentaux pour faciliter l'interprétation.

III.1.b. Validation expérimentale

- Dispositif de mesure

Les mesures de capacité sont effectuées à l'aide du montage présenté *Figure IV.15* au chapitre précédent. L'ensemble est placé dans une étuve (SECASI-VRT-SIRPAC) permettant de

réguler la température. La borne supérieure du domaine de température est abaissée à $+60^{\circ}\text{C}$ car les supports des pointes de test ne supportent pas de monter à une température plus élevée. Une résistance de platine (Pt 1000), fixée sur le capteur à l'aide d'une pâte conductrice thermique, connectée à un multimètre, permet de contrôler sa température réelle. Le montage utilisé est schématisé *Figure V.4*.

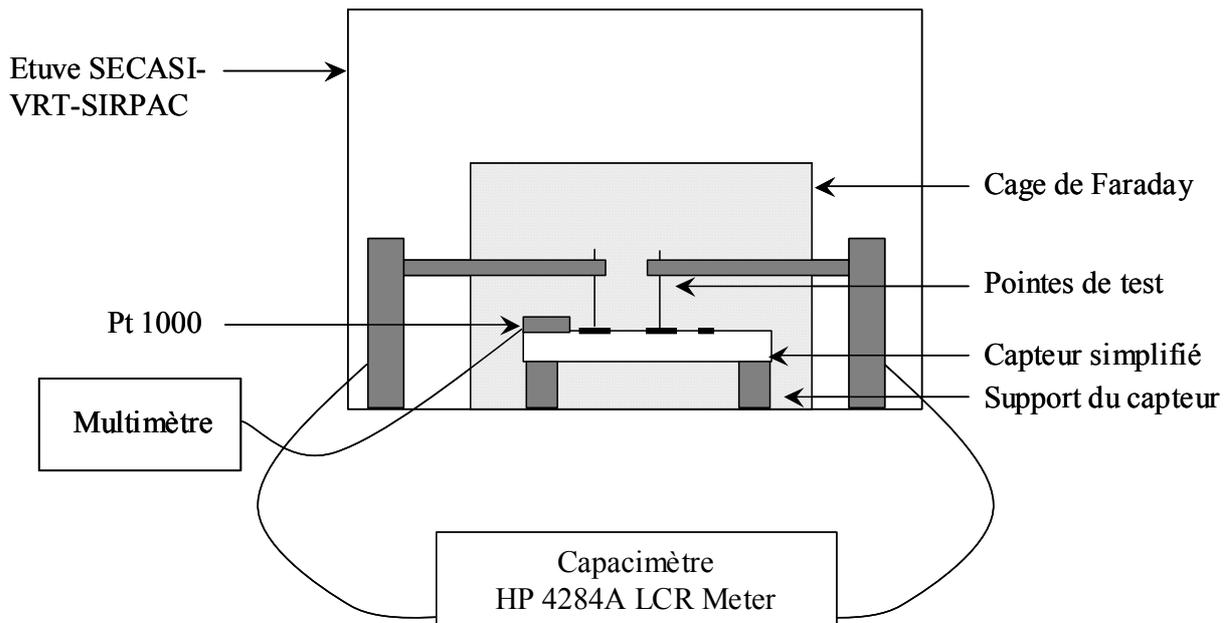


Figure V. 4 : montage utilisé pour les mesures de capacité en température

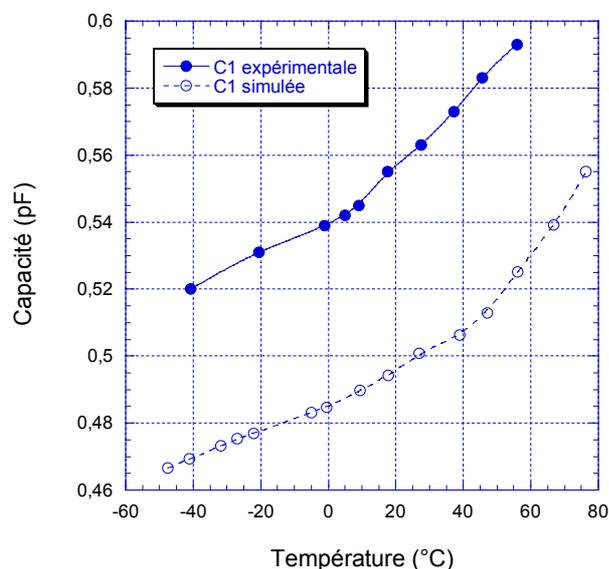
Les mesures de capacité sont d'abord effectuées en condition sèche, puis en présence de gouttes d'eau de $15\mu\text{l}$: une seule goutte est déposée sur le capteur à électrodes linéaires (i.e. position 1 de la *Figure IV.12*) tandis que sept gouttes sont déposées sur le capteur à électrodes interdigitées (i.e. *Figure IV.19*). Pour les plus hautes températures, les mesures doivent être effectuées rapidement en raison de l'évaporation des gouttes qui rend difficile le contrôle du volume d'eau.

- **Influence de la température sur la capacité sensible**

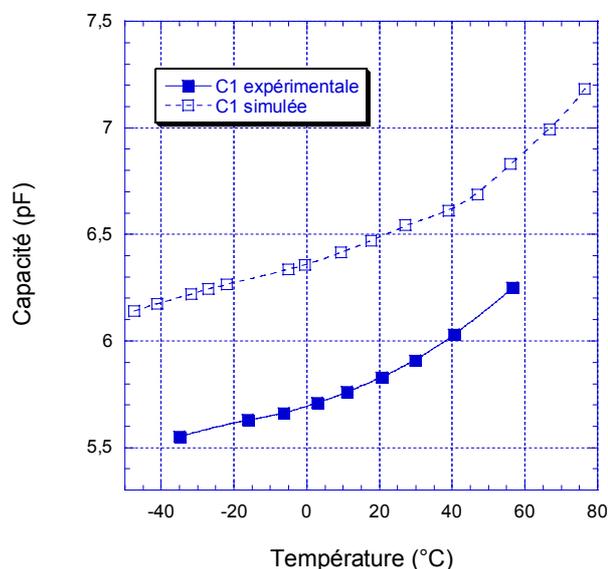
Dans un premier temps, nous cherchons à vérifier l'incidence de la variation de la permittivité diélectrique du verre *Light* sur la capacité sensible des capteurs simplifiés dans la gamme de température $[-40$ à $+80^{\circ}\text{C}]$ en condition sèche.

Les résultats numériques et expérimentaux sont présentés :

- *Figure V.5(a)* : pour le capteur simplifié à électrodes linéaires,
- *Figure V.5(b)* : pour le capteur simplifié à électrodes interdigitées.



(a) capteur simplifié à électrodes linéaires



(b) capteur simplifié à électrodes interdigitées

Figure V. 5 : influence de la température sur la capacité sensible (a) du capteur simplifié à électrodes linéaires et (b) du capteur simplifié à électrodes interdigitées obtenue expérimentalement et par simulation numérique

Le décalage observé entre les valeurs simulées et les valeurs expérimentales a déjà été commenté au chapitre précédent. Comme nous pouvions nous y attendre, la capacité sensible augmente significativement avec la température quel que soit le motif des électrodes. Un tel comportement s'avère gênant puisque, dans le cas du capteur à électrodes linéaires par exemple, une variation de 10°C a le même effet sur C_1 qu'une goutte d'eau de 4,2 μ l à température ambiante. Néanmoins, le mode différentiel devrait permettre de s'affranchir de l'influence de la température sur les capacités.

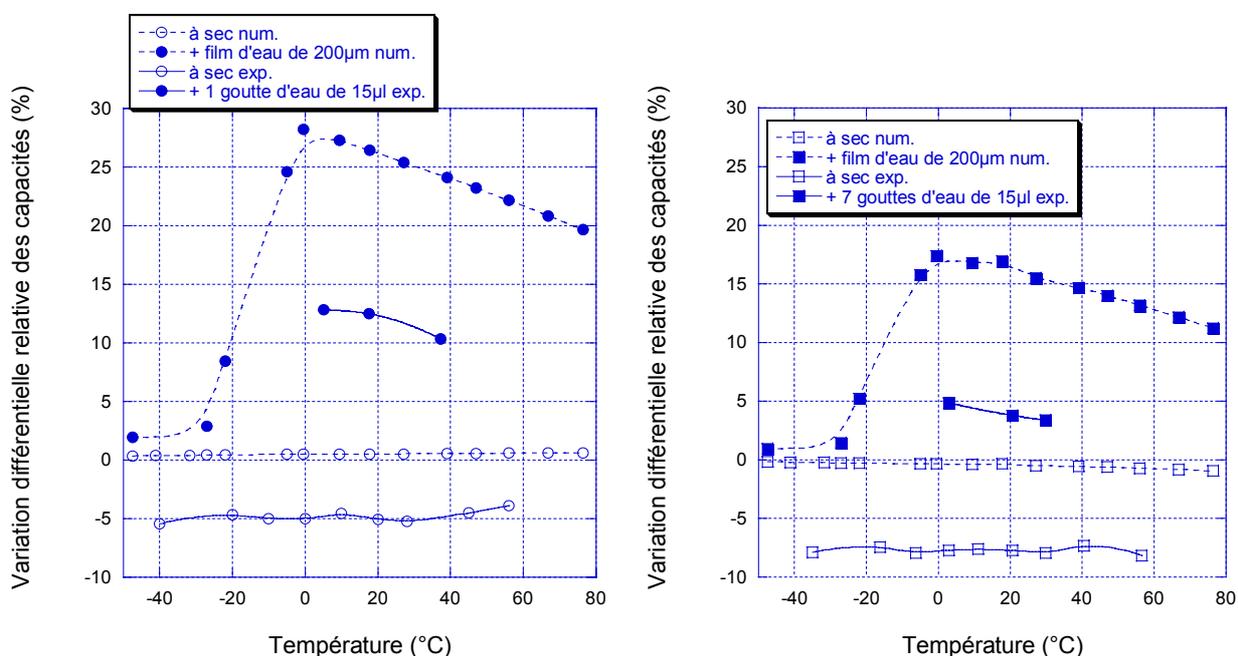
• Efficacité du mode différentiel

Nous traçons, pour chaque capteur, la variation différentielle relative des capacités, calculée à l'aide de la relation (2), dans la gamme de température $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$, en condition sèche puis en présence d'eau, afin de contrôler l'influence de la température sur les performances du capteur.

En raison des problèmes de maillage rencontrés lors de la modélisation des gouttes d'eau, notamment pour le capteur à électrodes interdigitées (cf. chapitre IV, paragraphe II.2.a), un film d'eau de 200 μ m d'épaisseur est considéré lors des simulations. Expérimentalement, le dispositif de mesure utilisé rend difficile le dépôt d'un film. C'est pourquoi nous déposons des gouttes d'eau, de volume suffisamment important (15 μ l) pour provoquer une variation significative de la capacité sensible.

Les résultats numériques et expérimentaux sont présentés :

- *Figure V.6(a)* : pour le capteur simplifié à électrodes linéaires,
- *Figure V.6(b)* : pour le capteur simplifié à électrodes interdigitées.



(a) capteur simplifié à électrodes linéaires

(b) capteur simplifié à électrodes interdigitées

Figure V. 6 : influence de la température sur les capacités (a) du capteur simplifié à électrodes linéaires et (b) du capteur simplifié à électrodes interdigitées obtenue expérimentalement et par simulation numérique

En condition sèche : L'équilibre des capacités est respecté aux incertitudes expérimentales près (cf. chapitre IV, paragraphes III.1.b et III.2.b.) quels que soient la température et le motif des électrodes. L'utilisation du mode différentiel rend donc les capteurs simplifiés insensibles aux fluctuations de température.

En présence d'eau : Le capteur est sensible à l'eau quelle que soit la température. Cependant, nous notons une diminution de la sensibilité des capteurs avec la température, liée à la baisse de la permittivité de l'eau (i.e. relation (4)). En configuration simplifiée, le capteur à électrodes linéaires reste plus sensible à l'eau que le capteur à électrodes interdigitées, quelle que soit la température.

Le décalage observé entre les variations de capacité simulée et expérimentale s'explique par la différence de volume d'eau considéré.

En deçà de 0°C, la permittivité de la glace chute brutalement. De ce fait, la sensibilité du capteur vis à vis de la glace diminue également. Cependant, même à -40°C, la variation relative de C_1 reste significative ($\approx 2\%$).

En configuration simplifiée, l'utilisation du mode différentiel permet de s'affranchir efficacement de l'influence de la température. Bien que la sensibilité des capteurs diminue avec la température, elle reste suffisante quelle que soit la température.

III.2. Capteur complet

Après avoir considéré le capteur simplifié, intéressons nous maintenant à la configuration complète du capteur, étudiée par simulation numérique.

Dans le cas du capteur complet, les propriétés diélectriques du PVB interviennent. L'influence de la température sur la partie réelle de la permittivité du PVB dans les gammes de fréquence et de température étudiées, est prise en compte, dans les programmes de simulation, par l'utilisation des expressions semi-empiriques (63) et (66), établies au chapitre II. Nous rappelons :

- dans l'intervalle [-40 à +20°C] :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = (4,12 + 1,5 \cdot 10^{-2} T) \omega^{-0,02} \quad (4)$$

- dans l'intervalle [+20 à +50°C] :

$$\varepsilon'_{(\omega,T)} = (2,44 + 0,12T) \omega^{(-1,6 \cdot 10^{-3} T + 1,1 \cdot 10^{-5} T^2)} \quad (5)$$

- au-delà de 50°C :

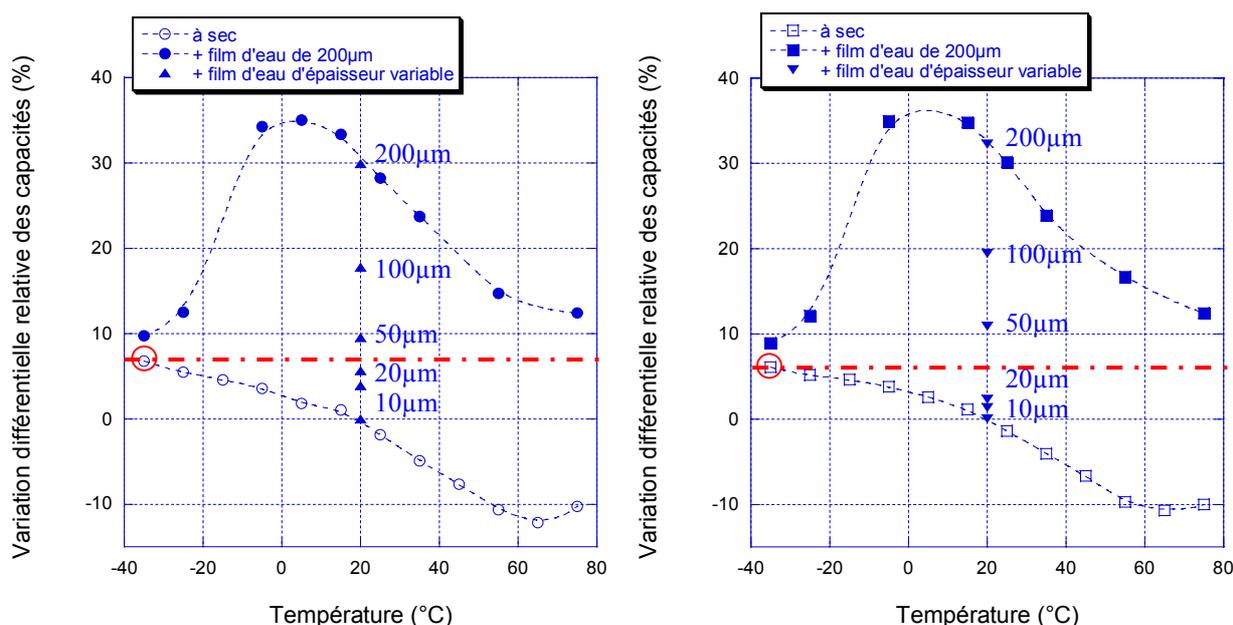
$$\varepsilon' = 5,5 \quad (6)$$

La fréquence est fixée à 1kHz. Nous faisons varier la température dans l'intervalle $[-40 \text{ à } +80^\circ\text{C}]$. Les expressions (3) et (4) sont respectivement utilisées pour modéliser le comportement du verre *Light* et de l'eau.

Les simulations sont effectuées en condition sèche puis en présence d'un film d'eau de $200\mu\text{m}$ d'épaisseur. Les variations différentielles relatives des capacités, calculée à l'aide de la relation (2), sont présentés :

- *Figure V.7(a)* : pour le capteur complet à électrodes linéaires,
- *Figure V.7(b)* : pour le capteur complet à électrodes interdigitées.

Les résultats de simulation obtenus avec un film d'eau d'épaisseur variable $[10 \text{ à } 200\mu\text{m}]$ sont reportés pour comparaison.



(a) capteur complet à électrodes linéaires

(b) capteur complet à électrodes interdigitées

----- Seuil de détection

○ Valeur critique

Figure V. 7 : influence de la température sur les capacités (a) du capteur complet à électrodes linéaires et (b) du capteur complet à électrodes interdigitées obtenue par simulation numérique

En condition sèche : La capacité C_2 augmente plus rapidement que C_1 , ce qui engendre un déséquilibre des capacités en condition sèche. Le volume de diélectrique sous influence du champ électrique est différent pour C_1 et C_2 . La capacité C_2 est proportionnellement plus affectée par la modification des propriétés diélectriques des matériaux car la quasi totalité de ses lignes de champ reste confinée dans le feuillet de verre et le film de PVB. En particulier, la fraction des lignes de champ de C_2 canalisée dans le film de PVB, dont la permittivité diélectrique augmente plus rapidement que celle du verre avec la température (cf. chapitre II), contribue fortement à l'augmentation de la capacité de référence C_2 .

En présence d'eau : Le capteur est sensible à l'eau et à la glace quel que soit le motif des électrodes, dans l'intervalle de température considéré. Il existe cependant un risque de confusion entre la présence d'eau sur le capteur et une fluctuation de température lorsque la variation différentielle relative des capacités augmente. Il faudra donc définir un seuil de détection au-delà duquel il n'y a plus d'ambiguïté quant à l'origine de cette augmentation. Ce seuil devra se situer au niveau de la valeur maximale de la variation différentielle relative des capacités générée par une fluctuation de température en condition sèche. Cette valeur critique correspond, pour les deux motifs d'électrodes du capteur, à la variation observée à -35°C , soit 8,65% pour le capteur à électrodes linéaires et 7,49% pour le capteur à électrodes interdigitées. Dans les deux cas, un film d'eau d'épaisseur inférieure à $50\mu\text{m}$ ne pourra être détecté par le capteur.

Seul, le mode différentiel ne permet donc pas de protéger efficacement les capteurs complets de l'influence de la température. Si le seuil de détection s'avère insatisfaisant, il est possible d'adjoindre un capteur de température afin de limiter le fonctionnement du capteur, par exemple aux températures positives (limitation à la détection de pluie). La « détectivité » des capteurs serait ainsi significativement améliorée : le capteur à électrodes linéaires serait alors capable de détecter un film d'eau de seulement $10\mu\text{m}$. Rappelons que pour une épaisseur d'eau inférieure à $40\mu\text{m}$, le capteur à électrodes linéaires conduit à une meilleure sensibilité que le capteur à électrodes interdigitées (cf. chapitre IV).

IV. Conclusion

L'utilisation du mode différentiel permet de compenser l'effet de la température sur les capacités des capteurs simplifiés. Ces résultats ont été présentés lors de la conférence Eurosenors XIX [Bor05²] ainsi que dans un rapport industriel pour PSA [Bor05¹].

En revanche, la présence du PVB perturbe fortement les performances des capteurs complets. Le mode différentiel est alors insuffisant pour les protéger efficacement de l'influence de la température. Un seuil de détection devra être défini au-delà duquel il n'y a plus de risque de confusion entre la présence d'eau et une variation de température. Mais dans ce cas, les faibles volumes d'eau ne seront plus détectés. Pour pallier à ce problème, une solution serait de coupler un capteur de température au capteur de pluie. Une autre possibilité à envisager consisterait à modifier la fréquence de fonctionnement du capteur. Comme nous l'avons vu au chapitre II, les permittivités diélectriques du verre et du PVB évoluent avec la température mais également avec la fréquence. Pour les raisons évoquées au chapitre III, nous avons choisi de travailler à 1kHz, sans considérer à ce moment-là l'effet de la température. Maintenant que nous savons que ce paramètre est déterminant, il serait préférable de choisir une fréquence où les variations des permittivités diélectriques des matériaux avec la température soient minimales. Les évolutions de ε' et de ε'' du PVB et du verre *Light* en fonction de la fréquence [100Hz à 100kHz] sont présentées au chapitre II, respectivement *Figure II.12* et *Figure II.19*, pour différentes températures [-40 à +80°C]. D'après ces résultats, pour des fréquences supérieures à 10kHz, les variations des permittivités diélectriques des matériaux avec la température sont significativement diminuées, ce qui permettrait de réduire le déséquilibre des capacités en condition sèche. Dans ce cas, la valeur du seuil de détection pourrait être abaissée et les plus faibles volumes d'eau détectés par le capteur. Remarquons cependant que lorsque la fréquence augmente, les pertes diélectriques sont plus importantes et la valeur des permittivités plus faible. Les capacités seraient alors également plus faibles, ce qui pourrait engendrer une dégradation du rapport Signal/Bruit et donc une diminution de la sensibilité des capteurs.

Il sera de plus difficile de supprimer complètement le déséquilibre des capacités, car, quelle que soit la fréquence, la permittivité diélectrique du PVB augmente toujours plus rapidement avec la température que celle du verre.

Bibliographie

- [Bor05¹] I. Bord, P. Tardy, F. Ménil, *Capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie/buée sur un pare-brise : Comparaison des performances des capteurs à électrodes rectilignes / interdigitées : simulation et validation expérimentale et Influence de la température*, Rapport d'avancement 2° Phase, Contrat PSA /IXL (mai 2005)
- [Bor05²] I. Bord, P. Tardy, F. Ménil, *Temperature influence on a differential capacitive rain sensor*, Eurosensors XIX, Barcelone, Espagne, 11-14 Septembre 2005, WPb68
- [Fen05] T. Fen-Chong, A. Fabbri, *Freezing and thawing porous media : experimental study with a dielectric capacitive method*, Comptes Rendus de Mécanique 333 (2005) 425-430
- [Isl05] T. Islam, C. Pramanik, H. Saha, *Modeling, simulation and temperature compensation of porous polysilicon capacitive humidity sensor using ANN technique*, Microelectronics Reliability 45 (2005) 697-703
- [McG29] National Research Council, *International Critical Tables of Numerical Data, Physics and Technology*, Vol. 6, first edition, Mc-Graw-Hill., New York, 1929, p 78

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Lors de ce travail, les performances d'un capteur de pluie capacitif différentiel ont été étudiées.

Une étude bibliographique, objet du premier chapitre, a d'abord permis de faire le point sur l'état de l'art en matière de capteurs de pluie pour pare-brise automobile et de définir les bases du travail de développement d'un capteur capable de résoudre les problèmes inhérents aux capteurs commerciaux. A l'issue de cette étude, un capteur capacitif différentiel, constitué de trois électrodes coplanaires protégées, délimitant une capacité sensible à l'eau et une capacité de référence, a été sélectionné. Le fonctionnement en mode différentiel permet de réduire l'influence des paramètres perturbateurs extérieurs. Une électrode supplémentaire, située sous les trois autres, écran le capteur des influences intérieures, assurant ainsi un caractère directionnel à la détection.

Afin de réduire le champ des investigations expérimentales, une étude du capteur par simulation numérique s'est avérée nécessaire, avec, comme étape préalable, la connaissance du comportement des permittivités diélectriques des matériaux du pare-brise, objet du deuxième chapitre. Le domaine fréquentiel optimal de fonctionnement du capteur a ainsi pu être déterminé : [1 à 10kHz]. Dans ce domaine, nous avons choisi de travailler à 1kHz. Par ailleurs, le capteur devant être implanté à l'intérieur du pare-brise, sera amené à subir des fluctuations de température de [-40 à +80°C] et devra pouvoir fonctionner correctement dans cette gamme de température. L'influence de la température sur les permittivités du verre et du PVB a donc également été étudiée dans ce deuxième chapitre. En nous basant sur des considérations théoriques, nous avons ensuite établi des expressions semi-empiriques traduisant le comportement expérimental des permittivités des matériaux, dans les gammes de fréquence et de température concernées par l'application du capteur. Ces expressions ont ensuite été injectées dans les programmes de simulation afin de déterminer l'influence de la température sur les performances du capteur (objet du dernier chapitre).

Le troisième chapitre décrit la phase de dimensionnement du capteur par simulation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette méthode a permis d'identifier les paramètres sensibles influant sur le fonctionnement du capteur afin de déterminer le dimensionnement optimal des électrodes. Ce dernier conduit à l'égalité de la capacité sensible

et de la capacité de référence en condition sèche et à un déséquilibre maximal en présence d'eau sur le capteur. Ce dimensionnement est valable quel que soit le verre utilisé pour la confection des pare-brises (*Clear, Light et Dark*), dans une large gamme de fréquence autour de 1kHz. Deux motifs d'électrodes ont été étudiés : électrodes linéaires et électrodes interdigitées. Le capteur complet n'étant pas réalisable au laboratoire, une variante simplifiée du capteur (sans PVB ni électrode garde) a été considérée et fabriquée dans le but de valider expérimentalement ses performances. Parmi les différents modes de fabrication expérimentés, la gravure d'un substrat de verre, métallisé par évaporation thermique sous vide, à l'aide d'une résine photosensible, conduit à la meilleure précision sur les dimensions des électrodes. La réalisation en couches minces permet, en outre, de faciliter l'intégration du capteur au sein du pare-brise.

L'étude de l'influence de l'eau sur les capacités du capteur constitue le quatrième chapitre. Une première approche par simulation numérique a permis de s'assurer de la sensibilité de chacune des configurations du capteur en présence d'un film d'eau. Afin d'être plus réaliste, l'effet de gouttes sur les capacités a ensuite été considéré. Pour les capteurs simplifiés, les mesures se sont révélées en accord avec les résultats de simulation. Le motif linéaire des électrodes conduit à une bonne sensibilité, dès un très faible volume d'eau ($\approx 2\mu\text{l}$). Une seule goutte suffit à provoquer une variation significative de la capacité sensible, quelle que soit sa position sur la surface active du capteur. En revanche, dans les mêmes conditions, la réponse du capteur à électrodes interdigitées est très faible. Les différences de surface active et de capacité entre les deux motifs d'électrodes ne suffisent cependant pas à expliquer le manque de sensibilité de ce type de capteur. En effet, une même goutte d'eau provoque une augmentation de la capacité sensible plus importante avec le capteur à électrodes linéaires. Dans leur configuration complète, la sensibilité des capteurs est notablement améliorée par l'électrode de garde, quel que soit le motif des électrodes. Dans ce cas, les simulations numériques indiquent que, dès une épaisseur d'eau de $40\mu\text{m}$, la tendance est inversée puisque le capteur à électrodes interdigitées conduit à une sensibilité supérieure.

La température étant un paramètre susceptible de perturber le fonctionnement du capteur, son effet a été considéré. Il a été montré que si les phénomènes de dilatation thermique ont une incidence négligeable, la modification de la permittivité des matériaux, étudiée au deuxième chapitre, entraîne des risques de dysfonctionnement significatifs. A cet égard, le mode différentiel s'est avéré être une solution performante pour les capteurs simplifiés. En

revanche, les variations importantes de la permittivité du PVB rendent ce mode partiellement inefficace dans le cas des capteurs complets. Un seuil de détection devra être défini au-delà duquel il n'y a plus de risque de confusion entre la présence d'eau et une variation de température. L'adjonction d'un capteur de température au capteur de pluie permettrait d'améliorer notablement la « détectivité ». Une autre solution consisterait à changer la fréquence de fonctionnement du capteur pour une fréquence supérieure à 10kHz, à laquelle les variations des propriétés diélectriques du verre et du PVB avec la température sont plus faibles. Le déséquilibre des capacités serait de ce fait réduit.

Sur la base des critères requis pour l'intégration en grande série d'un capteur de pluie (critères détaillés au premier chapitre), le développement industriel de notre capteur semble envisageable. Ajoutons quelques remarques au sujet de la sensibilité qui, rappelons-le, constitue le point délicat.

- Un bon rapport Signal/Bruit nécessite un signal d'amplitude suffisante, directement liée à la variation relative de la capacité en présence d'eau et donc à la valeur de la capacité elle-même. Or l'optimisation de cette capacité repose sur le dimensionnement des paramètres géométriques des électrodes qui reste totalement dépendant des paramètres géométriques existants et difficilement modifiables du pare-brise. En particulier, la sensibilité du capteur est limitée par l'épaisseur du feuillet de verre (2,1mm). En diminuant son épaisseur et en redimensionnant les électrodes, la sensibilité pourrait être significativement améliorée. Si jouer sur l'épaisseur du substrat est impossible dans le cadre de notre application, il est envisageable d'utiliser un tel capteur pour d'autres applications. La variation de la capacité sensible pourrait ainsi être mise à profit pour contrôler la pureté d'un produit, par exemple pour déterminer la teneur en eau dans le pétrole brut, ou encore pour mesurer l'humidité des sols. A noter que ce type de capteur ne nécessite pas de contact direct avec la substance à analyser, ce qui rend possible des mesures à travers une paroi relativement fine.
- Dans le cadre de notre application, une solution pour améliorer la sensibilité est de jouer sur la disposition et l'encombrement du capteur sur le pare-brise :

- * Un grand capteur permet de couvrir une large surface du pare-brise mais souffre d'un manque de sensibilité. A l'inverse, un petit capteur conduit à une bonne « détectivité » mais la zone sensible se trouve alors limitée. Un compromis consisterait à répartir plusieurs petits capteurs sur la surface du pare-brise (pas de gêne de la vision du conducteur avec des électrodes transparentes, par exemple en ITO, dans la zone de balayage des essuie-glaces). Nous pouvons imaginer chaque capteur autonome et capable d'envoyer une information en présence d'eau. Suivant la densité des informations transmises par l'ensemble des capteurs au système de traitement (par exemple un circuit logique), il serait alors possible d'estimer la quantité d'eau présente sur le pare-brise afin d'optimiser la vitesse de balayage des essuie-glaces. En discrétisant le système, la résolution serait ainsi significativement améliorée. A noter que la sensibilité du capteur dépend du dispositif électronique associé. Il faudra donc veiller à ce que ce dernier soit capable de détecter de faibles variations de capacité (\approx de l'ordre de 0,02pF).

- * Il serait également judicieux de mélanger les deux motifs d'électrodes. En effet, le capteur à électrodes linéaires permet de détecter les faibles quantités d'eau : gouttes et film $< 40\mu\text{m}$. Au delà, le capteur à électrodes interdigitées conduit à une meilleure sensibilité. L'utilisation conjointe des deux motifs d'électrodes permettrait donc d'obtenir une sensibilité optimale quelle que soit la quantité d'eau présente sur le pare-brise.

- Nous avons montré que le capteur de pluie était également sensible à la glace et au givre. Cependant, le déclenchement systématique des essuie-glaces peut conduire dans ce cas à une dégradation accélérée des balais. Il serait donc utile de savoir différencier l'eau de la glace afin de déclencher les actions appropriées. Outre l'ajout d'un capteur de température, une autre solution serait d'exploiter la différence du comportement des propriétés électriques des deux phases de l'eau. Alors que la permittivité de l'eau est quasi indépendante de la fréquence dans le domaine fréquentiel choisi, celle de la glace chute notablement avec la fréquence d'excitation, quelle que soit la température (*Figure III.9*). Une détection fiable de la glace pourrait donc être obtenue en utilisant un générateur à deux fréquences d'oscillation, par exemple 1kHz et 400kHz.

- Des modifications minimales permettent également d'envisager la réalisation d'un capteur sensible à la buée à l'intérieur de l'habitacle (pour le déclenchement automatique de la ventilation et/ou du chauffage). Dans ce cas, l'électrode de garde doit écranter le capteur des influences extérieures. Cet effet peut être obtenu en inversant les positions des électrodes coplanaires et celle de l'électrode de garde dans le pare-brise.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Publication dans une revue (1)

- I. Bord, P. Tardy and F. Ménéil, *Influence of electrodes configuration for a differential capacitive rain sensor*, Sensors and Actuators B, 2006, 114 (2), pp 640-645

Communications internationales (3)

- I. Bord, P. Tardy and F. Ménéil, *Dimensioning and first tests of a differential capacitive humidity sensor*, Eurosensors XVIII, Rome, Italie, 12-15 Septembre 2004, pp 708-709
- I. Bord, P. Tardy and F. Ménéil, *Dimensioning and first tests of a differential capacitive rain sensor*, 2èmes Journées Franco Espagnoles CMC2 – IBERNAM Microsystèmes, ESTIA, Bidart, France, 18-19 novembre 2004
- I. Bord, P. Tardy and F. Ménéil, Eurosensors XIX , *Temperature influence on a differential capacitive rain sensor*, Eurosensors XIX, Barcelone, Espagne, 11-14 Septembre 2005, Vol.II pp WPb68

Communications nationales (2)

- I. Bord, *Capteur de pluie de type capacitif différentiel*, Proceedings des VIIèmes Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique JNRDM, Marseille, France, 4-6 Mai 2004, pp 41-43
- I. Bord, *Capteur capacitif différentiel de pluie*, Journée de l'Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur SPI, Bordeaux, France, 11 Mai 2004

Rapports de contrats industriels (3)

- Contrat PSA /IXL, 1° Phase, Rapport d'avancement (janvier 2003), *Capteurs capacitifs d'humidité pour pare-brise : Détermination des paramètres clés par simulation numérique 2D*

- Contrat PSA /IXL, 1° Phase, Rapport final (novembre 2003), *Capteurs capacitifs d'humidité pour pare-brise : Détermination des paramètres clés par simulation numérique 3D*
- Contrat PSA /IXL, 2° Phase, Rapport d'avancement (mai 2005), *Capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie/buée sur un pare-brise : Comparaison des performances des capteurs à électrodes rectilignes / interdigitées : simulation et validation expérimentale et Influence de la température*