

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC A CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGENIERIE

Par

Zahira Ghalmi

CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT D'UN CAPTEUR ULTRASONIQUE POUR
MESURER L'ÉPAISSEUR DE LA GLACE

Mars 2006



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

L'avancement de la recherche dans le développement de nouveaux types de capteurs plus performants destinés aux régions froides, capables de mesurer des épaisseurs d'une accumulation de glace sur une surface pour pouvoir activer des systèmes de déglaçage adéquats est nécessaire afin d'accroître la fiabilité des réseaux de transport d'énergie sous des conditions de givrage atmosphérique.

Dans ce contexte, l'utilisation des capteurs ultrasoniques est indispensable compte tenu de leur possibilité de mesurer des épaisseurs importantes d'une accumulation. Le présent mémoire, entrepris dans le cadre des travaux de la chaire de recherche du Canada sur l'ingénierie du givrage des réseaux électriques (INGIVRE) à l'Université du Québec à Chicoutimi, a pour but de contribuer au développement d'un capteur ultrasonique capable de mesurer ponctuellement l'épaisseur d'une accumulation de glace sur une surface et de vérifier leur pouvoir de discrimination entre les différentes précipitations froides accumulées.

Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que la propagation des ultrasons dans les milieux solides diffèrent par rapport aux milieux liquides suivant leurs caractéristiques (densité, formation du milieu, vitesse du son, etc.). De plus, la présence de bulles d'air dans une couche de glace ou de givre modifie considérablement la réponse du capteur, ce qui expliquerait la réflexion de l'onde ultrasonore à l'interface de deux milieux. Ainsi, l'adjonction d'une couche de plexiglas entre le transducteur ultrasonique et le milieu accumulé a permis de mesurer de faibles épaisseurs d'une accumulation, de discriminer entre les différents types d'accumulations et de l'utiliser comme une référence pour la mesure des épaisseurs de différents milieux accumulés sur une surface. Nous avons conclu que l'utilisation d'un transducteur à faible coefficient de surtension est préférable car il permet une bonne discrimination entre les différents échos. De plus, il permettra de mesurer de faibles épaisseurs d'une accumulation sur une surface.

Ainsi, les travaux réalisés dans le cadre de ce projet ont contribué à une meilleure compréhension de l'effet des ultrasons et de leur propagation dans les différents milieux accumulés (la glace, le givre et l'eau). De plus, ces résultats contribueront à améliorer la conception de nouveaux types de capteurs ultrasoniques, mieux adaptés aux surfaces cylindriques pour pouvoir mesurer la distribution d'une précipitation froide sur une surface.

ABSTRACT

Advancement of research in the development of new types of more powerful sensors intended for the cold region is necessary to increase the reliability of electrical overhead networks under atmospheric icing conditions. For this purpose, these sensors must be capable of measuring ice accumulation thickness.

In this context, the use of the ultrasonic sensor is essential because of their capacity to measure accumulations of high thickness. The purpose of the present report, undertaken within the framework of Canada Research Chair of Atmospheric Icing and Power Network Engineering (INGIVRE) at the University of Quebec in Chicoutimi, is to contribute to the development of an ultrasonic sensor able to punctually measure the thickness of an accumulation of ice on a surface and to discriminate between different types of precipitations.

The experimental results show that the propagation of ultrasounds in solid media differ from that to liquid media as to characteristics such as density, formation of the medium, speed of sound, etc. Moreover, the presence of air bubbles in a layer of ice or white frost considerably modifies the response of the sensor, which would explain the reflection of the ultrasonic waves at the interface of two media. Thus, the addition of a layer of Plexiglas between the ultrasonic transducer and the accumulated medium makes it possible to measure thin accumulations, to distinguish the various types of accumulations and to use the Plexiglas layer as a reference mark for thicknesses measurement of various media accumulated on a surface. It was concluded that using a transducer of low quality factor is preferable because it allows for a better discrimination between the various echoes. Moreover, such a transducer makes it possible to measure thin accumulations on a surface.

Thus, the work completed within the framework of this project has contributed to a better comprehension of the effects of the ultrasounds and of their propagation through various accumulated media (ice, white frost and water). Moreover, these results will contribute to improve the design of new types of ultrasonic sensors, better adapted to cylindrical surfaces and capable of measuring the distribution of cold precipitations on a surface.

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été effectué dans le cadre du programme de la chaire industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE), à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Je tiens tout d'abord à remercier avec une profonde gratitude le Professeur Masoud Farzaneh, mon directeur de recherche et titulaire de la CIGELE, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche, pour ses judicieux conseils tout au long de mes études de maîtrise et pour le soutien financier.

Ma gratitude va également à mon co-directeur de mémoire, Docteur Christophe Volat qui a toujours su m'écouter et me conseiller avec diligence. Sa rigueur au travail, ainsi que sa motivation quotidienne pour le développement d'idées nouvelles, m'auront grandement inspirée tout au long de mes études.

Je tiens à remercier tous les chercheurs, techniciens et administrateurs de la CIGELE, qui m'ont toujours aidé chaque fois que je les ai sollicités. Leur gentillesse à mon égard m'a permis de travailler dans une ambiance agréable, et je leur exprime ici toute ma sympathie. Je tiens tout particulièrement à remercier MM. Marc-André Perron et Pierre Camirand pour le soutien technique dans la réalisation des montages.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour les encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de cette recherche.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE I

INTRODUCTION.....	1
I.1 Problématique	1
I.2 Objectifs de la recherche.....	4
I.3 Méthodologie de travail.....	5
I.4 Originalité et portée de cette recherche.....	6
I.5 Organisation du mémoire	7

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
II.1 Introduction	9
II.2 Mesure ultrasonique.....	11
II.2.1 Les détecteurs à guide d'ondes ultrasonores.....	11
II.2.2 Déetecteurs acoustiques d'impédance.....	16
II.2.2.1 Méthodes à un transducteur.....	16
II.2.2.2 Méthodes à deux transducteurs.....	18
II.2.3 Déetecteurs sensibles à la masse.....	20
II.3 Autres méthodes	22
II.3.1 Méthodes optiques.....	23
II.3.2 Méthodes capacitives.....	28
II.4 Conclusion	31

CHAPITRE III

THÉORIE DE LA PIÉZO-ÉLECTRICITÉ.....	33
III.1 L'effet piézo-électrique.....	33
III.2 Équations de la piézo-électricité.....	36
III.3 Mode de vibration.....	37

III.4 Paramètres caractéristiques et modélisation des éléments piézo-électriques.....	39
III.4.1 Représentation électrique d'un élément piézo-électrique	44
III.4.2 Coefficient de couplage	46
III.4.3 Facteur de qualité mécanique.....	48
III.5 Piézo-électricité dans les céramiques PZT	48
III.5.1 Introduction	48
III.5.2 Caractéristiques physiques d'une céramique PZT.....	51
III.5.3 Les avantages et les inconvénients des céramiques PZT.....	52
III.6 Piézo-électricité dans le matériau PVDF	53
III.6.1 Introduction	53
III.6.2 Origine de la piézo-électricité dans le PVDF	58
III.6.3 Caractéristiques physiques du PVDF	59
III.6.4 Les avantages et les inconvénients des PVDF	61

CHAPITRE IV

LES TRANSDUCTEURS ULTRASONIQUES.

PIÉZO-ÉLECTRIQUE.....	63
IV.1 Théorie des ultrasons.....	64
IV.1.1 Définition des ultrasons	64
IV.1.2 Paramètres de l'onde ultrasonore	65
IV.1.2.1 L'impédance acoustique	66
IV.1.2.2 La longueur de l'onde.....	66
IV.1.2.3 La pression et l'intensité.....	67
IV.1.2.4 L'équation de l'onde ultrasonore	67
IV.1.3 Propagation des ultrasons dans un milieu solide.....	68
IV.1.4 Propagation des ultrasons dans un milieu liquide.....	70
IV.1.5 Émission et réception de l'onde ultrasonore.....	71
IV.1.5.1 Description du faisceau ultrasonore émis	71
a) Zone initiale : zone de Fresnel	72
b) Zone distale : zone de Fraunhofer.....	73
IV.1.5.2 Atténuation d'une onde ultrasonore	74
IV.1.5.3 L'absorption et la dispersion.....	76
IV.1.5.4 Réflexion et réfraction de l'onde ultrasonore	78
IV.1.5.5 Calcul du temps de vol d'une impulsion.....	82
IV.2 Théorie des transducteurs ultrasoniques piézo-électriques	83
IV.2.1 Définition	83
IV.2.2 Simulation de la propagation d'une impulsion ultrasonore	90
IV.2.3 Étude théorique de l'impulsion ultrasonore générée par un transducteur.....	92

CHAPITRE V	
CHOIX TECHNOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIE	
EXPÉRIMENTALE.....	95
V.1 Choix technologique du milieu non piézo-électrique	95
V.2 Réalisation du circuit d'émission et de réception de	
l'onde ultrasonore	98
V.2.1 Partie électronique	98
V.2.1.1 Circuit d'émission	99
V.2.1.2 Circuit de réception	101
V.2.2 Le transducteur	102
V.3 Méthodologie utilisée pour la mesure de la vitesse du son	104
V.3.1 <i>La chambre climatique</i>	105
V.3.2 <i>Procédure expérimentale pour la mesure de la vitesse du son dans les</i>	
<i>differentes précipitations</i>	106
V.3.2.1 <i>Appareillage.....</i>	107
V.3.2.2 <i>Principe de mesure</i>	108
CHAPITRE VI	
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET DISCUSSION.....	111
VI.1 Vitesse du son dans les différents milieux accumulés.....	111
VI.2 Impédance acoustique, coefficient de transmission et	
de réflexion des différents milieux	114
VI.3 Faisceau ultrasonore émis	115
VI.4 Mesure des différentes épaisseurs des milieux accumulés	116
VI.4.1 <i>Épaisseur de 6mm de plexiglas® avec de l'air</i>	116
VI.4.2 <i>Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 10 mm d'eau</i>	117
VI.4.3 <i>Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 10 mm de glace.....</i>	119
VI.4.4 <i>Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 2 mm de pollution-</i>	
<i>épaisseur de 10 mm de glace</i>	121
VI.4.5 <i>Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 9 mm d'eau- épaisseur</i>	
<i>de 10 mm de glace</i>	122
VI.4.6 <i>Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 1,7 mm d'eau-- épaisseur</i>	
<i>de 9 mm de glace</i>	124
VI.4.7 <i>Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 10 mm de givre</i>	126
VI.5 Discrimination des différents milieux accumulés	127
VI.5.1 <i>Cas d'une couche d'eau</i>	129
VI.5.2 <i>Cas d'une couche de glace</i>	129
VI.5.3 <i>Cas d'une couche de givre</i>	130

CHAPITRE VII	
CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS	
POUR LES TRAVAUX FUTURS.....	133
VII.1 Conclusions générales	133
VII.2 Recommandations	135
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	138
ANNEXE.....	145

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

CIGELE	Chaire Industrielle du Givrage des Équipements de Réseaux Électriques
INGIVRE	Chaire de Recherche du Canada sur l'Ingénierie du Givrage des Réseaux Électriques
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi
PVDF	Fluorure de polyvinilidène
PMMA	polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas®)
PZT	Titanate de Zirconate de Plomb
η	Coefficient de viscosité en Pa.s
η_v	Coefficient de viscosité de l'eau en Pa.s
ω	($2\pi f$) Pulsation angulaire exprimée en rad.s ⁻¹
k_t	Coefficient de couplage
λ	Longueur d'onde ultrasonore en m
ρ	Densité du milieu en kg.m ⁻³
ρ_0	Densité de l'élément piézo-électrique en kg.m ⁻³
ρ_1	Densité de l'élément non piézo-électrique en kg.m ⁻³
φ	Température en degrés C
v_L	Vitesse longitudinale dans un solide en m.s ⁻¹
v_t	Vitesse transversale dans un solide en m.s ⁻¹
v_s	Vitesse de surface ou de Rayleigh en m.s ⁻¹

β_1	Constante égale à ωc_1^{-1}
ε_r	Permittivité relative
ε_0	Permittivité de l'espace libre ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)
μ	Coefficient d'absorption en m^{-1}
ν	Coefficient de Poisson
θ	Angle de divergence du faisceau ultrasonore en degrés
Q_m	Coefficient de surtension
α	Coefficient d'atténuation en dB.m^{-1}
l	La distance du champ de Fresnel en m
E_Y	Module de Young en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Z	Impédance acoustique exprimée en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
R	Coefficient de réflexion
T	Coefficient de transmission
c	Vitesse du son dans l'élément piézo-électrique en m.s^{-1}
T_v	Le temps de vol de l'onde ultrasonore en s
β_0	Constante égale au rapport de ωc^{-1}
t_p	Épaisseur de l'élément piézo-électrique en m
C_{33}^D	Coefficient d'élasticité de l'élément piézo-électrique
A	Surface de l'élément non piézo-électrique
c_1	Vitesse du son de l'élément non piézo-électrique en m.s^{-1}
t	Épaisseur de l'élément non piézo-électrique en m
D_s	Diamètre de la source ultrasonore en m
r	Rayon de la source ultrasonore en m
V	Vitesse du son dans un liquide en m.s^{-1}
e	Épaisseur du milieu accumulé en m
T_c	Température de Curie en °C

A_0

Surface d'un élément piézo-électrique en m^2

 e_{mat}

Épaisseur de la couche lame quart d'onde en m

 Z_{mat}

Impédance acoustique de la couche lame quart d'onde en
 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
III-1 Définition et dimension des termes	39
III-2 Coefficient de couplage des différents modes de polarisation	47
III-3 Principales propriétés des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézo-électriques	51
III-4 Principales propriétés du PVDF, de son copolymère P(VF2-VF3), comparées à celles de la céramique PZT-4	60
V-1 Caractéristiques du plexiglas	97
V-2 Paramètres utilisés dans l'accumulation de glace.....	107
V-3 Paramètres utilisés dans l'accumulation du givre.....	107
VI-1 Impédance acoustique, coefficient de réflexion et de transmission de l'onde ultrasonore	115
VI-2 Comparaison entre la mesure théorique et la mesure expérimentale de l'impédance acoustique des deux milieux, glace et givre.....	132

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
II-1	Principe de détection ultrasonique par guide d'onde. (a) Guide d'onde exposé à l'accumulation. (b) Guide d'onde encastré dans la surface à surveiller. (c) Propagation des ondes entre deux transducteurs. (d) Propagation des ondes du transducteur à la surface à surveiller par l'intermédiaire d'un guide d'onde. (e) Principe de détection par réflecteur. (f) Détection par transducteur à substrat piézo-électrique.....	15
II-2	Principe de mesure d'épaisseur d'une accumulation utilisant un seul transducteur ultrasonique en émission et en réception de l'onde ultrasonore	18
II-3	Principe de mesure d'épaisseur d'une accumulation utilisant deux transducteurs ultrasoniques placés avec un angle θ par rapport à une surface à surveiller	19
II-4	Présentation d'un givromètre.....	22
II-5	Principe de détection par source laser.....	24
II-6	Principe de détection par la méthode optique. (a) dans le cas d'un fluide, (b) dans le cas de la glace	26
II-7	Principe de la détection et la mesure d'épaisseur de la glace par la méthode de réfraction de lumière à l'interface.....	27
II-8	Principe de mesure de l'évolution d'épaisseur de la glace sur une surface.....	28
II-9	(a) Principe des méthodes capacitatives; (b) Électrodes opposées à distance variable; (c) Électrodes parallèles à distance variable	30
II-10	Principe de la détection et de la mesure d'épaisseur de la glace par la méthode capacitive	31
III-1	Illustration du principe piézo-électrique	34
III-2	Numérotation des directions en notation tensorielle condensée	37
III-3	Modes de vibration fondamentaux d'un élément piézo-électrique	38
III-4	Schéma équivalent d'un élément piézo-électrique au voisinage de sa fréquence de résonance	40
III-5	Schéma électromécanique équivalent d'un élément piézo-électrique au voisinage de sa fréquence de résonance	41
III-6	Schéma équivalent électrique d'un élément piézo-électrique au voisinage de sa fréquence de résonance	42

III-7	Comportement en fréquence mécanique (a) et électrique (b) d'un transducteur piézo-électrique autour d'une résonance.....	43
III-8	Schéma électrique équivalent au matériau piézo-électrique.....	44
III-9	Le modèle complexe du circuit Butterworth	46
III-10	Microstructure typique d'une surface céramique qui illustre les grains monocrystallins, joints de grains et pores	49
III-11	Polarisation d'un film PVDF	54
III-12	Diagramme schématique d'un sphéroïde montrant la disposition radiale de ses lamelles cristallines et localisation des composants non cristallins	55
III-13	Représentation schématique de la déformation et réorientation des cristaux du polymère soumis à un étirement uniaxial. (a) Cristaux non étirés; (b) Etirement et réorientation; (c) Fibres réorientées.....	56
III-14	Représentation schématique d'un film piézo-électrique avec électrodes conductrices sur les surfaces opposées. (a) Les dipôles moléculaires orientés aléatoirement avant l'application du champ électrique polarisant. (b) Les dipôles moléculaires orientés pendant l'application du champ électrique polarisant. (c) La compression du film entraîne l'apparition de charges sur les faces du matériau	58
IV-1	Propagation d'onde ultrasonore. (a) Onde sphérique, (b) Onde plane	65
IV-2	Propagation des ondes longitudinales dans un solide.....	69
IV-3	Propagation des ondes transversales dans un solide	70
IV-4	Géométrie d'un faisceau d'ondes ultrasonores	74
IV-5	Représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un élément piézo-électrique de diamètre D_s	74
IV-6	Réflexion des ultrasons à une interface	79
IV-7	Comportement des ondes sonores incidentes à une interface	81
IV-8	Mesure du temps de vol d'une impulsion ultrasonore après une réflexion simple.....	82
IV-9	(a) Résonateur, (b) Générateur d'onde acoustique dans un liquide, (c) Générateur d'onde acoustique dans un solide,	84
IV-10	(a) Géométrie d'un élément piézo-électrique avec deux faces acoustiques (1), (2) et une face électrique (3). (b) Schéma électrique équivalent d'un élément piézo-électrique	85
IV-11	Circuit équivalent d'un élément piézo-électrique	86
IV-12	Circuit équivalent d'un élément non piézo-électrique	88
IV-13	Vue en coupe d'un transducteur ultrasonore	89
IV-14	Circuit complet équivalent d'un transducteur avec une charge	90
IV-15	Simulation de la réponse d'une sonde piézo-électrique à une excitation négative	91
IV-16	Circuit équivalent d'un transducteur en contact avec un milieu	93
V-1	Structure du PMMA ($C_5O_2H_8$) _n	97
V-2	Circuit électronique pour la génération d'impulsions.....	100
V-3	Simulation de l'impulsion.....	100

V-4	Limiteur de tension	101
V-5	Sonde piézo-électrique.....	102
V-6	Circuit électronique d'émission et de réception d'onde ultrasonore	103
V-7	Chambre climatique de la CIGELE	105
V-8	Propagation d'une onde ultrasonore	108
V-9	Montage expérimental d'émission, de réception et de visualisation des impulsions ultrasonores	110
V-10	Montage expérimental pour les essais de mesure de vitesse du son dans les différents milieux accumulés.....	110
VI-1	Mesure expérimentale de la variation de l'épaisseur de la glace en fonction du temps de vol de l'impulsion ultrasonore	112
VI-2	Variation de l'épaisseur du givre en fonction du temps de vol de l'impulsion ultrasonore	112
VI-3	Variation de l'épaisseur d'eau en fonction du temps de vol de l'impulsion ultrasonore	113
VI-4	Mesure expérimentale d'une forme de l'onde visualisée à l'oscilloscope pour une épaisseur de 6 mm de plexiglas® chargé par l'air	117
VI-5	Mesure expérimentale de la forme de l'onde visualisée à un oscilloscope pour une épaisseur de 10 mm d'eau déposée à la surface d'une épaisseur de 6 mm de plexiglas®	119
VI-6	Accumulation de glace sur une surface de plexiglas®	119
VI-7	Mesure expérimentale de la variation de l'onde ultrasonore visualisée à l'oscilloscope pour une couche de glace de 10 mm accumulée sur un plexiglas® de 6 mm	120
VI-8	Mesure expérimentale de la forme de l'onde ultrasonore visualisée à l'oscilloscope pour une couche de pollution déposée entre le plexiglas® et la glace.....	121
VI-9	Représentation d'un échantillon composé de plexiglas®, eau et glace.....	122
VI-10	Mesure expérimentale de la forme de l'onde ultrasonore visualisée à oscilloscope pour une couche d'eau sise entre une couche de glace et de plexiglas®	123
VI-11	Mesure expérimentale de la forme d'onde de 6 mm de plexiglas®, 1,7 mm d'eau et 9 mm de glace	125
VI-12	Représentation d'un échantillon composé de 6 mm de plexiglas® et de 10 mm de givre	126
VI-13	Mesure expérimentale de la forme de l'onde ultrasonore pour une accumulation de 10 mm de givre sur une épaisseur de 6 mm de plexiglas®	128

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1 Problématique

Les accumulations de glace ou de neige mouillée sur les équipements des réseaux électriques sont un réel problème pour les compagnies canadiennes de transport et de distribution de l'énergie électrique, que ce soit pour les coûts engendrés par les bris mécaniques occasionnés lors d'événements extrêmes ou simplement pour les coûts relatifs à la prévention des accumulations de glace. Un des exemples les plus marquants est sans aucun doute la tempête de verglas de 1998 qui a malheureusement permis de mettre en évidence la fragilité des réseaux électriques face à des accumulations de glace extrêmes. Cependant, cette catastrophe aura permis aux compagnies et institutions scientifiques canadiennes concernées par cette problématique de prendre conscience de la nécessité de développer des méthodes efficaces permettant, soit de déglaçer les équipements des réseaux électriques, soit de prévenir les accumulations de glace sur ces derniers.

Cette recrudescence de l'intérêt porté à la protection des réseaux électriques face aux accumulations de glace sévères a donné lieu à l'émergence de toute une panoplie de nouvelles méthodes de déglaçage et de prévention plus ou moins efficace [Laforte *et al.*, 1998]. Cependant, cette revue révèle qu'il existe réellement un manque de techniques

efficaces de prévention et de déglaçage, surtout applicables aux lignes aériennes de transport d'énergie électrique. Cette pénurie de méthodes efficaces de prévention des accumulations de glace dans le domaine du transport de l'énergie électrique provient du fait que les contraintes d'applicabilité de ces méthodes sont nombreuses de par des contraintes d'ordre électrique, thermique et mécanique difficiles à respecter [Volat *et al.*, 2005].

Les méthodes actuelles de déglaçage des conducteurs utilisées par la plupart des compagnies sont des méthodes thermiques qui utilisent l'effet Joule produit par la circulation de courant continu ou encore alternatif dans certains cas [Polhman et Landers, 1982] et [Manitoba Hydro, 1993]. L'avantage de ces méthodes est qu'elles utilisent l'énergie disponible sur le réseau afin de déglaçer de longues portions de lignes. Ce choix technologique est cependant coûteux en énergie puisqu'il n'est pas réellement optimisé par les compagnies qui l'utilisent pour des épaisseurs de glace importantes (20 mm d'épaisseur radiale) qui prennent un temps significatif (jusqu'à 75 min.) à être délestées des conducteurs dépendamment des conditions atmosphériques et de l'intensité du courant. L'efficacité de ces méthodes en terme de temps de déglaçage pourrait être facilement optimisée grâce à une détection adéquate des accumulations de glace sur les conducteurs et par un suivi en temps réel de l'évolution géométrique de ces dernières. Cependant, dans la majorité des cas, l'accumulation de glace autour des conducteurs ou sur une surface cylindrique n'est pas uniforme et présente une géométrie semi-elliptique plutôt que cylindrique dépendamment de la rigidité des conducteurs [Blackburn *et al.*, 2002]. Ainsi, pour une détection optimale, le système de détection utilisé devrait être en mesure

d'identifier cette géométrie, d'en évaluer la nature (glace, neige ou givre) et le danger par une mesure de poids.

À l'heure actuelle et au meilleur de nos connaissances, il n'existe aucun système qui puisse rencontrer de telles contraintes et particulièrement, qui puisse mesurer la distribution de l'épaisseur de glace autour d'une surface cylindrique. Le seul système en service actuellement sur les réseaux électriques provient du domaine aéronautique et permet, à partir d'algorithmes sophistiqués, d'estimer de façon discrète le poids de glace accumulée sur les conducteurs et non son épaisseur [Laforte *et al.*, 1995], [Féllin, 1984] et [Guesdon, 2000].

Nombre de capteurs, développés majoritairement pour le domaine aéronautique, sont disponibles commercialement mais aucun d'entre eux ne répond aux exigences particulières de ce projet tel que la possibilité d'intégration sur une surface courbe, la mesure quasi ponctuelle d'une épaisseur de glace importante ainsi que la distribution de point de mesure le long de la circonférence d'un cylindre. Ces exigences nécessiteraient d'utiliser différents types de capteurs qu'il serait impossible d'intégrer sur une petite surface cylindrique équivalente à celle d'un conducteur. Une des contraintes difficiles à respecter est sans aucun doute la mesure d'épaisseurs importantes (supérieures à 1 cm) puisque la majorité des méthodes permettent une détection rapide, de faible épaisseur, ainsi qu'une discrimination des différents types de précipitations (pluie, verglas, neige, givre). La seule méthode qui soit assez simple à mettre en œuvre pour la mesure de fortes épaisseurs se

trouve dans l'utilisation des ultrasons. Cependant, peu d'études ont été réalisées dans le domaine du givrage atmosphérique [Hansman et Kirby, 1985] et des recherches supplémentaires s'imposent donc afin de permettre une éventuelle utilisation de cette méthode dans le développement d'un système de détection de glace applicable aux conducteurs des lignes aériennes.

I.2 Objectifs de la recherche

L'objectif principal de la présente étude, effectuée dans le cadre de la chaire de recherche du Canada sur l'ingénierie du givrage des réseaux électriques (INGIVRE), est de contribuer au développement d'un capteur ultrasonique qui permette de mesurer simplement, ponctuellement, l'épaisseur de glace accumulée sur une surface de préférence cylindrique. Pour ce faire, l'utilisation d'un capteur ultrasonique est privilégiée compte tenu des possibilités qu'il offre dans la mesure d'épaisseurs importantes [Hansman et Kirby, 1985]. Cette étude vise donc à établir la performance des capteurs ultrasoniques dans la mesure d'épaisseur de glace et de vérifier leur pouvoir de discrimination entre les différentes précipitations froides comme le verglas, le givre ou la pluie.

De façon plus spécifique, cette recherche a pour but d'accroître les connaissances dans le domaine de la propagation des ultrasons dans la glace ou encore le givre et d'étudier les différents phénomènes reliés à la vitesse de propagation, l'absorption et la réflexion aux interfaces. De plus, cette recherche permettra d'effectuer des choix technologiques en vue de développer un capteur pour mesurer l'épaisseur de glace autour d'un cylindre tout en

permettant une discrimination adéquate entre les différents types d'accumulations présentes. Les choix technologiques portent essentiellement sur différents aspects reliés à l'émission et la réception d'une onde ultrasonore ainsi que sur le transducteur à utiliser.

I.3 Méthodologie de travail

Pour atteindre les objectifs fixés dans cette recherche, qui a été entièrement réalisée dans les laboratoires du pavillon de recherche sur le givrage atmosphérique de l'UQAC, les étapes suivantes ont été suivies:

- Étude bibliographique sur les différentes méthodes de détection et de mesure d'épaisseur de glace.
- Étude théorique de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux solides et liquides et particulièrement dans la glace, le givre et l'eau, étude théorique et modélisation des transducteurs ultrasoniques.
- Réalisation d'un circuit d'émission et de réception (ER) d'une impulsion ultrasonore.
- Mesure de la vitesse de propagation du son dans différents milieux tel que la glace, l'eau et le givre et validation de la mesure d'épaisseur grâce au circuit électronique ER et d'un transducteur commercial utilisant un élément piézo-électrique PZT.
- Étude de l'influence des paramètres tel que l'atténuation, l'absorption et la dispersion d'une impulsion ultrasonore dans les différents milieux étudiés.

- Réalisation d'un transducteur ultrasonique simple à base d'éléments piézo-électriques basés sur l'utilisation des PZT (sonde commerciale) permettant une mesure d'épaisseur importante.
- Étude des possibilités du transducteur dans la discrimination des précipitations froides.
- Étude de l'influence de type d'accumulation et son épaisseur sur la réponse du transducteur ultrasonore.

I.4 Originalité et portée de cette recherche

L'originalité de cette recherche provient de l'utilisation des ultrasons en mode écho (émission/réception d'une impulsion) dans le but de discriminer le type d'accumulation présent à la surface du transducteur et conjointement en mesurer l'épaisseur accumulée. Dans ce but, une technologie issue de l'échographie ultrasonique a été adaptée au besoin du projet et un transducteur a été spécialement développé à cet effet.

Les résultats obtenus serviront de tremplin et de choix technologiques à la réalisation future d'un capteur distribué permettant de mesurer la distribution de l'épaisseur de glace accumulée autour d'un cylindre de faible diamètre (équivalent à celui des conducteurs des lignes à haute tension) et d'en évaluer le poids, ce qui implique aussi une discrimination du type d'accumulation (verglas ou givre).

I.5 Organisation du mémoire

Ce mémoire de maîtrise, qui constitue le rapport des travaux réalisés au cours de cette recherche, est organisé comme suit :

- Le deuxième chapitre présente une revue de littérature des différentes méthodes de détection de précipitations froides et de mesures d'épaisseur.
- Le troisième chapitre porte sur les aspects théoriques de l'étude qui sont présentés en trois parties. La première partie couvre la définition de la piézo-électricité. La deuxième partie décrit la piézo-électricité dans les matériaux PZT et la troisième partie couvre une introduction sur les films PVDF et leurs caractéristiques.
- Le quatrième chapitre traite des ultrasons et leur propagation dans un milieu solide (glace, givre) et liquide (eau), de la réflexion aux interfaces (glace/air), de l'absorption et de la dispersion. Ce chapitre propose aussi une définition des transducteurs piézo-électriques.
- La description du dispositif expérimental fait l'objet du cinquième chapitre. À cet effet, l'électronique associée au système d'émission et de réception d'impulsions afin de mesurer la vitesse de propagation du son dans la glace, l'eau et le givre est décrite en détail.
- Le sixième chapitre traite des différents résultats de mesures d'épaisseur de l'accumulation des différentes précipitations (eau, glace, givre) sur une surface et de la discrimination entre les milieux accumulés.

- Enfin, le septième chapitre présente les conclusions ainsi que les recommandations pour les travaux futurs reliés à cette recherche. Les conclusions générales seront également présentées dans ce chapitre.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

II.1 Introduction

Les premiers développements relatifs à la détection des accumulations de glace proviennent du domaine aéronautique et débutèrent dans les années cinquante suite à l'écrasement de plusieurs avions, causés par des dépôts de glace sur les ailes. Depuis, une large gamme de détecteurs a été développée, en premier lieu, dans le domaine aéronautique mais aussi dans le domaine des transports routiers. La revue de littérature montre que sur la centaine de principes de détection identifiés, seulement deux d'entre eux, adaptés du domaine aéronautique, sont dédiés exclusivement à la détection des accumulations de glace sur les conducteurs.

La fonction de base d'un détecteur de glace est d'assurer une détection rapide de la présence de glace sur la surface exposée et cela, indépendamment des conditions environnementales et autres facteurs influents. Cela implique aussi que le détecteur doit être en mesure de pouvoir identifier ou discriminer les différents types de dépôts accumulés qui peuvent être de différentes natures comme de la glace, du givre, de l'eau mais aussi des fluides antigivre ou encore un mélange de tout cela. De plus, dépendant de son utilisation,

le détecteur doit aussi être en mesure de quantifier le dépôt de glace par une mesure de son épaisseur afin de commander les systèmes de déglaçage au moment le plus approprié. Évidemment, toutes ces mesures doivent se faire en considérant la possibilité de la présence de poussières et autres contaminants atmosphériques à la surface de la structure sous surveillance, qui peuvent nuire grandement au bon fonctionnement du détecteur.

Chaque type de précipitations froides (glace, neige, givre, etc.) ou tout autre liquide présent à la surface d'un détecteur (eau, fluides antigivres) présentent des propriétés physiques différentes qui permettent de les identifier. Ces propriétés physiques, tel que la conductivité électrique, la permittivité diélectrique, l'impédance acoustique, l'indice de réfraction, la densité, etc. sont ainsi exploitées dépendamment du type de détecteur utilisé pour effectuer la détection et la discrimination des dépôts et pour en mesurer l'épaisseur dans certains cas.

L'identification des principes physiques relatifs au dépôt de contaminants de différentes natures a été utilisée dans ce chapitre afin de classifier les détecteurs. Ainsi, les méthodes de détection peuvent être classifiées selon les catégories suivantes:

- Méthodes ultrasoniques,
- Méthodes optiques,
- Méthodes électromagnétiques,
- Méthode manuelle.

Un intérêt particulier sera porté aux méthodes basées sur l'utilisation des ultrasons puisque ces dernières nous intéressent plus particulièrement. Outre les méthodes ultrasoniques et à des fins de comparaison, le principe de quelques méthodes que nous avons jugé pertinentes est présenté dans ce chapitre.

II.2 Mesure ultrasonique

Les détecteurs ultrasoniques de glace répertoriés dans la littérature peuvent être classifiés selon trois groupes. Le premier groupe comprend les détecteurs à guide d'ondes ultrasonores, le second, les détecteurs d'impédance et le troisième, les détecteurs de masse. Réalisés à base d'élément piézo-électrique ou magnétostrictive, les détecteurs ultrasoniques exploitent le principe de transmission d'une onde ultrasonore pour en étudier le changement de ses paramètres caractéristiques comme son amplitude, sa phase, sa vitesse de propagation dans le milieu étudié et cela, entre l'émission et la réception de cette dernière.

II.2.1 Les détecteurs à guide d'ondes ultrasonores

Les détecteurs à guide d'ondes ultrasonores sont basés sur le principe de transmission d'une onde ultrasonique à travers un guide d'onde mis en contact avec l'extérieur et sur lequel peut s'accumuler la glace ou tout autre substance.

Le principe de ces détecteurs consiste à propager des ondes de Lamb à travers le guide d'onde et d'étudier les changements de leurs paramètres caractéristiques comme

l'amplitude, la vitesse ou encore la phase lorsque la glace ou tout autre substance se dépose sur le guide. L'avantage d'utiliser des ondes de Lamb, dont les différents modes dépendent de la fréquence de l'onde et de l'épaisseur du guide [Luukkala, 1993] et [Luukkala, 1980], est qu'elles présentent une importante densité d'énergie acoustique près de la surface. Ainsi, lorsque la glace, le givre ou toute autre substance se dépose sur le guide, l'onde de Lamb, émise sous forme d'impulsion ultrasonique, échange donc une énergie acoustique plus ou moins importante dépendamment de l'impédance acoustique du milieu déposé, ce qui entraîne une atténuation plus ou moins importante de l'amplitude de l'onde [Luukkala, 1993]. Les méthodes présentées dans les pages suivantes utilisent toutes des ondes de Lamb mais diffèrent selon le type de guide d'onde utilisé et le principe d'émission et de réception de ces dernières.

Le premier principe de détection utilise un guide d'onde spécifique, soit rectangulaire (figure II-1(a)) ou cylindrique (figure II-1(b)) qui est exposé à l'environnement extérieur en étant soit fixé sur la surface à surveiller ou soit encastré dans cette dernière. L'onde de Lamb est émise et détectée en utilisant soit des transducteurs piézo-électriques [Chamuel et Jacques, 1982], qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique, soit des transducteurs magnétostrictifs qui transforment l'énergie magnétique en énergie mécanique [Chamuel, 1982]. Ainsi, lorsque la glace se dépose sur le guide, une partie de l'onde de Lamb émise sous forme impulsionnelle se propage dans la couche de glace, induisant ainsi une forte atténuation de son amplitude. La couche de glace agit sur la fréquence de l'onde émise, puisqu'elle contribue à l'augmentation de l'épaisseur du guide d'onde et donc agit

sur le mode de propagation de l'onde. En présence d'une couche liquide, l'atténuation de l'onde est moindre et permet donc une distinction entre une couche de glace ou une couche de liquide (eau ou liquides dégivrants). Ces méthodes sont utilisées pour la détection des accumulations de glace sur les aéronefs, [Luukkala, 1993], [Schugt, 1996], [Luukkala, 1993] ainsi que sur les routes et autoroutes [Luukkala, 1980].

Le deuxième principe de détection est toujours basé sur la détection des changements des caractéristiques des ondes de Lamb dont la propagation est, cette fois-ci, assurée par la surface à surveiller elle-même entre la partie émettrice et réceptrice. Ainsi, les transducteurs ultrasoniques, à base d'élément piézo-électrique, magnétostrictif et électromagnétique assurant l'émission et la réception des ondes de Lamb, sont soit fixés directement sur la surface à surveiller, tel qu'illustrés par la figure II-1(c) soit accouplés à un guide d'onde qui lui, est fixé à la surface à surveiller (figure II-1(d)). Ce principe est principalement utilisé dans le domaine aéronautique dans lequel l'aile d'avion sert de guide d'onde. Ainsi, aucune partie additionnelle ne vient modifier l'aérodynamisme de l'aile. Le principe de détection est le même que pour les guides d'ondes, permettant de détecter différents types d'accumulations (eau, glace, liquide dégivrant) présents sur l'aile [Chamuel, 1982] [Watkins *et al.*, 1983]. Sur ce même principe est basé le détecteur présenté à la figure II-1(e) qui utilise un seul transducteur ultrasonique, fonctionnant en émetteur et récepteur, qui est couplé à un réflecteur [Matuseski *et al.*, 1999]. Le mode de détection ici est basé sur le changement de phase de l'onde de Lamb qui permet une meilleure discrimination entre les différentes substances déposées sur la surface à surveiller.

Enfin, pour le dernier principe de détection, l'émetteur, le récepteur et le guide d'onde sont tous les trois intégrés sur le même substrat piézo-électrique afin de former un détecteur d'ondes de surface. Dans ce cas particulier, les ondes générées sont des ondes de Love qui sont des ondes très similaires aux ondes de Lamb mais qui se propagent seulement dans des épaisseurs très faibles. Les transducteurs sont réalisés directement sur le substrat piézo-électrique, qui sert aussi de guide d'onde, par l'utilisation d'électrodes interdigités, comme le montre la figure II-1(f) [Brace et sanfellipo, 1990]. La détection de glace se fait par un changement de la fréquence de l'onde émise. Avec une surface totale de 25 mm^2 , ce détecteur miniature peut facilement être installé sur tout type de surface sans réellement perturber son milieu. Il est extrêmement sensible aux tous premiers signes de givrage, tout comme à la pollution, ce qui peut considérablement réduire son efficacité.

L'avantage principal de ces méthodes de détection basées sur l'utilisation des ondes de Lamb se propageant dans un guide d'onde, est leur sensibilité importante permettant une détection très rapide, une discrimination étendue entre les différentes précipitations froides ainsi que les différents fluides lorsque les changements en fréquence sont détectés. Cependant, ces changements en fréquence nécessitent une électronique plus complexe que les changements en amplitude. Le principal inconvénient de ces méthodes est qu'elles ne permettent pas de mesurer des épaisseurs de glace importantes qui restent inférieures à 2 mm. Il est donc préférable d'utiliser ces méthodes comme méthode de détection et non comme mesure d'épaisseur.

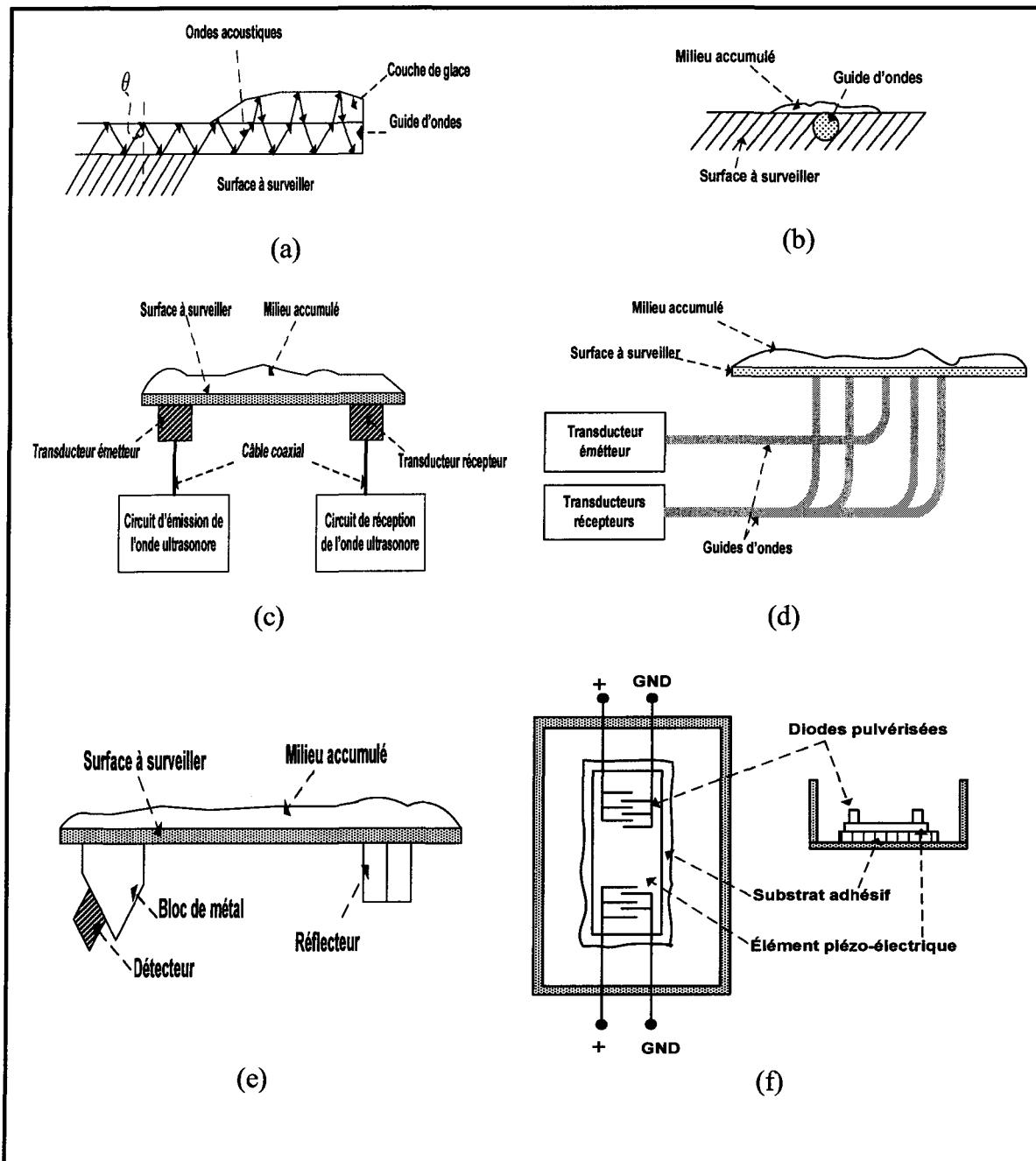


Figure II-1: Principe de détection ultrasonique par guide d'onde. (a) Guide d'onde exposé à l'accumulation [Luukkala, 1980]. (b) Guide d'onde encastré dans la surface à surveiller [Luukkala, 1980]. (c) Propagation des ondes entre deux transducteurs [Watkins *et al.*, 1983]. (d) Propagation des ondes du transducteur à la surface à surveiller par l'intermédiaire d'un guide d'onde [Chamuel, 1982]. (e) Principe de détection par réflecteur [Matuseski *et al.*, 1999]. (f) Détection par transducteur à substrat piézo-électrique [Brace et sanfellipo, 1990]

II.2.2 DéTECTEURS acoustiques d'impédance

Le principe de ces méthodes est basé sur l'adaptation d'impédance acoustique, dont la définition sera donnée au Chapitre IV, à l'interface de deux milieux qui contrôle, avec l'angle d'incident, l'onde acoustique, la quantité d'énergie acoustique transmise et réfléchie à cette même interface. Comme l'impédance acoustique de l'air est négligeable devant celles des liquides et des solides, une réflexion quasi totale est obtenue à l'interface entre l'air et toute autre substance solide ou liquide. C'est cette différence d'impédance qui est exploitée par les différentes méthodes. Les ondes utilisées par les différentes méthodes sont des ondes de volume, longitudinales ou de cisaillement, émises sous forme d'impulsion ultrasonique et dont on mesure le temps de vol, c'est-à-dire, le temps mis entre l'émission et la réception de l'onde. Dépendamment de la présence de glace ou autre substance sur la surface à surveiller et surtout de l'épaisseur du dépôt, ce temps de vol sera plus ou moins long. Les différentes méthodes proposées ont été classées suivant deux catégories : les méthodes utilisant un seul transducteur et les méthodes utilisant deux transducteurs.

II.2.2.1 Méthodes à un transducteur

Certaines des méthodes acoustiques d'impédance utilisent un unique transducteur ultrasonique qui fait office d'émetteur et de récepteur de l'onde ultrasonore [Kirby et Hansman, 1985], [Hsu *et al.*, 1991]. Il peut être soit directement encastré dans la surface à surveiller ou encore, fixé sur la face non exposée de la surface à surveiller, tel qu'illustré respectivement aux figures II-2(a) et II-2(b).

Lorsque aucune substance n'est présente sur la surface à surveiller, le temps de vol est soit nul dans le cas de la figure II-2(a), soit égal à une certaine valeur, la référence temporelle, dans le cas de la figure II-2(b). Lorsqu'une accumulation de glace se produit, un changement dans le temps de vol se produit et indique la présence d'une substance. Connaissant la vitesse du son dans le milieu considéré, l'épaisseur du milieu accumulé peut ainsi être calculée à partir du temps de vol séparant l'émission de l'onde ultrasonore par le transducteur et la détection de l'onde réfléchie, l'écho, par ce même transducteur. L'épaisseur est alors donnée par la relation suivante [Hansman et Kirby, 1985].

$$e = \frac{cT_v}{2} \quad \text{II.1}$$

où:

- c est la vitesse du son dans le milieu accumulé en m.s^{-1} ;
- T_v est le temps de vol de l'onde ultrasonore en s;
- Le chiffre 2 indique que l'onde ultrasonore traverse deux fois le milieu accumulé.

Les méthodes utilisant un seul transducteur offrent l'avantage de mesurer des épaisseurs importantes de glace accumulée sur une surface plane, mais elles ne permettent pas de mesurer de faibles épaisseurs, ni de discriminer entre le givre et la glace car ces derniers présentent une vitesse du son identique [Hansman et Kirby, 1985].

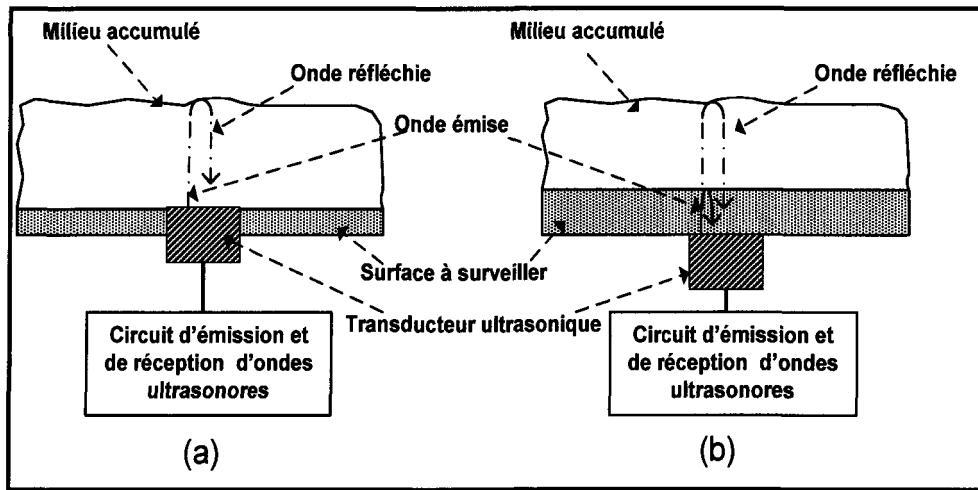


Figure II-2: Principe de mesure d'épaisseur d'une accumulation utilisant un seul transducteur ultrasonique en émission et en réception de l'onde ultrasonore
[Hansman et Kirby, 1985]

II.2.2.2 Méthodes à deux transducteurs

Les méthodes utilisant deux transducteurs sont basées sur l'émission et la réception d'ondes de cisaillement, qui, à l'opposé des ondes longitudinales, ne se propagent pas dans les liquides. Cela permet ainsi d'obtenir une discrimination automatique entre les dépôts solides et liquides [Luukkala, 1993] [Hsu *et al.*, 1991]. À cet effet, des transducteurs spécifiques sont utilisés afin de générer les ondes de cisaillement, encore appelées ondes transversales. Une des méthodes proposées, basée sur l'utilisation des ondes transversales, est la méthode dont le principe est illustré à la figure II-3 [Larue et Bisson, 1994]. Des détecteurs piézo-électriques sont fixés dans un bloc de matériau acoustique, placés avec un angle θ par rapport à la surface à surveiller. L'onde émise par le transducteur émetteur se propage dans le bloc de métal. À l'interface du bloc de métal/milieu accumulé, une partie de l'énergie de l'onde sera transmise et l'autre partie sera réfléchie lorsque le milieu accumulé est solide. Dès la présence d'un milieu accumulé, deux ondes sont réfléchies :

une à l'interface bloc/milieu accumulé qui sert de référence et la seconde à l'interface entre le milieu accumulé/air. L'onde réfléchie à l'interface entre le bloc acoustique et le milieu accumulé, est détectée par le transducteur récepteur, son amplitude et sa phase sont alors comparées avec celles de l'onde de référence à des fins de discrimination. L'épaisseur de la couche accumulée peut aussi être calculée à partir de la mesure d'intervalle de temps séparant l'onde de référence, le premier écho, et l'écho de l'onde réfléchie à l'interface glace/air. Cette technique de détection offre la possibilité de détecter rapidement les premiers instants de givrage en permettant une bonne différenciation entre les différents types de contaminant (glace, eau, neige, fluide antigivre, etc.) [Larue et Bisson, 1994]. Cependant, elle est limitée à la mesure de faibles épaisseurs qui restent inférieures à environ trois millimètres.

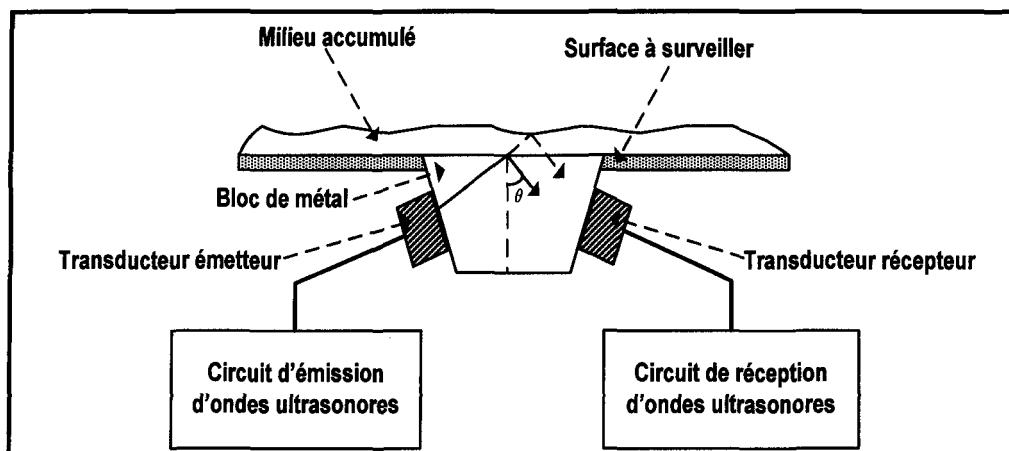


Figure II-3: Principe de mesure d'épaisseur d'une accumulation utilisant deux transducteurs ultrasoniques placés avec un angle θ par rapport à une surface à surveiller [Larue et Bisson, 1994]

II.2.3 DéTECTEURS sensibles à la masse

Les détecteurs sensibles à la masse utilisent le changement de fréquence de résonance d'un diaphragme métallique composé d'un élément électromécanique, vibrant à une fréquence particulière et d'un système électronique pour mesurer et contrôler la fréquence de vibration de l'ensemble [Roy *et al.*, 1998], [Li *et al.*, 2002], [Gerardi et Joseph, 1989], [Daniels et James, 1985] et [Donskoy *et al.*, 1999]. Généralement, on trouve sur la face du diaphragme non exposée un transducteur piézo-électrique pour la génération et la détection des changements de fréquence de résonance de l'ensemble [Zuckerman et Leonard, 1988]. La fréquence de résonance du diaphragme se modifie avec la rigidité de ce dernier, ce qui permet donc la discrimination entre la glace et l'eau. Ainsi, la présence de glace sur la surface exposée du diaphragme entraîne une augmentation de sa rigidité car la glace est un matériel rigide et fragile, alors que la présence d'un film d'eau sur la surface du diaphragme ajoute seulement un poids sans modifier la rigidité du diaphragme, menant ainsi à une diminution de la fréquence de sa résonance. L'avantage principal de ce type de détecteur est qu'il présente une sensibilité aux faibles épaisseurs de glace. De plus, le changement de la fréquence de résonance est linéaire avec l'augmentation de l'épaisseur de glace pour des épaisseurs limitées, inférieur à 0.5 mm [Zuckerman et Leonard, 1988]. Parmi ces méthodes, on trouve une technique de détection qui est munie d'un thermostat pour indiquer la température à la surface du transducteur [Zuckerman et Leonard, 1988]. Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle permet de mesurer uniquement de faibles épaisseurs de glace (≈ 0.5 mm). En plus, les oscillations continues du diaphragme peuvent

perturber le processus d'accumulation de glace et ainsi influencer de ce fait l'exactitude des mesures par une modification du taux d'accumulation [Zuckerman et Leonard, 1988].

D'autres détecteurs emploient le principe de changement de la fréquence de résonance par l'intermédiaire d'une sonde magnétostrictive de petit diamètre avec une faible masse, qui vibre à une fréquence spécifique. Quand la glace s'accumule sur le détecteur, on détecte un certain décalage de fréquence de résonance qui correspond à une quantité critique de glace. Ce type de détecteur a été développé par la compagnie Rosemount et il est commercialement employé par les systèmes météorologiques de détection de glace [Claffey *et al.*, 1995], [Cober et Isaac, 2001], [Laforte *et al.*, 1995] et [Koosmann et Mark, 1986].

Une version modifiée de la sonde Rosemount est employée par la compagnie Hydro-Québec afin de détecter le taux d'augmentation d'événements de givrage et de glace sur les câbles et les conducteurs du réseau électrique. Ce type de sonde, appelée givromètre, est un système composé d'une sonde de forme lisse type Rosemount modèle 871 A de 6,2 mm de diamètre et de 25,4 mm de longueur (voir figure II-4). Un oscillateur excite la sonde magnétostrictive à sa fréquence naturelle qui est de l'ordre de 40 KHz, sans la présence d'une accumulation. Lors d'une accumulation sur la sonde, un changement de la fréquence de résonance qui dépend du mode d'accumulation s'effectue. Le givromètre mesure ainsi périodiquement l'accumulation et un système informatique enregistre chaque signal du givromètre correspondant à une épaisseur donnée. Puis, un algorithme se charge d'interpréter les données en fonction des paramètres environnementaux. Un système de

contrôle active un système de chauffage qui est couplé à une agitation mécanique permettant de dégeler la sonde. L'inconvénient principal du givromètre est qu'il ne permet pas de mesurer l'épaisseur, ni de connaître directement le poids d'une accumulation de glace présente sur une ligne électrique [Laforte *et al.*, 1995], [Féllin, 1984] et [Guesdon, 2000].



Figure II-4: Présentation d'un givromètre [Laforte *et al.*, 1995]

II.3 Autres méthodes

Il existe un nombre important de méthodes qui utilisent des principes de détection différents de ceux utilisés par les méthodes ultrasoniques. Étant donné leur nombre important, il a été décidé de présenter uniquement certaines méthodes dont le principe nous semblait intéressant. Ainsi, les méthodes retenues présentées dans les pages suivantes sont basées sur des principes optiques et capacitifs.

II.3.1 Méthodes optiques

La plupart des détecteurs optiques répertoriés par la littérature sont basés sur la mesure du changement d'un ou plusieurs faisceaux lumineux induits par la réflexion, la dispersion, la réfraction de la lumière ou le changement spectral de transmission dû à l'absorption [Hansman et Dershowitz, 1989], [Anderson et Meiners, 1999], [Brossia et Wu, 1986] et [Bathod *et al.*, 2004].

Le premier principe présenté exploite le changement d'un faisceau lumineux linéairement polarisé reflété par la surface à surveiller. Si la glace est présente, la polarisation du faisceau lumineux est modifiée par la biréfringence de glace. Ce principe offre l'avantage de détecter immédiatement les premiers instants du givrage ainsi qu'une excellente discrimination. Le principal inconvénient de ce type de détection réside dans son système de détection qui exige une électronique complexe pour analyser le changement de la polarisation du faisceau reflété. Cette méthode ne permet pas de mesurer l'épaisseur de la substance en contact avec la surface. De plus, cette méthode est extrêmement sensible à la moindre substance déposée ce qui peut considérablement nuire à la détection en cas de dépôt d'une couche de pollution [Blackwood et Carl, 1992].

Un autre principe utilisé est la mesure de l'absorption d'une certaine longueur d'onde du faisceau lumineux émis par la substance en contact avec la surface à surveiller. Dans la majorité des cas, des sources lumineuses monochromatiques disposant d'une longueur d'onde appropriée comme les lasers, sont utilisées. L'onde lumineuse est dirigée sur la

surface à surveiller et subit une réflexion et une absorption dépendamment de la substance en présence. L'intensité de l'onde réfléchie est analysée et permet ainsi de détecter la présence de glace et d'identifier le type de substance en présence. Cette méthode est généralement utilisée dans le domaine aéronautique pour surveiller, par exemple, la présence de glace sur les avions au sol [Nunnally, 1996] [Pernick, 1995]. Le principal avantage de cette méthode est une détection extrêmement rapide et une très bonne discrimination. De plus, elle peut être utilisée « à distance » et n'est donc pas intrusive comme les méthodes précédentes. Certaines méthodes basées sur ce principe utilisent des caméras thermiques comme système de détection qui sont très coûteuses. De plus, le principe utilisé ne permet pas de mesurer l'épaisseur de glace et est plus complexe à mettre en œuvre. Une illustration de cette méthode est présentée à la figure II-5.

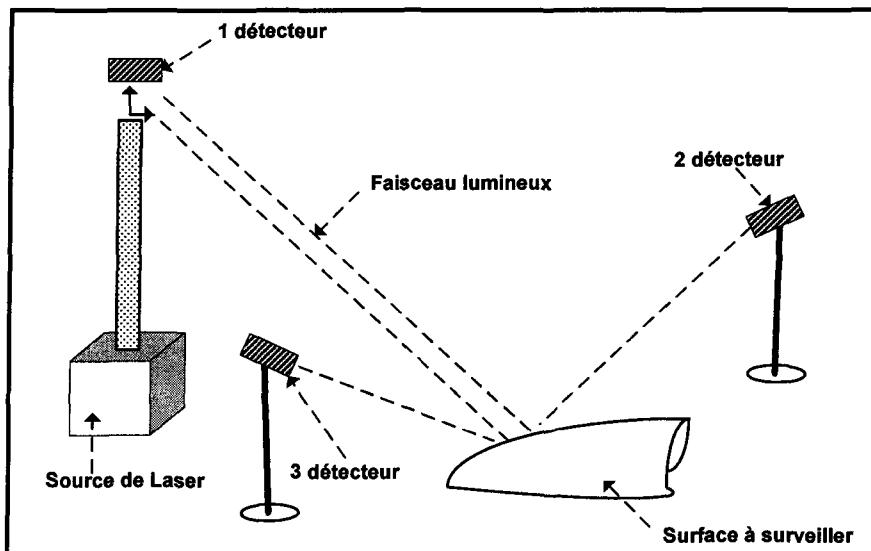


Figure II-5: Principe de détection par source laser [Nunnally, 1996]

Certaines méthodes optiques sont voisines des méthodes ultrasoniques à impédance puisqu'elles reposent sur le principe de réfraction et réflexion de la lumière à l'interface de deux milieux [Federow et Silverman, 1994], [Klainer et Milanovich, 1988], [Burns, 1996], [Burns et Anderson, 1997] et [Klim, 1996]. Le principe de ces méthodes, illustré à la figure II-6, compte sur le changement de l'indice de réfraction entre l'eau et la glace pour discriminer et détecter les premiers instants du givrage.

Tel que représenté à la figure II-6, dans le cas d'une couche de fluide déposée sur la surface de la sonde optique, la lumière incidente subit une réflexion et une transmission à l'interface de la sonde optique/milieu accumulé. L'importance de ces réflexions (échos) dépend de la nature du fluide (eau ou fluide antigivre) ou de la substance solide (glace ou givre), qui présentent des indices de réfraction légèrement différents, engendrant des changements dans la quantité de lumière réfléchie à l'interface entre la substance et l'air. En employant ainsi des filtres électroniques et par l'analyse de signal, il devient possible de différencier entre les substances liquides (eau, fluides dégivrants) et solides (glace, givre,...) [Burns, 1996] et [Burns et Anderson, 1997].

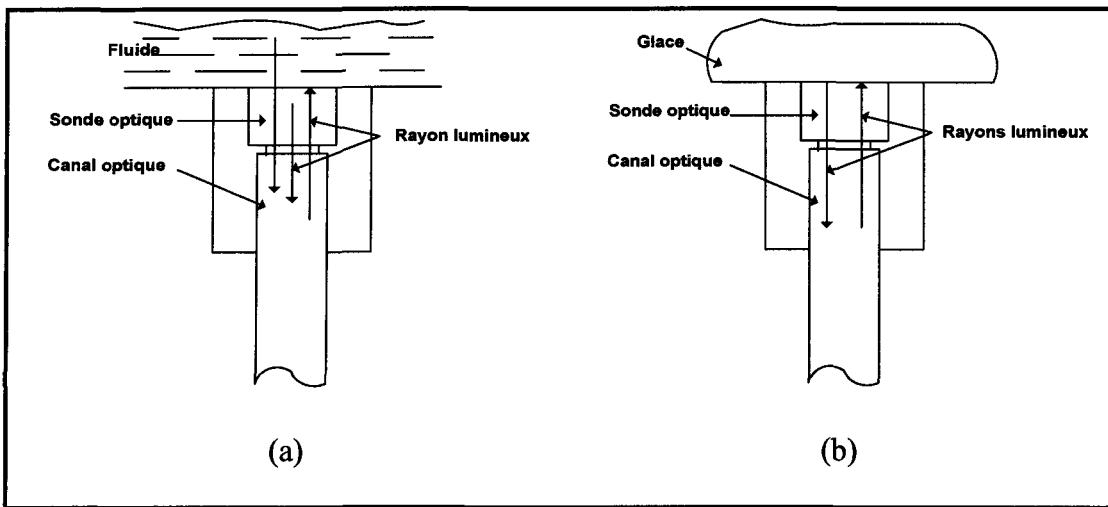


Figure II-6: Principe de détection par la méthode optique. (a) dans le cas d'un fluide, (b) dans le cas de la glace [Burns et Anderson, 1997]

Cette méthode ne permet cependant pas de pouvoir mesurer l'épaisseur de la glace. Ainsi, pour remédier à ce problème, il est possible d'utiliser plusieurs détecteurs optiques distribués de façon adéquate, tel que présentés à la figure II-7 [Klim, 1996]. Dans ce contexte, des capteurs multiples à fibres optiques acheminent la lumière au point de détection et agissent ainsi comme les émetteurs. D'autres fibres optiques sont utilisées comme récepteurs et acheminent la lumière réfléchie aux détecteurs photoélectriques qui convertissent l'intensité lumineuse en signal électrique.

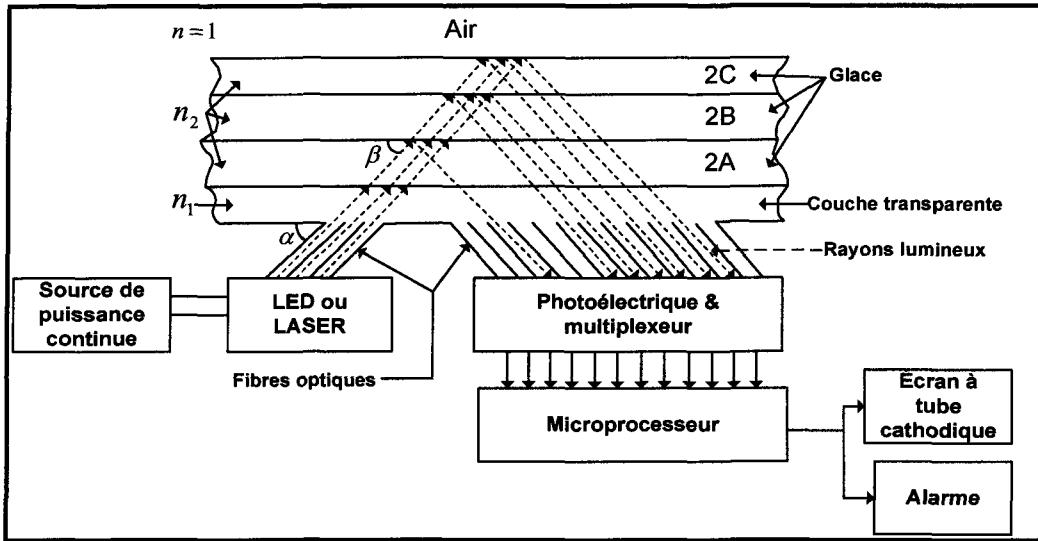


Figure II-7: Principe de la détection et la mesure d'épaisseur de la glace par la méthode de réfraction de lumière à l'interface [Klim, 1996]

Lorsque l'épaisseur de la couche augmente, le nombre de fibres réceptrices éclairées se déplace longitudinalement vers la droite de la figure II-7 et par l'intermédiaire d'un algorithme, l'épaisseur peut en être déduite. D'autres méthodes optiques permettent des mesures d'épaisseur en se basant sur le principe de capteur par fibres optiques distribuées et dont la différence subsiste uniquement dans l'arrangement des fibres optiques émettrices et réceptrices. Certaines méthodes utilisent une seule fibre optique émettrice et plusieurs fibres réceptrices qui généralement entourent l'émettrice, tel qu'illustré à la figure II-8. L'inconvénient majeur de ces détecteurs multifibres est que plus l'épaisseur de la glace augmente et plus il faut augmenter le nombre de fibres réceptrices, ce qui entraîne inévitablement une augmentation de la surface du détecteur.

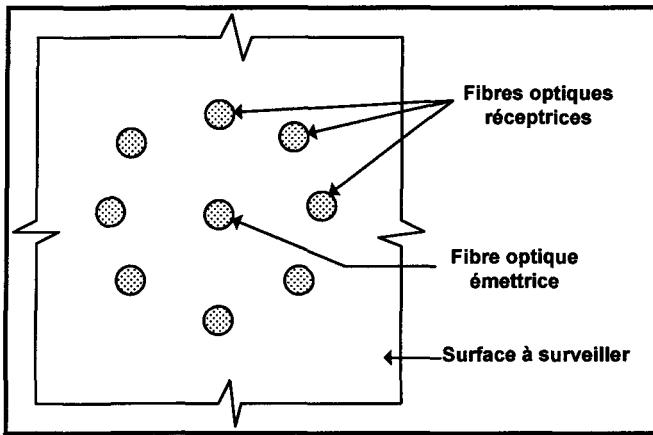


Figure II-8: Principe de mesure de l'évolution d'épaisseur de la glace sur une surface [Klim, 1996]

II.3.2 *Méthodes capacitives*

Les méthodes capacitives utilisent les changements des propriétés diélectriques de la surface à surveiller afin de détecter la présence de substances et discriminer ces dernières [Gerardi *et al.*, 1990] et [Gerardi *et al.*, 1995]. Selon la méthode utilisée, le circuit de détection comporte deux circuits de mesure capacitive et un circuit de mesure de température (voir figure II-9 (a)). Il se compose d'un ensemble d'électrodes placées sur une surface isolante (époxy ou plastique), exposées aux différentes précipitations. La mesure de la température est utilisée afin d'activer les circuits de mesure capacitive dès que la température franchit le point de congélation.

En général, à chaque méthode proposée correspond une certaine géométrie d'électrodes permettant la mesure de capacité et donc la détection. Les méthodes intéressantes présentent des électrodes planes, soit se faisant face (figure II-9 (b) et II-9 (c)), soit de type

interdigités (figure II-1 (f)), déposées sur la surface à surveiller avec une distance variable entre elles [Weinstein, 1987].

Lorsqu'une substance recouvre la surface à surveiller et donc le système d'électrodes, la capacité entre les électrodes sera fortement influencée par la constante diélectrique de cette dernière. La modification de la capacité dépend de la permittivité relative de la substance, de sa conductivité mais aussi de la fréquence de la tension appliquée au condensateur ainsi formé [Weinstein, 1987]. En effet, la glace présente une permittivité relative qui est fortement dépendante de la fréquence. La permittivité relative de la glace vaut environ 3,1 pour des fréquences au-dessus du mégahertz alors qu'elle vaut encore 80 pour l'eau, pour ces mêmes fréquences.

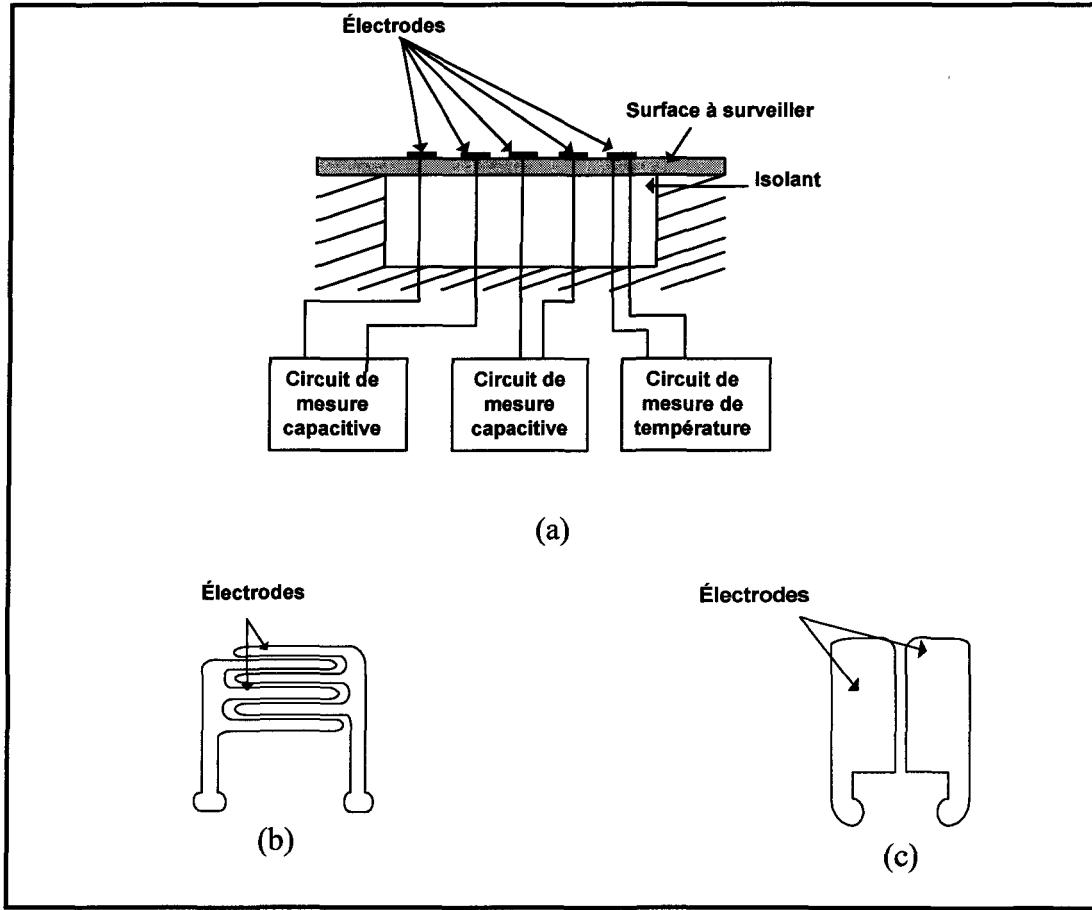


Figure II-9: (a) Principe des méthodes capacitatives [Weinstein, 1987]; (b) Électrodes opposées à distance variable [Weinstein, 1987]; (c) Électrodes parallèles à distance variable [Weinstein, 1987]

De plus, en utilisant des systèmes d'électrodes interdigités plus complexes, comme ceux illustrés à la figure II-10, il est possible de déterminer la permittivité complexe de la substance en contact avec le capteur, encore appelée diélectromètre dans ce cas-ci, et de fournir un système de discrimination extrêmement sensible.

Les avantages des détecteurs de type capacitifs sont leur sensibilité et leur pouvoir de discrimination important. Tout comme les détecteurs interdigités à onde de Love, les

détecteurs capacitifs peuvent avoir des dimensions inférieures au centimètre carré et sont donc très peu encombrants. La mesure d'épaisseur est toutefois possible pour de faibles valeurs puisque cette dernière est limitée par l'espacement entre les électrodes de mesures. Ces détecteurs ont aussi le désavantage d'être sensible à la pollution puisque le moindre dépôt de poussières peut nuire aux mesures [Gerardi et *ali*, 1995].

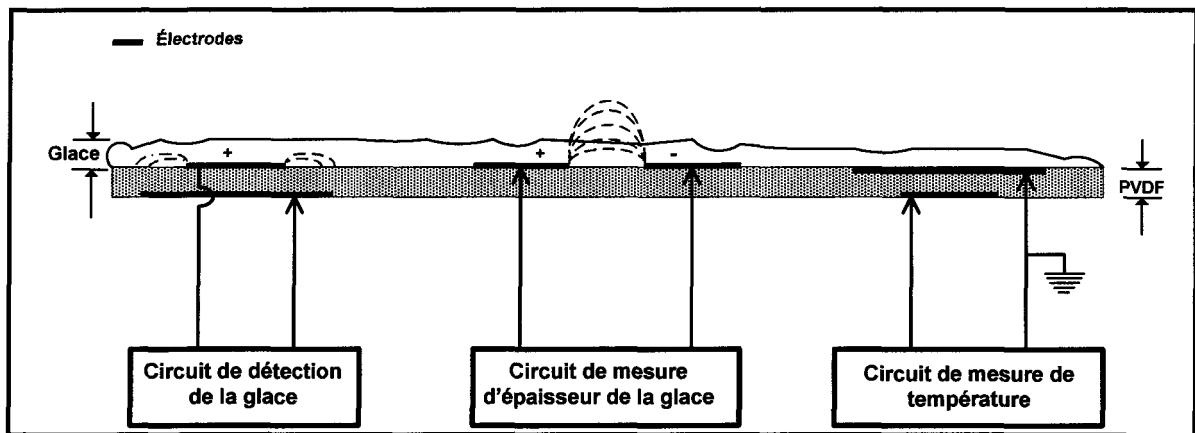


Figure II-10: Principe de la détection et de la mesure d'épaisseur de la glace par la méthode capacitive [Gerardi et *al.*, 1995]

II.4 Conclusion

Nous avons présenté une revue non exhaustive de plusieurs principes utilisés dans la détection et la discrimination des précipitations froides ainsi que la mesure de l'épaisseur du dépôt occasionné avec un accent mis principalement sur les méthodes ultrasoniques. De cette revue, il ressort les points suivants :

- La majorité des méthodes proposées permettent de détecter le développement d'une accumulation de glace sur la surface à surveiller.

- Toutes les méthodes présentées ont en commun le fait de n'être pas ou très peu intrusives.
- Les méthodes optiques, capacitives et les méthodes utilisant les ondes ultrasoniques de cisaillement sont les plus sensibles en terme de rapidité de détection.
- Parmi les méthodes proposées, ce sont les méthodes capacitives qui assurent la meilleure discrimination des substances en présence.
- D'un point de vue encombrement, les détecteurs capacitifs et à onde de Love, utilisant des électrodes interdigités de même que les capteurs à fibres optiques sont tout indiqués pour effectuer des mesures ponctuelles de par leur taille extrêmement petite. Cependant, ils sont extrêmement sensibles aux dépôts de poussières qui peuvent diminuer leur sensibilité.
- La méthode basée sur l'utilisation d'un transducteur ultrasonique unique fonctionnant en mode émission-réception d'une impulsion longitudinale est la seule méthode qui permette de mesurer des épaisseurs de glace importante.

Ainsi, dans l'optique de développer un système qui soit compact, facile à mettre en œuvre et permettant de mesurer des épaisseurs de glace importantes, la méthode ultrasonique d'impédance utilisant un seul transducteur a donc été retenue. Notre choix s'est basé principalement sur le fait qu'elle est la seule à pouvoir mesurer de fortes épaisseurs de glace, supérieures au cm, qu'elle dispose d'un certain pouvoir discriminateur et qu'elle est facile à mettre en œuvre puisqu'elle ne nécessite peu de matériel coûteux et d'électronique sophistiquée.

CHAPITRE III

THÉORIE DE LA PIÉZO-ÉLECTRICITÉ

III.1 L'effet piézo-électrique

Le terme piézo vient du terme grec piézen (presser, contraindre). On appelle piézo-électricité, la propriété que possèdent certains matériaux de pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique, c'est-à-dire une onde électrique en une onde mécanique ou inversement [Brown et Goodman, 1971], [Dognon, 1953], [Syrota, 1994] et [Banks *et al.*, 1966]. La piézo-électricité peut être définie comme l'interdépendance entre les phénomènes mécaniques (déformation, contrainte) et électriques (champ électrique, charge électrique) que possèdent certains matériaux (milieux cristallins : Quartz, Titanate de Barium, Oxyde de Zinc, Céramiques: PZT, Polymères: PVDF).

L'effet piézo-électrique fut découvert en 1880 par les frères Curie qui remarquèrent qu'une plaque découpée dans un cristal suivant une direction perpendiculaire possédait la propriété de produire un potentiel électrique entre ses faces lorsqu'on lui appliquait une pression mécanique. Cet effet est appelé **effet piézo-électrique direct**, un phénomène de polarisation électrique induit par l'application d'une contrainte à certains matériaux. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte et change de signe avec elle. Cette dernière est importante pour certains cristaux naturels, comme le quartz.

Lippmann, en 1881, prédit l'effet inverse et montra que de tels cristaux pourraient servir à produire des signaux électriques proportionnels aux vibrations mécaniques alternées qu'on leur appliquerait. Une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînerait une déformation du même matériau. On parle alors **d'effet piézo-électrique inverse**. La figure III-1 illustre le principe piézo-électrique.

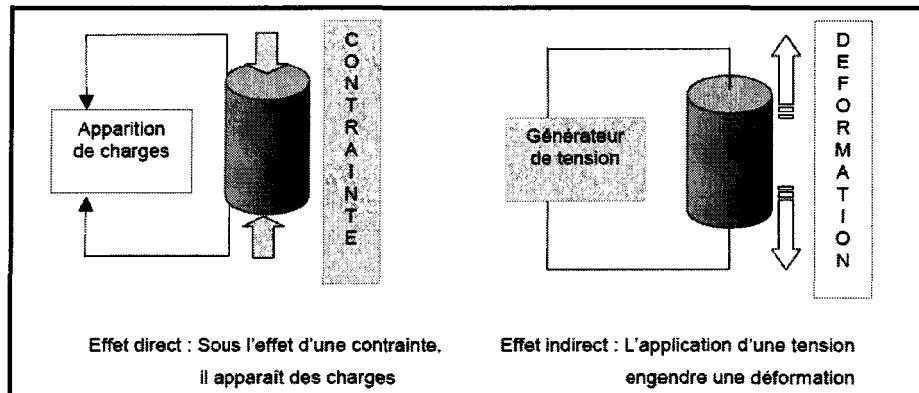


Figure III-1: Illustration du principe piézo-électrique

Actuellement, on dispose de nombreux matériaux présentant des propriétés piézo-électriques. Chacun d'eux possède des caractéristiques qui le destinent à une application particulière.

❖ **Les cristaux :** le quartz et la tourmaline sont sans doute les cristaux naturels les mieux connus découverts respectivement par Matthias et Aurivillus en 1949. Ils présentent une impédance acoustique relativement élevée et un coefficient de couplage très faible. D'autres cristaux, comme le niobate de lithium (LiNbO_3) ou le

tantalate de lithium (LiTaO_3) affichent des valeurs de coefficient plus élevées. Le coût élevé et la fragilité de ces cristaux expliquent qu'on ne les retrouvent que très peu dans les produits actuels. Ils sont cependant utilisés en laboratoire dans des dispositifs à très haute résolution pour des raisons essentiellement technologiques.

- ❖ **Les céramiques polycristallines** : le titanate de baryum est apparu en 1945 et le titanate-zirconate de plomb (PZT) a été élaboré dès 1954. Ce sont les ancêtres des céramiques actuelles. Ils présentent un coefficient de couplage et une impédance acoustique très élevés.
- ❖ **Les polymères** : ces matériaux piézo-électriques, découverts par Kawai en 1969, sont très utilisés à l'heure actuelle. Ces polymères semicristallins comme les PVDF, présentent des propriétés piézo-électriques lorsqu'ils sont sous l'influence d'un champ électrique. Leurs premières applications ont commencé au début des années 80.

Il est à noter que tout matériau chauffé au-delà d'une valeur appelée température de Curie, notée T_c , perd sa piézo-électricité. T_c étant typiquement comprise entre 80 et 400 °C (120 °C pour le titanate de baryum, 320 °C pour le titanate-zirconate de plomb (PZT) et 100°C pour les PVDF) [Chen et Payne, 1994].

III.2 Équations de la piézo-électricité

Le phénomène piézo-électrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les huit équations d'état présentées ci-dessous relient les variables électriques (induction électrique D (C.m^{-2}) ou champ électrique E (V.m^{-1})) aux variables mécaniques (déformation S ou contrainte T (N.m^{-1})). Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique d'un matériau piézo-électrique.

Trois types de coefficient interviennent :

- Des coefficients purement électriques,
- Des coefficients purement mécaniques,
- Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

Il est courant de présenter ces équations sous la forme suivante :

$$\begin{array}{ll}
 D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k & S_i = s_{ij}^E T_i + d_{mi}^t E_m \\
 E_m = -g_{mi} T_i + \beta_{mk}^T D_k & S_i = s_{ij}^D T_i + g_{mi}^t D_m \\
 D_m = e_{mi} S_i + \varepsilon_{mk}^S E_k & T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi}^t E_m \\
 E_m = -h_{mi} S_i + \beta_{mk}^S D_k & T_i = c_{ij}^D S_j - h_{mi}^t D_m
 \end{array} \quad \text{III.1}$$

où:

- ' indique la transposée de la matrice considérée.

- x indique que la grandeur considérée est définie à x constant ou nul, avec $x = E, D, S$ ou T .

$i, j = 1, \dots, 6$

$m, k = 1, \dots, 3$

Les coefficients i, j, m et k représentent la notation tensorielle de la figure III-2.

La définition et la dimension de chacun des termes sont rappelées dans le tableau III-1. Si la température φ intervient, sa prise en compte nécessite d'introduire ce paramètre dans l'équation III.1.

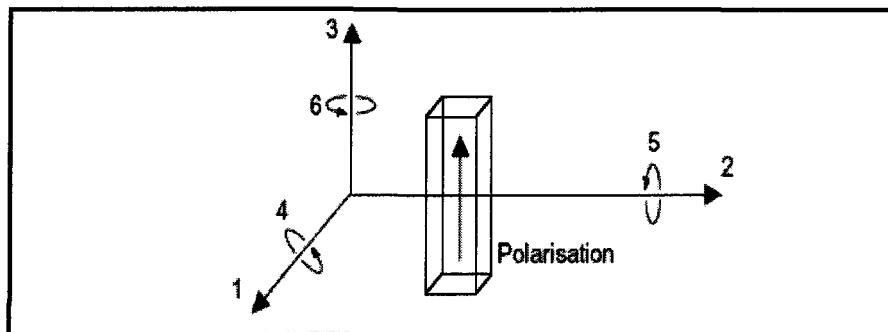


Figure III-2: Numérotation des directions en notation tensorielle condensée
[Rizet, 1999]

III.3 Mode de vibration

On distingue trois modes de vibration fondamentaux d'un élément piézo-électrique. La nature de ces modes, autrement dit la distribution géométrique de la déformation, dépend des dimensions de l'échantillon considéré mais aussi de la direction de la polarisation \vec{P} et

du champ électrique appliqué \vec{E} . Il est ainsi possible de privilégier un mode de vibration donné par un choix adéquat de ces grandeurs. La figure III-3 présente ces modes fondamentaux et les conditions d'excitation nécessaires à leur obtention.

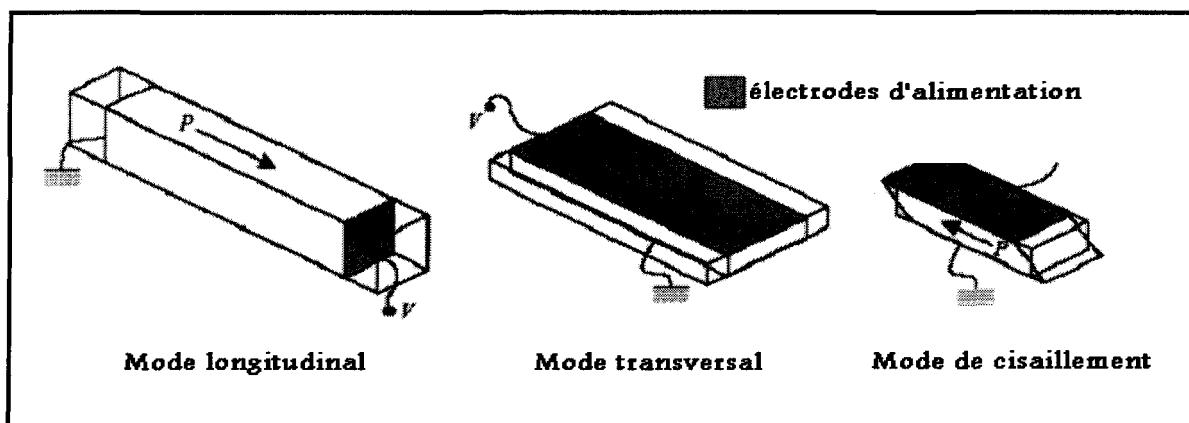


Figure III-3: Modes de vibration fondamentaux d'un élément piézo-électrique [Rizet, 1999]

Type	Signification	Unités	Dimensions
Électrique	D Déplacement électrique ou induction	C.m^{-2}	3x1
	E Champ électrique	V.m^{-1}	3x1
	ϵ permittivité électrique	F.m^{-1}	3x3
	β imperméabilité diélectrique	m.F^{-1}	3x3
Mécanique	S déformation relative		6x1
	T contrainte	N.m^{-2}	6x1
	s souplesse	$\text{m}^2.\text{N}^{-1}$	6x6
	C raideur	N.m^{-2}	6x6
Piézo-électrique	d constante reliant la contrainte T et l'induction D à E constant	C.N^{-1} ou m.V^{-1}	3x6
	e constante reliant la déformation S et l'induction D à E constant	C.m^{-2} ou $\text{N.V}^{-1}.\text{m}^{-1}$	3x6
	g constante reliant la contrainte T et le champ E à D constant	V.m.N^{-1} ou $\text{m}^2.\text{C}^{-1}$	3x6
	h constante reliant la déformation S et le champ E à D constant	V.m^{-1} ou N.C^{-1}	3x6

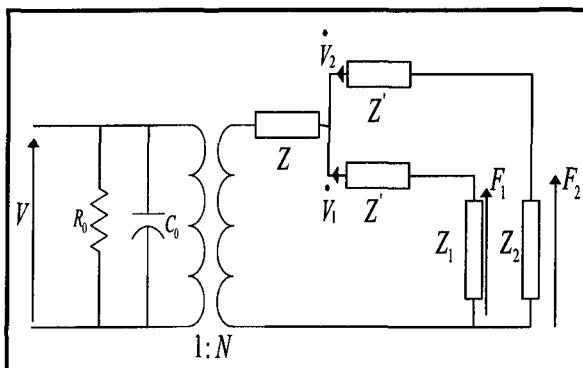
Tableau III-1: Définition et dimension des termes [Rizet, 1999]

III.4 Paramètres caractéristiques et modélisation des éléments piézo-électriques

Au voisinage de la fréquence de résonance d'un mode de vibration, un élément piézo-électrique peut être représenté par son schéma électrique équivalent présenté à la figure III-4. Ce modèle définit le comportement macroscopique de l'échantillon. Chaque composante du circuit dépend directement des caractéristiques intrinsèques du matériau, définies dans le

tableau III-1, ainsi que du mode de vibration considéré. Les éléments au primaire du transformateur traduisent le comportement diélectrique de l'élément piézo-électrique. La capacité C_0 est la capacité obtenue entre les deux électrodes d'alimentation de l'élément piézo-électrique. La résistance R_0 représente les pertes diélectriques de l'élément piézo-électrique.

Le transformateur représente la conversion électromécanique. Son rapport de transformation N , appelé facteur de force, renseigne sur la disposition du transducteur à travailler plutôt en force ou plutôt en déplacement. Les impédances Z et Z' sont les images de l'impédance mécanique du matériau.



$V_{1,2}$: Vitesse de vibration de la face 1 ou 2 de l'élément piézo-électrique.

$Z_{1,2}$: Impédance acoustique sur la face 1 ou 2.

$F_{1,2}$: Force générée par la face 1 ou 2.

Figure III-4: Schéma équivalent d'un élément piézo-électrique au voisinage de sa fréquence de résonance [Rizet, 1999]

Lorsque l'échantillon piézo-électrique est chargé par l'air, l'impédance acoustique de ce dernier est suffisamment faible. On considère alors F_1 et F_2 comme nulles. L'échantillon peut, dans ce cas, être considéré comme libre. Les vitesses des faces de l'élément piézo-

électrique sont alors opposées et le circuit de la figure III-4 se ramène à celui de la figure III-5. Dans ces conditions et autour d'une fréquence de résonance, les éléments au secondaire du transformateur se réduisent à un simple circuit RLC . L'induction L représente la masse dynamique ou la masse réelle en vibration. La souplesse du matériau est représentée par la capacité C . La résistance R correspond aux pertes mécaniques dues aux frottements internes [Rizet, 1999].

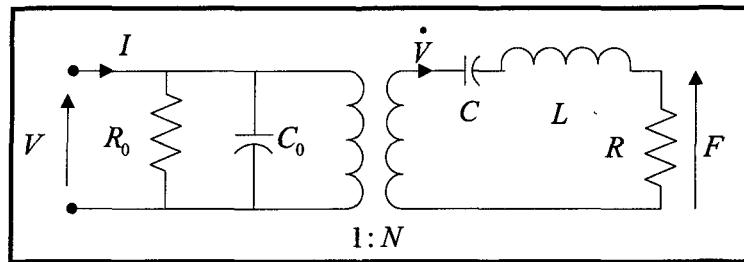


Figure III-5: Schéma électromécanique équivalent d'un élément piézo-électrique au voisinage de sa fréquence de résonance [Rizet, 1999]

Finalement, en ramenant les composantes au primaire du transformateur, un schéma équivalent électrique de l'échantillon est obtenu (voir figure III-6). R_0 et C_0 forment la branche bloquée qui traduit l'aspect diélectrique du matériau. La branche modale composée de C_m , L_m et R_m , représente l'aspect mécanique [Rizet, 1999].

La fréquence de résonance de la branche modale est donnée par :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{III.2}$$

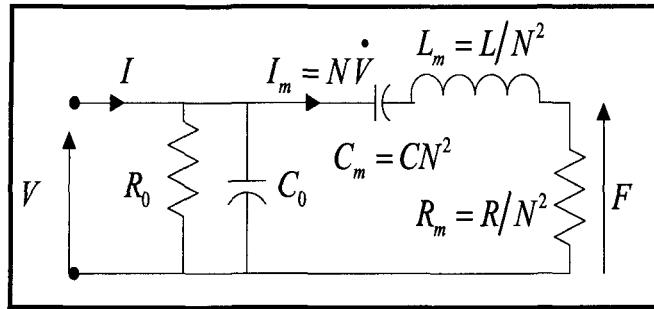


Figure III-6: Schéma équivalent électrique d'un élément piézo-électrique au voisinage de sa fréquence de résonance [Rizet, 1999]

Les schémas équivalents présentés précédemment traduisent un comportement mécanique et électrique illustré à la figure III-7. Outre le phénomène de résonance mécanique (maximum de module de la vitesse de vibration \dot{V}) à la pulsation ω_s , on observe également une résonance électrique (maximum du module du courant absorbé I) à la pulsation ω_m . Ces résonances coïncident sous certaines conditions de couplage et d'amortissement [Rizet, 1999]. Le minimum du courant I observé à la pulsation ω_m correspond à la résonance parallèle des branches modales : on parle d'antirésonance.

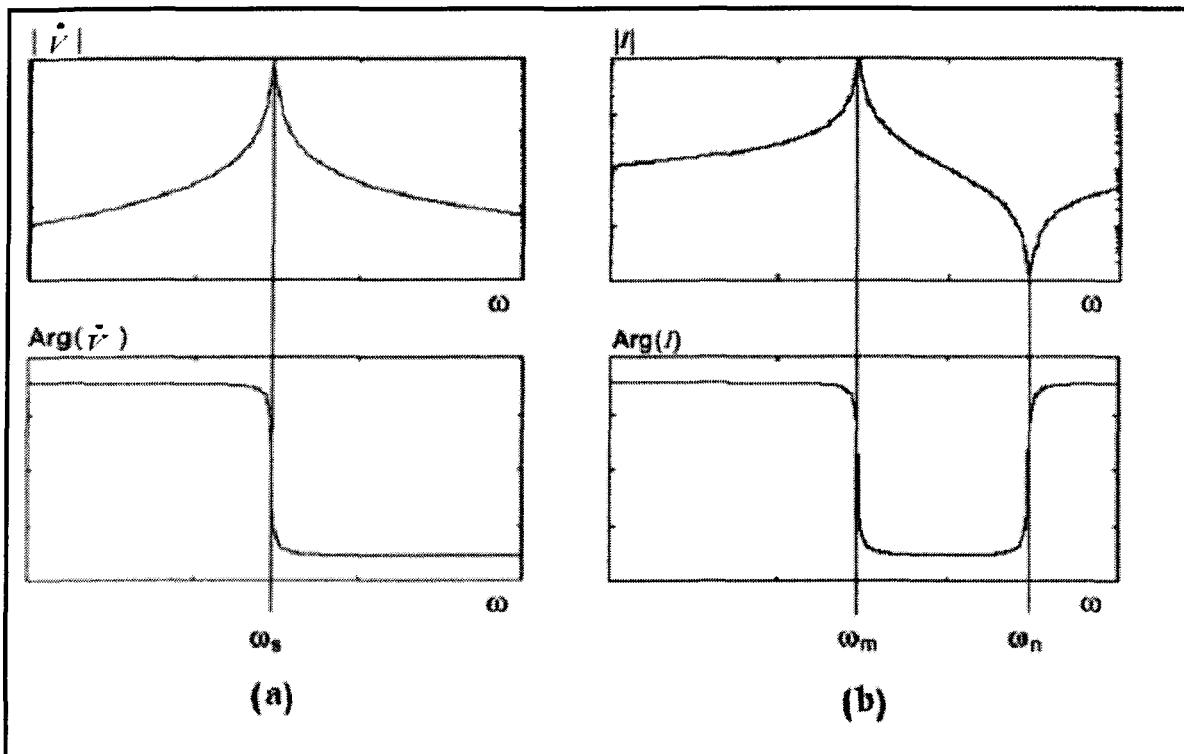


Figure III-7: Comportement en fréquence mécanique (a) et électrique (b) d'un transducteur piézo-électrique autour d'une résonance [Rizet, 1999]

Ces schémas équivalents sont très utilisés pour caractériser l'élément piézo-électrique.

La connaissance des grandeurs électriques tel que les fréquences de résonance, d'antirésonance et de surtension permet en effet de déduire la plupart des caractéristiques électromécaniques de l'élément piézo-électrique. Cette méthode n'est cependant valable qu'aux conditions suivantes :

- L'amortissement doit être faible, avec un coefficient d'amortissement inférieur à 1%.
- Un coefficient de couplage suffisamment élevé est nécessaire, typiquement supérieur à 10 %.

Lorsque ces deux conditions sont réunies, on admet qu'il y a coïncidence des fréquences de résonance électrique et mécanique et que la caractérisation électromécanique devient possible par une approche électrique [Rizet, 1999].

III.4.1 *Représentation électrique d'un élément piézo-électrique*

Un élément piézo-électrique peut être représenté par son schéma électrique équivalent aux alentours de sa fréquence de résonance. Ce modèle, appelé modèle de Van Dyke (voir figure III-8), est généralement recommandé par la norme internationale IEEE [Brown et Carlson, 1989].

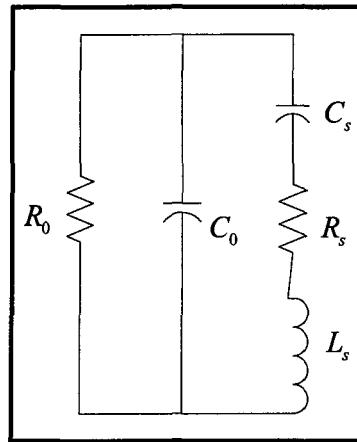


Figure III-8: Schéma électrique équivalent au matériau piézo-électrique [Brown, Carlson, 1989]

Le schéma se compose d'une capacité C_0 en parallèle avec une résistance R_0 [Brown et Carlson, 1989]. R_0 représente les pertes diélectriques. Elles sont souvent représentées à travers le coefficient de pertes diélectriques, $\tan \delta_e$, par les relations suivantes:

$$C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A_0}{t_p} \quad \text{III.3}$$

$$R_0 = \frac{1}{\omega C_0 \tan \delta_e}$$

où ε_r est la permittivité relative de l'élément piézo-électrique, ε_0 est la permittivité de l'espace libre (constante égale à $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$), A_0 est la surface de l'élément piézo-électrique, t_p est son épaisseur.

D'autre part, les éléments du circuit équivalent représentent les propriétés du mouvement ou les réactances mécaniques du système. L_s représente la masse de l'élément piézo-électrique, C_s son élasticité. L_s et C_s représentent donc la fréquence de résonance propre du système. C_s est beaucoup plus petit que C_0 . R_s est la résistance de frottement entre l'élément piézo-électrique et son support. La puissance dissipée par unité de volume du matériau peut être donnée sous la forme suivante :

$$P_d = \omega E^2 \varepsilon_{33}^T \tan \delta_e \quad \text{III.4}$$

où E représente le champ électrique dans le matériau.

Butterworth et Cady proposent un circuit équivalent d'un élément piézo-électrique qui est constitué de deux branches (voir figure III-9) où les composantes électriques sont des

composantes imaginaires qui dépendent des coefficients élastique, diélectrique et piézo-électrique complexes du matériau piézo-électrique [Sherrit *et al.*, 1997], [Sherrit *et al.*].

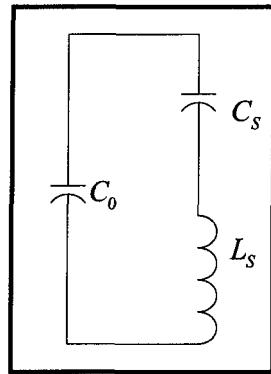


Figure III-9: Le modèle complexe du circuit Butterworth [Sherrit *et al.*, 1997]

III.4.2 Coefficient de couplage

Le rendement des matériaux piézo-électriques est caractérisé par son coefficient de couplage k_t , avec:

$$k_t = \text{Énergie transformée} / \text{Énergie appliquée}$$

Ce paramètre, compris entre 0 et 1, caractérise l'aptitude du matériau à convertir une énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Il doit être le plus élevé possible. Ce coefficient varie suivant la forme de l'échantillon et le mode de vibration utilisé. Les différentes expressions du facteur de couplage sont regroupées dans le tableau III-2.

Mode de vibration	Forme d'échantillon	Coefficient de couplage k_t
Longitudinale		$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^E \epsilon_{33}^T}}$
Transversale		$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{11}^E \epsilon_{33}^T}}$
Épaisseur		$k_t = \frac{e_{33}}{\sqrt{c_{33}^D \epsilon_{33}^S}}$
Planaire		$k_t = k_{31} \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{S_{12}}{S_{11}}}}$

Tableau III-2: Coefficient de couplage des différents modes de polarisation

III.4.3 Facteur de qualité mécanique

Le coefficient de surtension mécanique Q_m , appelé aussi facteur de qualité mécanique, traduit les pertes mécaniques dans le matériau piézo-électrique. Ce facteur est défini comme le rapport de l'énergie emmagasinée pendant une période sur l'énergie dissipée pendant une période. Il est égal aussi au rapport de la fréquence centrale sur la largeur de bande.

$$Q_m = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad \text{III.5}$$

avec

- f_0 est la fréquence de résonance de l'élément piézo-électrique (Hz).

- f_1, f_2 sont les fréquences à -3 dB en-dessous et au-dessus de f_0 (Hz).

Les pages suivantes présentent une brève description des deux fameuses familles piézo-électriques (PZT et PVDF) les plus utilisées à l'heure actuelle

III.5 Piézo-électricité dans les céramiques PZT

III.5.1 Introduction

Le terme général de matériaux céramiques regroupe des domaines très variés. Parmi eux, les céramiques appliquées aux hyperfréquences prennent depuis quelques années une importance économique grandissante due notamment à leur utilisation en films minces qui présentent des propriétés électroniques ou optiques exceptionnelles comparées à celles

offertes par ces mêmes matériaux sous leur forme massive. Le terme céramique signifie plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère. Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres consolidées (mise en forme) et sont densifiées par un traitement thermique (le frittage). La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est-à-dire comportant un grand nombre de monocristaux bien ordonné (grains) reliés par des zones moins ordonnées (joints de grains) comme illustrés à la figure suivante [Aydi, 2005].

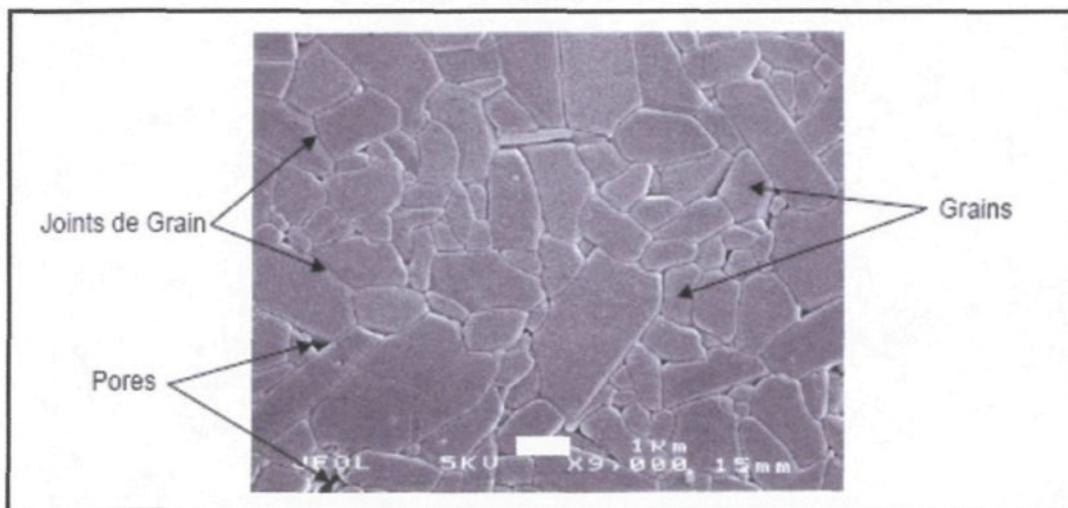


Figure III-10: Microstructure typique d'une surface céramique qui illustre les grains monocristallins, joints de grains et pores [Aydi, 2005]

Les céramiques piézo-électriques sont apparues dans les années quarante. Par leurs coefficients piézo-électriques bien supérieurs à ceux des cristaux, elles ont permis un élargissement des applications du phénomène de piézo-électricité. Les céramiques sont incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle. Ils sont souvent

utilisés tels quels, mais entrent également dans la fabrication des composites que nous décrivons plus loin. Ce succès peut sembler paradoxal car, bien que les valeurs de coefficient de couplage k , soient élevées, leur impédance acoustique est bien plus élevée que cela est dû au fait que ces matériaux sont d'un coût relativement faible, qu'ils sont usinables et faciles à transformer et surtout qu'ils offrent un éventail très large de performance. En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière.

Citons, entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, les titanates de zirconate de plomb, d'où leur appellation abrégée PZT, qui sont les plus répandus et qui comptent à eux seules cinq à six compositions différentes.

On distingue ainsi deux familles de céramique : les céramiques dites douces et celles dites dures, selon la propension que présente le matériau à se dépolariser. Le choix du type de céramique s'effectue en fonction de l'application visée:

- On utilise généralement les matériaux doux pour les applications à bas niveau d'excitation, notamment comme détecteurs (hydrophones, sondes échographiques...).

Ils présentent en effet des couplages électromécaniques et des permittivités élevées.

- Les applications de puissance (piézomoteurs, transducteurs pour nettoyage par ultrasons...) nécessitent l'utilisation de céramiques dures pour leurs faibles pertes mécaniques et diélectriques.

III.5.2 Caractéristiques physiques d'une céramique PZT

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézo-électriques. Le PZT est apprécié pour ses meilleures propriétés piézo-électriques par rapport aux autres composites. Il constitue la majorité des matériaux utilisés pour l'élaboration des céramiques massives mais aussi des couches épaisses piézo-électriques.

	Quartz	LiNbO ₃	BaTiO ₃	PZT	PVF ₂
Densité (g.cm ⁻³)	2,5	4,4	5,7	7,5	1,76
Constante diélectrique	4,5	29	1200	200-4000	12
Constantes piézo-électriques					
d_{33} (C.N ⁻¹).10 ⁻¹²	2	6	180	40-750	20
g_{33} (V.m.N ⁻¹).10 ⁻³	50	20	17	15-40	190
Température de Curie	573	1210	130	<350	180
Coefficient de couplage k_t (%)	10	10	40	40-70	14

Tableau III-3: Principales propriétés des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézo-électriques

III.5.3 Les avantages et les inconvénients des céramiques PZT

Les avantages des céramiques PZT peuvent être regroupés comme suit:

- Les céramiques PZT sont caractérisées par le coût abordable et peuvent être obtenues sous différentes formes.
- Leur température de Curie, d'environ 320° C, permet de les utiliser à des températures très supérieures à celles du titanate de baryum.
- Les céramiques PZT possèdent un coefficient de couplage électromécanique k_t très élevé par rapport à d'autres matériaux piézo-électriques. Cela nécessite une application d'une énergie électrique moyenne pour obtenir une énergie mécanique.
- Leurs pertes électriques sont faibles, elle ne s'échauffent donc presque pas et leur rendement acoustique est très bon (Voir tableau III-4).
- Les PZT peuvent supporter des déformations beaucoup plus grandes que la plupart des autres céramiques, c'est pourquoi on peut obtenir la même puissance, avec un cristal de plus faible volume.

À cause des tous ces avantages, le PZT (titanate de zirconate de plomb) est très utilisé dans les équipements ultrasonores du commerce. De plus, il peut être façonné à volonté, que ce soit sous forme de disques, de tubes ou de blocs.

Le principal désavantage d'une céramique PZT réside dans son impédance acoustique très élevée par rapport à d'autres matériaux piézo-électriques. Elles sont donc plus difficiles à coupler aux autres matériaux.

III.6 Piézo-électricité dans le matériau PVDF

III.6.1 *Introduction*

Le polyfluorure vinylidène (PVDF ou PVF₂) est un polymère résistant et chimiquement inerte, doté d'une faible constante diélectrique. La découverte de la piézo-électricité dans le PVDF par Kawai, en 1969, a redonné un nouvel élan aux chercheurs sur ce matériau. Ses caractéristiques inhérentes (malléabilité, faible impédance acoustique, performance acoustique dans une large bande et disponibilité en feuilles de grandes dimensions) favorisent l'utilisation du PVDF dans diverses applications de transducteurs (hydrophones, microphones, capteurs d'ondes de choc, interrupteurs, capteurs de pression, sondes ultrasonores pour échographie, capteurs pour contrôles non-destructifs...).

Le PVDF doit être étiré et polarisé pour être piézo-électrique. Cette caractéristique limite la fabrication de transducteurs à base de PVDF, qui sont disponibles seulement en films très minces. Plus récemment (1978) sont apparus les copolymères de fluorure de vinylidène et de trifluoroéthylène, notés P(VF₂-VF₃) ou P(VDF-TrFE) [Ohigashi, 1988] et [Yagi et Tatemoto, 1978]. Ces copolymères ont suscité l'intérêt de la communauté scientifique non seulement par la présence d'une transition de Curie (température au-dessus de laquelle le matériau perd ses propriétés piézo-électriques) qui confirme la ferroélectricité de ces matériaux, mais aussi pour leur principale différence avec le PVDF : ils cristallisent directement, à partir de l'état fondu et dans une large gamme de composition, dans une phase polaire (phase bêta) analogue à la phase ferroélectrique du PVDF.

Le PVDF (ou PVF_2) fut synthétisé pour la première fois en 1901 par Swarts. Il est constitué principalement de chaînes linéaires de formule $(\text{CH}_2\text{-CF}_2)_n$, obtenues par polymérisation radicalaire du monomère $\text{CH}_2=\text{CF}_2$, le difluoroéthylène (ou fluorure de vinylidène). Lorsque le processus de polarisation ou «poling» est réalisé correctement, une orientation permanente des dipôles est obtenue comme le montre le principe de la figure III-11.

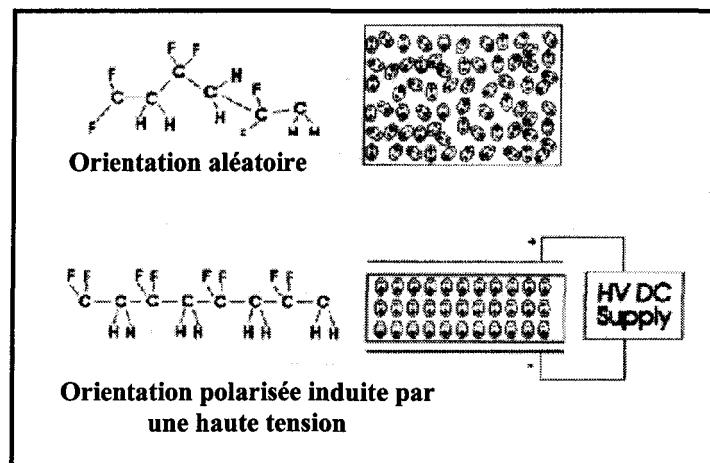


Figure III-11: Polarisation d'un film PVDF

Le PVDF étant un polymère semi-cristallin, il présente une phase cristalline et une phase amorphe.

- La phase amorphe est constituée de chaînes moléculaires désordonnées, qui représentent environ la moitié du volume du matériau et déterminent l'essentiel de ses propriétés mécaniques [Durin et Carr, 1989] et [Lovinger *et al.*, 1987].

➤ La phase cristalline peut présenter quatre structures distinctes dont trois polaires (β, γ, δ) et une non polaire α . La phase cristalline est constituée de chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes pour former une région ordonnée plus compacte, qui se présente sous forme de lamelles dans un arrangement radial. Ces lamelles sont liées entre elles par des portions de chaînes désordonnées (zone amorphe). L'ensemble se présente sous forme de sphérolites (diamètre de l'ordre du μm), dont le centre (appelé centre de nucléation) est le point de convergence de l'arrangement radial des lamelles (voir figure III-12).

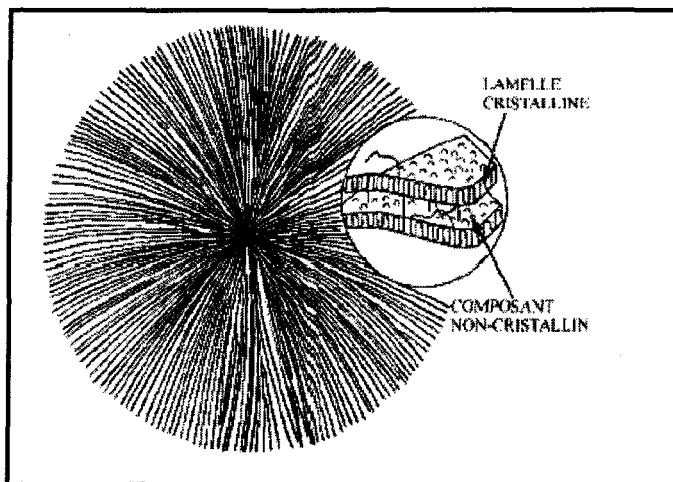


Figure III-12: Diagramme schématique d'un sphéroïde montrant la disposition radiale de ses lamelles cristallines et localisation des composants non cristallins [Lovinger *et al.*, 1987], [Durin et Carr, 1989]

Les polymères sont généralement traités mécaniquement (étirement uniaxial ou biaxial) pour améliorer leurs propriétés physiques. Les sphéroïdes se déforment et prennent une forme ellipsoïdale pour de faibles élongations. Lorsque l'étirement est important, la morphologie devient fibrillaire, comme le montre la figure III-13 dans le cas du PVDF

mono-étiré, et les chaînes moléculaires se recristallisent en s'orientant dans la direction de l'étirement. Notons qu'à la pression atmosphérique, le PVDF peut se cristalliser à partir du polymère fondu (ou en solution). Le taux de cristallinité obtenu est proche de 50 %, et la masse volumique moyenne est voisine de $1,8 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

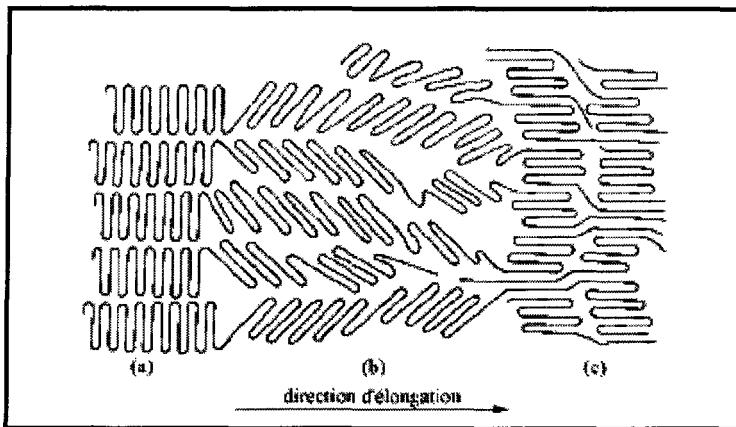


Figure III-13: Représentation schématique de la déformation et réorientation des cristaux du polymère soumis à un étirement uniaxial. (a) Cristaux non étirés; (b) Etirement et réorientation; (c) Fibres réorientées [Lovinger *et al.*, 1987], [Durin et Carr, 1989]

Le polymère du PVDF le plus couramment obtenu est la phase α . À partir de la structure cristalline α centrosymétrique, qui ne présente pas de propriétés piézo-électriques, on peut obtenir une structure cristalline non centrosymétrique (β) par étirement uniaxial ou biaxial ou par compression sous haute pression hydrostatique [Durin et Carr, 1989] et [Lovinger et Davis, 1987]. Nous ne donnerons pas ici le diagramme de transitions des différentes phases cristallines, mais c'est la phase β qui nous intéresse, car elle présente la plus grande activité piézo-électrique. D'autre part, le film PVDF peut être obtenu directement par cristallisation à partir de l'état fondu en phase β , sous une pression

d'environ 3500 bars et une température de 300°C [Matsushige et Takemura, 1978]. La mise en œuvre de ce procédé est très lourde et la haute pression peut entraîner une dégradation importante des caractéristiques du polymère.

Quelle que soit la phase polaire obtenue, le moment dipolaire de chacun des cristaux est orienté de façon aléatoire dans le matériau, de sorte que la polarisation macroscopique est nulle [Ohigashi, 1988]. Ainsi, pour obtenir une bonne activité piézo-électrique, le PVDF orienté (en phase β) doit être polarisé électriquement: il s'agit d'orienter la polarisation ferroélectrique des cristaux suivant un champ électrique appliqué perpendiculairement au plan du film. Deux procédés courants sont utilisés. L'un consiste à appliquer à haute température (typiquement 80 à 130 °C), et pendant 15 à 120 minutes, un champ électrique proche (mais inférieur) au champ coercitif maximal, de l'ordre de 30 à 120 V. μm^{-1} entre les électrodes métalliques déposées sur les faces du film polymère (voir figure III-14). La deuxième technique est la polarisation par décharge couronne, dont les avantages sont la rapidité du processus (de l'ordre d'une dizaine de secondes) et un effet piézo-électrique plus stable en température. Une troisième technique de polarisation du PVDF existe également, c'est la polarisation par "cycle d'hystéresis", procédé original développé à l'ISL (Institut franco-allemand de recherche de Saint -Louis [Bauer, 1982]). Il consiste à appliquer à l'échantillon un signal sinusoïdal haute tension à très basse fréquence, 1 Hz typiquement, et dont l'amplitude est supérieure au champ coercitif [Bauer, 1982]. Il est à noter que les propriétés piézo-électriques dépendent fortement de la polarisation rémanente du matériau [Davis, 1988], [Furukawa et Wang] et [Chen et Payne, 1994].

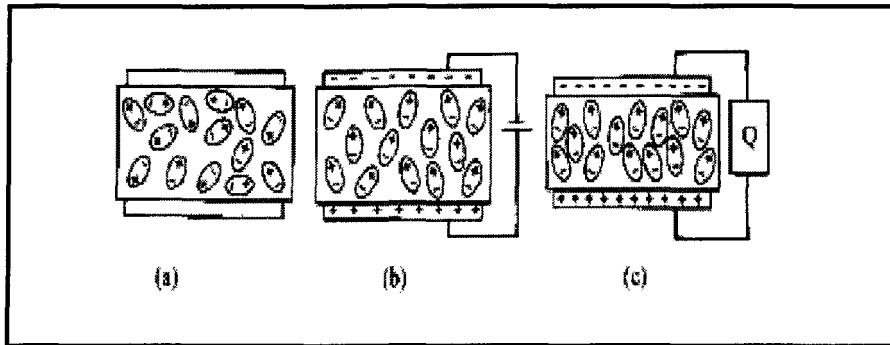


Figure III-14: Représentation schématique d'un film piézo-électrique avec électrodes conductrices sur les surfaces opposées. (a) Les dipôles moléculaires orientés aléatoirement avant l'application du champ électrique polarisant. (b) Les dipôles moléculaires orientés pendant l'application du champ électrique polarisant. (c) La compression du film entraîne l'apparition de charges sur les faces du matériau [Noury, 2002]

III.6.2 Origine de la piézo-électricité dans le PVDF

Les origines physiques des propriétés piézo-électriques (et pyroélectriques) de ce matériau sont restées longtemps controversées. De nombreux modèles ont été avancés afin d'expliquer ces propriétés [Wada et Hayakawa, 1976] et [Wada et Hayakawa, 1981]. Le modèle couramment admis est celui de cristallites ferroélectriques noyées dans une matrice amorphe. Il apparaît que l'activité piézo-électrique (et pyroélectrique) de ces matériaux provient à la fois:

- Des variations de leurs dimensions géométriques (effet de Poisson) dues à la contrainte ou à la température;
- Des variations de la polarisation des cristallites dues à la contrainte ou à la température (effets intrinsèques);
- Des variations de permittivité (effets d'électrostriction) dues à la déformation.

III.6.3 Caractéristiques physiques du PVDF

Le tableau suivant présente les propriétés électromécaniques du PVDF et ses copolymères P(VF2-VF3), comparées à celles d'une céramique PZT. Les valeurs présentées dans ce tableau sont obtenues pour des fréquences allant de 10 Hz à 50 MHz à température ambiante. Les propriétés électriques, mécaniques et piézo-électriques des polymères piézo-électriques dépendent fortement des conditions de fabrication [Ohigashi et Itoh, 1988], [Leug et Yung, 1979] et [Coursant *et al.*, 1986].

Les PVDF sont des matériaux souples à faible densité, à faible vitesse du son et présentent un amortissement mécanique relativement important à haute fréquence. Ces matériaux sont bien adaptés pour l'émission comme pour la réception d'ondes acoustiques dans les milieux sous-marins, vivants ou encore à travers d'autres polymères.

Propriétés	PVDF	P (VF2-VF3)	PZT-4
Masse volumique ρ (kg.m ⁻³).10 ³	1,78	1,88	7,5
Vitesse du son en épaisseur c (m.s ⁻¹)	2200	2400	4630
Impédance acoustique Z (kg.m ⁻² .s ⁻¹).10 ⁶	3,9	4,51	34,4
Constante élastique C_{33}^D (N.m ⁻²).10 ⁹	9,1	11,3	159
Constantes piézo-électriques			
e_{33} (C.m ⁻²)	-0,14	-0,22	15,1
d_{33} (C.N ⁻¹).10 ⁻¹²	-30	-32	140
h_{33} (V.m ⁻¹).10 ⁹	-2,6	-4,7	2,7
Facteur de couplage électromécanique k_t	0,2	0,3	0,51
Permittivité relative ϵ_r	6,2	5,3	635
Tangente des pertes diélectriques $\tan \delta_e$	0,25	0,14	0,02
Tangente des pertes mécaniques $\tan \delta_m$	0,10	0,04	0,004
Champ coercitif (V.μm ⁻¹)	45	36	0,7

Tableau III-4: Principales propriétés du PVDF, de son copolymère P(VF2-VF3), comparées à celles de la céramique PZT-4 [Rizet, 1999]

Du tableau III-4, nous pouvons déduire que:

- Le facteur de couplage électromécanique k_t est de 0,2 à 0,3, une valeur bien plus faible que celle des céramiques (PZT).
- Les champs électriques maximaux applicables aux polymères PVDF sont supérieurs à ceux que supportent les céramiques, du fait que les champs coercitifs sont plus élevés dans ces polymères [Micheron, 1979]. Cela implique donc qu'on peut appliquer une énergie électrique supérieure sur le PVDF et ainsi obtenir une énergie mécanique du même ordre de grandeur que celle d'une céramique PZT.
- La constante diélectrique des polymères PVDF est plus faible que celle des céramiques, et le coefficient de pertes diélectriques est plus élevé. Les coefficients

piézo-électriques de charge des céramiques sont plus élevés que ceux des polymères à base de PVDF. Les coefficients de tension sont plus élevés que ceux des céramiques.

- Les caractéristiques de ces polymères ($C_{33}, \varepsilon_{33}, tg\delta_m, tg\delta_e$) sont dépendantes de la température et de la fréquence.

III.6.4 Les avantages et les inconvénients des PVDF

Les avantages des films piézo-électriques PVDF peuvent être regroupés comme suit:

- Les films PVDF sont caractérisés par leur bonne flexibilité, leur légèreté et leur coût abordable. Ils peuvent être installés sur des configurations complexes et sont disponibles dans une grande variété d'épaisseurs, variant généralement de 9 μm jusqu'à 110 μm .
- Le principal intérêt des films PVDF réside dans le fait qu'ils peuvent être utilisés dans une large gamme de fréquence s'étendant de 0,001 Hz à 10^9 Hz. En outre, ils présentent une très faible absorption d'humidité (inférieure à 0,02 %), ainsi qu'une très bonne résistance aux agressions extérieures (agents chimiques, rayons ultraviolets). Ils sont flexibles et peuvent être adaptés facilement à des formes courbes.
- La majorité des matériaux piézo-électriques non polymères présentent une grande impédance acoustique et ne peuvent être couplés à d'autres milieux tel que la glace, l'eau ou d'autres matériaux. Les PVDF ont l'avantage d'avoir une impédance acoustique proche de celle de l'eau ou de la glace.

Le principal désavantage des films PVDF réside dans leur faible coefficient de couplage électromécanique k_t , nettement inférieur à d'autres matériaux piézo-électriques tel que les céramiques PZT. Afin de compenser cette faible valeur du coefficient de couplage électromécanique, il est nécessaire d'appliquer au film PVDF une forte tension électrique à leurs bornes.

En résumé, retenons que le PVDF doit être orienté mécaniquement, polarisé électriquement et stabilisé thermiquement, pour bénéficier des caractéristiques piézo-électriques.

Signalons que le PVDF peut être utilisé dans divers domaines comme capteurs ou transducteurs. Il s'avère bien adapté chaque fois qu'au moins une de ses propriétés intrinsèques est exploitée: grande surface, faible épaisseur, faible impédance acoustique, sensibilité élevée en tension.

CHAPITRE IV

LES TRANSDUCTEURS ULTRASONIQUES PIÉZO-ÉLECTRIQUES

La production d'énergie dans la plupart des applications industrielles repose sur l'utilisation de transducteurs électriques. Transducteur est le terme généralement employé pour désigner un système qui transforme une forme d'énergie en une autre forme d'énergie. Les systèmes relatifs à la transformation d'énergie électrique en énergie acoustique sont appelés électro-acoustiques. La technologie des transducteurs est généralement basée sur des générateurs mécaniques, magnétostrictifs ou piézo-électriques [Brown et Goodmen, 1971]. Dans le cadre de ce projet de recherche, nous utilisons les propriétés des matériaux piézo-électriques pour convertir l'énergie électrique en une énergie mécanique ultrasonore. Pour générer cette onde ultrasonore, le principe consiste à alimenter le transducteur ultrasonique avec une tension électrique dont la fréquence est égale à sa fréquence de résonance mécanique. Les transducteurs piézo-électriques utilisés sont, en fait, les seuls susceptibles de permettre l'émission et la réception des fréquences élevées (de l'ordre de mégahertz). Cependant, avant de décrire le principe de fonction des transducteurs utilisés, une brève description de la théorie des ultrasons est présentée.

IV.1 Théorie des ultrasons

IV.1.1 *Définition des ultrasons*

On appelle ultrasons les ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre 16 kHz et quelques centaines de mégahertz [Brown et Goodmen, 1971], [Dognon, 1953], [Syrota, 1994] et [Banks *et al.*, 1966]. Les ultrasons possèdent les propriétés générales des ondes élastiques. L'une des toutes premières applications des ultrasons fut, en 1912, la détection des icebergs puis, lors de la première guerre mondiale, le développement rapide de la détection des sous-marins et du sondage maritime. Le chercheur russe Sokolov semble avoir été le premier à suggérer l'emploi des vibrations ultrasoniques pour la détection des défauts dans les matériaux [Banks *et al.*, 1966].

De nombreux systèmes sont susceptibles de produire des ultrasons. Un appareil produisant des ultrasons s'appelle un transducteur ou convertisseur d'ultrasons. Ce dernier développe un déplacement maximal à certaines fréquences particulières qui dépendent de la géométrie du transducteur. On appelle ces fréquences les fréquences de résonance. L'utilisation de ces transducteurs est généralement limitée à des fréquences particulières. Les avantages principaux dans l'utilisation des transducteurs ultrasoniques sont les suivants :

- Une mesure directe sans passer par des algorithmes de calcul,
- Une réponse rapide usuellement en fraction de seconde,
- Une très bonne résolution.

Les ondes ultrasonores peuvent se propager dans les gaz, les liquides ou les solides, c'est-à-dire dans toute substance possédant des propriétés élastiques. Lorsqu'elles se propagent dans un milieu infini, elles peuvent le faire soit avec une symétrie sphérique dans toutes les directions (source isotopique), soit sous forme de faisceaux parallèles d'ondes planes. Ceci dépend de la nature et de la géométrie de la source de vibration. De manière idéale, si le rayon de la source est petit vis-à-vis de la longueur d'onde de l'onde émise, celle-ci est alors sphérique. Cependant, si le rayon de la source est plus grand que la longueur d'onde émise, cette dernière est alors une onde plane (voir figure IV-1).

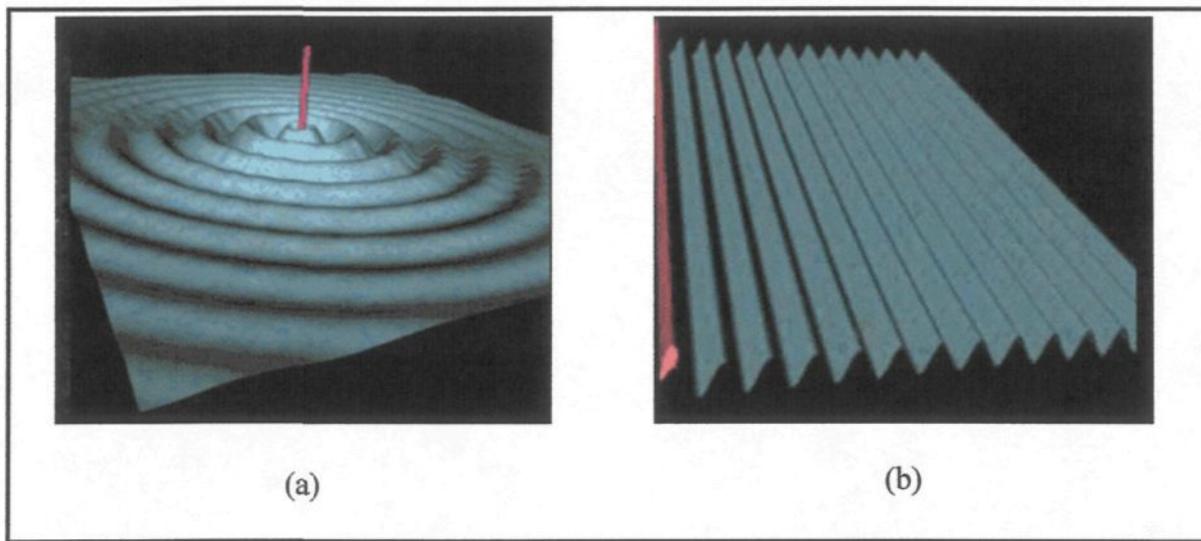


Figure IV-1: Propagation d'onde ultrasonore. (a) Onde sphérique, (b) Onde plane

IV.1.2 Paramètres de l'onde ultrasonore

Cette section présente les différents paramètres nécessaires à la caractérisation de l'onde ultrasonore.

IV.1.2.1 *L'impédance acoustique*

Le comportement du milieu vis-à-vis des ultrasons est exprimé par une constante appelée **impédance acoustique** Z . Elle est définie comme le produit de la densité et de la vitesse du son du milieu et donnée par la relation suivante [Brown et Goodmen, 1971], [Dognon, 1953], [Syrota, 1994], [Banks *et al.*, 1966]:

$$Z = \rho c \quad \text{IV.1}$$

où:

- c est la vitesse du son dans le milieu en m.s^{-1} ;
- ρ est la densité du milieu en kg.m^{-3} .

IV.1.2.2 *La longueur de l'onde*

La longueur de l'onde ultrasonore dans un milieu est reliée à une fréquence donnée, elle est donnée par la relation suivante [Brown et Goodmen, 1971], [Dognon, 1953], [Syrota, 1994] et [Banks *et al.*, 1966]:

$$c = f\lambda \quad \text{IV.2}$$

où:

- c est la vitesse du son dans le milieu en m.s^{-1} ;
- f est la fréquence d'émission en Hz.

IV.1.2.3 *La pression et l'intensité*

La pression acoustique varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée dans le milieu dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires.

On appelle intensité ultrasonore l'énergie qui traverse perpendiculairement une unité de surface pendant une unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la formule suivante [Brown et Goodmen, 1971] et [Dognon, 1953]:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} \quad \text{IV.3}$$

où:

- c est la vitesse du son dans le milieu en m.s^{-1} ;
- ρ est la densité du milieu en kg.m^{-3} ;
- P est appelée la pression d'onde acoustique exprimée en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$ ou $10^5.\text{dynes.m}^{-2}$;
- I est l'intensité ultrasonore en W.m^{-2} .

IV.1.2.4 *L'équation de l'onde ultrasonore*

L'équation de l'onde ultrasonore plane dans un milieu peut se mettre sous la forme suivante [Brown et Goodman, 1971], [Ristic, 1983] :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \frac{\rho}{E_Y} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad \text{IV.4}$$

où:

- P est la pression acoustique en $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$;
- ρ la densité du milieu en kg.m^{-3} ;
- E_y le module de Young en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

IV.1.3 Propagation des ultrasons dans un milieu solide

La propagation d'ultrasons dans les milieux solides, dépendamment de la puissance du transducteur, peut produire un échauffement ou une vibration. Dans les solides cependant, non seulement les forces de compression sont transmises, mais aussi les forces de cisaillement. C'est pourquoi, en plus des ondes longitudinales, des ondes transversales et des ondes de torsion peuvent se propager. La nature des ondes existantes dans un milieu dépend beaucoup de la forme et des dimensions de ce milieu.

Si on s'intéresse à un solide de dimension finie, les ondes longitudinales ou de compressions sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde, tel qu'illustrée à la figure IV-2. La vitesse des ondes longitudinales est donnée par la formule suivante [Brown et Goodman, 1971], [Dognon, 1953]:

$$v_L = \sqrt{\frac{E_y}{\rho}} \quad \text{IV.5}$$

où E_y est le module de Young en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ et ρ la densité du milieu en kg.m^{-3} .

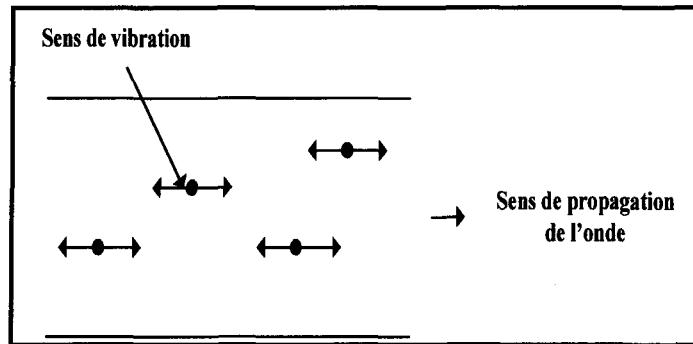


Figure IV-2: Propagation des ondes longitudinales dans un solide

Par opposition, on peut distinguer les ondes transversales ou de cisaillement, lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, comme illustré à la figure IV-3. La vitesse des ondes transversales est donnée par [Brown et Goodman, 1971] et [Dognon, 1953]:

$$v_t = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \quad \text{IV.6}$$

où:

- μ_s est le module d'élasticité transverse.

Puisque $E_y = 2\mu_s(1+\nu)$, avec ν est le coefficient de Poisson, l'équation IV.6 peut s'écrire comme suit [Brown et Goodman, 1971] :

$$v_t = \sqrt{\frac{E_y}{2\rho(1+\nu)}}$$

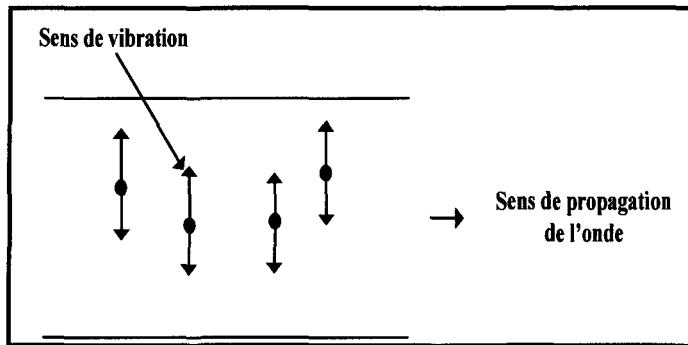


Figure IV-3: Propagation des ondes transversales dans un solide

Enfin, en plus des ondes longitudinales et transversales, des ondes de surface (ou de Rayleigh) peuvent se propager sous certaines conditions, le long de la surface d'un solide sans pénétrer dans le volume. De telles ondes sont une combinaison de déplacements longitudinaux et transversaux. La vitesse est donnée par l'expression ci-dessous [Brown et Goodman, 1971]:

$$v_s = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \quad \text{IV.7}$$

IV.1.4 Propagation des ultrasons dans un milieu liquide

La propagation des ultrasons dans les liquides se limite à celle d'ondes longitudinales puisque ces milieux ne peuvent résister aux contraintes tangentielles. La vitesse avec laquelle les ultrasons se propagent dans le milieu dépend de l'élasticité et de la densité du milieu. Elle est donnée par l'équation suivante [Brown et Goodman, 1971] et [Dognon, 1953]:

$$V = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad \text{IV.8}$$

où:

- k est le constant élastique approprié en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;
- ρ la densité du milieu en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Lorsque les ondes sonores se propagent dans un liquide, on observe une perte d'énergie due au mouvement relatif des particules qui constituent le milieu. Elle est due aux forces de viscosité qui tendent à dégrader l'énergie acoustique en chaleur [Brown et Goodman, 1971]. La viscosité dans ce cas, est équivalente à la rigidité pour un matériau. Ainsi, plus la viscosité est élevée plus la température du milieu augmente.

IV.1.5 *Émission et réception de l'onde ultrasonore*

L'intensité d'une onde acoustique qui se propage dans les différents milieux s'atténue le long de son parcours. Plusieurs facteurs contribuent à cette atténuation tel que l'absorption, la réfraction, la réflexion et la diffusion. L'émission d'impulsions ultrasoniques dans un solide produit deux effets: un effet thermique qui dépend de la puissance acoustique de l'onde et qui engendre une propagation de la chaleur dans le milieu et un effet mécanique qui est la transmission, la réflexion et la dispersion.

IV.1.5.1 *Description du faisceau ultrasonore émis*

La théorie de la diffraction montre qu'un faisceau ultrasonore émis par une source plane, circulaire de rayon r répondant à la condition $r > \lambda$, (r est le rayon de la source, λ est la longueur d'onde) comprend deux parties, une zone initiale cylindrique et une zone

distale conique où le faisceau diverge [Brown et Goodmen, 1971], [Dognon, 1953], [Syrota, 1994] et [Banks *et al.*, 1966], que l'on nomme respectivement la zone de Fresnel et la zone de Fraunhofer.

a) *Zone initiale: zone de Fresnel*

C'est le champ initial ou zone de Fresnel qui est définie comme une source circulaire. Toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique dont le diamètre est égal à celui de la source sonore. On caractérise le faisceau sonore par la relation suivante [Syrota, 1994] [Banks *et al.*, 1966] (voir figure IV-4).

$$\begin{aligned} d &= D_s \\ l &= \frac{D_s^2}{4\lambda} \quad \text{Valable lorsque } D_s > \lambda \end{aligned} \quad \text{IV.9}$$

où:

- d est le diamètre de la zone en m;
- l est la longueur de la zone en m;
- D_s est le diamètre de la source en m;
- λ est la longueur de l'onde ultrasonore en m.

L'intensité sur l'axe de propagation dans ce cas passe par une succession de maxima et de minima dont les abscisses sont données par [Banks *et al.*, 1966], [Ristic, 1983] et [Chen et Payne, 1994]:

$$x_{(\max)} = \frac{r^2}{(2k+1)\lambda} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$x_{(\min)} = \frac{r^2}{2k\lambda} \quad k = 1, 2, \dots$$

Pour $k = 0$, on obtient la position du dernier maximum $x_{(M)} = r^2/\lambda$ qui représente la limite entre le champ initial et la zone distale, tel qu'illustrée à la figure IV-5.

b) *Zone distale: zone de Fraunhofer*

Nommée champ lointain, elle correspond à la partie du faisceau située à une distance de la zone supérieure de r^2/λ , (où r est le rayon de la source et λ est la longueur d'onde). Dans cette zone, le faisceau est plus homogène que dans la zone de Fresnel, mais il se met à diverger d'un angle θ (voir la figure IV-4) par rapport à l'axe central. L'angle de divergence est proportionnel à la fréquence et au diamètre de la source et est exprimé par la relation suivante [Banks *et al.*, 1966]:

$$\sin \theta = \frac{1,22c}{df} \quad \text{Valable pour } r > \lambda \quad \text{IV.10}$$

où:

- θ est l'angle de divergence en degrés;
- d est le diamètre de la source en m;
- c est la vitesse du son en m.s^{-1} ;
- f est la fréquence en Hz.

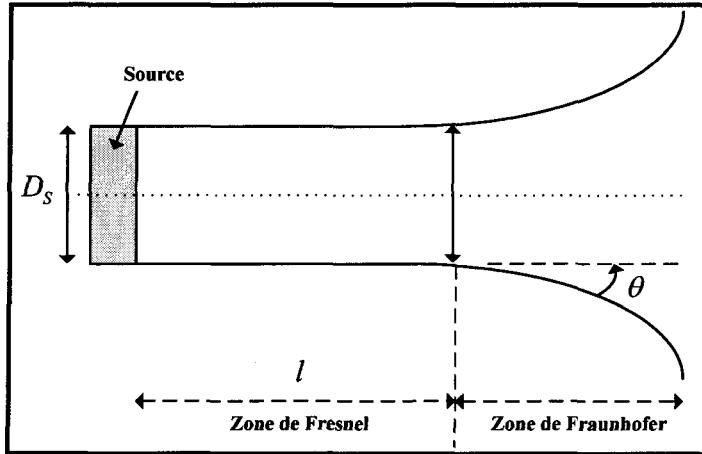


Figure IV-4: Géométrie d'un faisceau d'ondes ultrasonores

Comme le montre la figure IV-4, en s'éloignant de la source ultrasonore, l'intensité de l'onde devient faible car l'énergie se répartit.

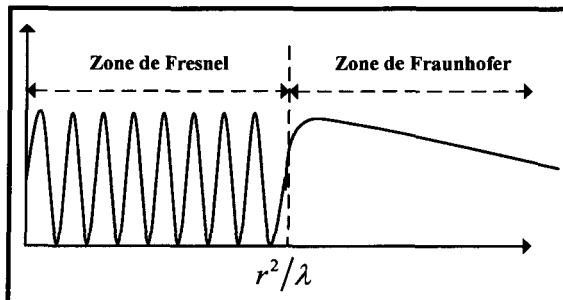


Figure IV-5: Représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un élément piézo-électrique de diamètre D_s

IV.1.5.2 Atténuation d'une onde ultrasonore

L'atténuation d'une onde ultrasonore dépend principalement de la fréquence considérée. Pour la plupart des matériaux, plus la fréquence est haute plus l'atténuation est

importante. La théorie prévoit que l'atténuation est directement proportionnelle au carré de la fréquence pour une onde plane [Ristic, 1983].

Considérons une onde plane se propageant suivant la direction +z, P_a est la pression acoustique spécifiée par la relation suivante [Ristic, 1983]:

$$P_a = P_0 e^{-2\alpha z} \quad \text{IV.11}$$

où α est le coefficient d'atténuation exprimé en dB/m et donné par la relation suivante [Ristic, 1983]:

$$\alpha = \frac{\eta \omega^2}{2v_L^3 \rho} \quad \text{IV.12}$$

avec

- η est le coefficient de viscosité exprimée par en N.s.m⁻² ou Pa.s;
- ρ est la densité du milieu en kg.m⁻³;
- v_L est la vitesse longitudinale dans le milieu en m.s⁻¹.

Dans les liquides, le coefficient d'atténuation α est donné par l'expression suivante [Syrota, 1994]:

$$\alpha = \frac{2\pi^2}{\rho c^3} f^2 \left(\frac{4}{3} \eta + \eta_\nu \right) \quad \text{IV.13}$$

où η' et η_v sont des coefficients de viscosité respectivement de cisaillement et de compression qui dépendent de la température [Ashrake, 1991].

IV.1.5.3 *L'absorption et la dispersion*

L'absorption des ultrasons dans les solides dépend beaucoup de la structure de ces derniers. Dans les milieux homogènes, l'absorption du son est due essentiellement au coefficient de viscosité et à la conductivité thermique. Comme dans les liquides, l'absorption est proportionnelle au carré de la fréquence sonore. Dans le cas des substances polycristallines comme la glace, c'est-à-dire des substances formées d'un grand nombre de petits cristaux séparés (les monocristaux), l'absorption du son est principalement déterminée par les dimensions relatives des cristaux et de la longueur d'onde. À haute fréquence, lorsque la longueur d'onde λ est petite par rapport à la taille des cristaux, l'absorption se fait dans chaque monocristal. Le coefficient d'absorption étant proportionnel au carré de la fréquence dans ce cas, il est égal à [Brown et Goodman, 1971] :

$$\mu = \frac{8\eta\pi^2}{3\rho\lambda^2c} \quad \text{IV.14}$$

où:

- μ est le coefficient d'absorption en m^{-1} ;
- η est le coefficient de viscosité qui varie en fonction de la température en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;

- ρ est la densité du milieu en kg.m^{-3} ;
- c est la vitesse du son dans le milieu en m.s^{-1} ;
- λ est la longueur de l'onde ultrasonore en m.

Si la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que le diamètre des monocristaux, le son est atténué aux interfaces des différents monocristaux et l'absorption est déterminée principalement par le processus de diffusion. Quand la longueur d'onde est supérieure au diamètre des monocristaux, le son est diffusé par les particules de petite dimension devant la longueur d'onde [Brown et Goodman, 1971].

Dans le cas de la glace, on définit τ comme étant le rapport de l'énergie absorbée par rapport à l'énergie incidente émise. Le coefficient d'absorption, calculé expérimentalement, est généralement mesuré par une différence entre la radiation incidente et la radiation transmise à travers une épaisseur définie de glace [Hobbs et Victor, 1974].

$$\tau = 1 - \exp(\mu x)$$

IV.15

où:

- μ est le coefficient d'absorption (m^{-1}).
- x est l'épaisseur de la glace (m).

La dispersion et la diffusion se présentent lorsqu'une onde ultrasonore rencontre un obstacle de dimensions nettement inférieures à la longueur d'onde. L'onde incidente est

très faiblement diffractée et une onde de faible amplitude rayonnant dans toutes les directions est générée. Pour des obstacles sphériques, l'intensité de l'onde ainsi diffusée est inversement proportionnelle à la puissance 4 de la longueur d'onde. On parle alors de diffusion de Rayleigh [Brown et Goodman, 1971].

Ainsi, pour la glace, la dispersion est provoquée par toutes inclusions puisque, par définition, ces inclusions (tel que les bulles d'air) ont une impédance acoustique différente de celle de la glace.

IV.1.5.4 Réflexion et réfraction de l'onde ultrasonore

Lors du passage d'une onde ultrasonore à travers une interface séparant deux milieux de caractéristiques acoustiques différentes, une partie de l'onde incidente est réfléchie et une autre est réfractée. L'énergie contenue dans l'onde réfractée est égale à l'énergie de l'onde incidente diminuée de celle contenue dans l'onde réfléchie. Le mécanisme de réflexion d'une onde ultrasonore est un point important dans l'étude de propagation d'ondes ultrasonores dans un milieu.

Soit une onde acoustique qui frappe, avec un angle d'incidence θ_i par rapport à la verticale, l'interface séparant les milieux 1 et 2, tel qu'illustrée à la figure IV-6. Cette dernière donne naissance à l'interface, à une onde réfléchie et une onde transmise. Les directions de propagation de ces ondes font respectivement des angles θ_r et θ_t avec la normale à l'interface [Brown et Goodman, 1971], [Dognon, 1953], [Syrota, 1994] et [Banks *et al.*, 1966].

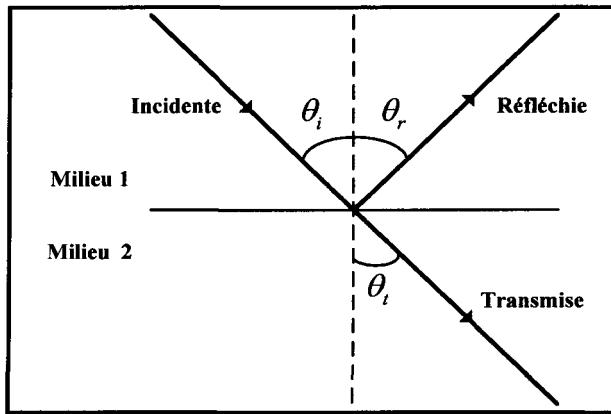


Figure IV-6: Réflexion des ultrasons à une interface

Soit les suffixes i , r et t se rapportant respectivement aux ondes incidentes, réfléchies et transmises. La variation de pression incidente P_i , la pression réfléchie P_r et la pression transmise P_t s'écrivent alors :

$$P_i + P_r = P_t \quad \text{IV.16}$$

Puisque $P = \rho c \frac{db}{dt}$ alors $\rho_1 c_1 \left(\frac{db}{dt} \right)_i - \rho_1 c_1 \left(\frac{db}{dt} \right)_r = \rho_2 c_2 \left(\frac{db}{dt} \right)_t$.

Le signe négatif du second terme indique que la direction de propagation de l'onde réfléchie est inversée. Après simplification, on obtient [Brown et Goodman, 1971] :

$$\left(\frac{db}{dt} \right)_r / \left(\frac{db}{dt} \right)_i = - \frac{\rho_2 c_1 \cos \theta_1 - \rho_1 c_1 \cos \theta_2}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 - \rho_1 c_1 \cos \theta_2}$$

$$\left(\frac{db}{dt} \right)_t / \left(\frac{db}{dt} \right)_i = - \frac{2 \rho_1 c_1 \cos \theta_1}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 + \rho_1 c_1 \cos \theta_2}$$

Sous l'incidence normale on a $\theta_i = \theta_r = 0$

Le coefficient de réflexion R est défini par le rapport de la puissance réfléchie sur la puissance incidente, il est exprimé par la relation suivante :

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \quad \text{IV.17}$$

Le coefficient de transmission T défini par le rapport de la puissance transmise sur la puissance réfléchie, est donné par la relation suivante :

$$T = 1 - R = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad \text{IV.18}$$

où Z_1 et Z_2 sont les impédances acoustiques des milieux 1 et 2 respectivement, exprimées en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ et données par l'équation IV.1.

Dans le cas où une onde ultrasonore arrive à l'interface des milieux solides, sous incidence oblique plutôt que sous incidence normale, la partie transmise de l'onde est alors réfractée. De plus, si la source se trouve dans un milieu solide, une onde incidente longitudinale sera réfléchie et réfractée à la frontière, pour donner naissance, dans chacun des milieux, à une onde longitudinale et à une onde transversale. Une onde incidente longitudinale L_i , telle que représentée à la figure IV-7, sera réfléchie et réfractée à l'interface des milieux 1/2 pour donner naissance dans le milieu 1 à une onde longitudinale L_r et une onde transversale T_r et, dans le milieu 2, à une onde longitudinale L_r et une

onde transversale T_r . Les angles de réflexion et de réfraction sont fonction des vitesses relatives dans les milieux respectifs.

$$\frac{\sin \alpha_1}{\alpha_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\alpha_2} = \frac{\sin \alpha_3}{\alpha_3} = \frac{\sin \alpha_4}{\alpha_4}$$

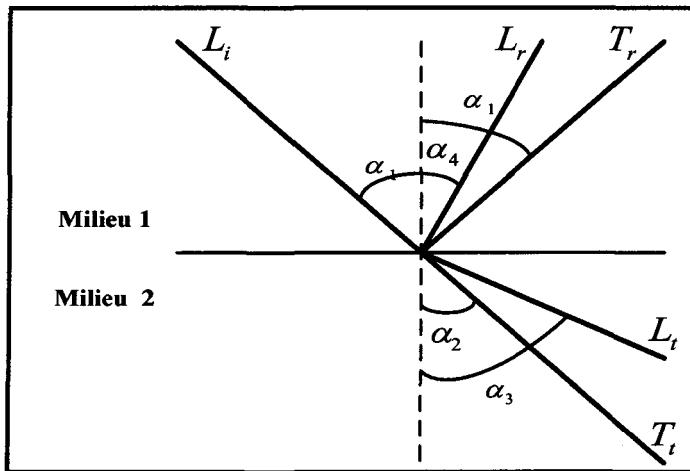


Figure IV-7: Comportement des ondes sonores incidentes à une interface

Les angles de réflexion et de réfraction sont donnés par la loi de Snell lorsque les vitesses sont connues [Banks *et al.*, 1966]. Il peut être remarqué sur la figure IV-7 que α_3 augmente en même temps que α_1 jusqu'à ce qu'il atteigne 90° , angle pour lequel l'onde de compression réfractée est parallèle à la surface. La valeur de α_1 pour $\alpha_3 = 90^\circ$ est appelée le premier angle critique. Lorsque α_1 continue à augmenter, α_2 se rapproche de 90° , angle pour lequel l'onde de cisaillement devient parallèle à la surface. La valeur correspondante α_1 est appelée le second angle critique [Banks *et al.*, 1966]. Au second angle critique, des ondes de surface ou ondes de Rayleigh sont émises.

IV.1.5.5 Calcul du temps de vol d'une impulsion

L'onde ultrasonore émise se propage à une vitesse qui dépend des caractéristiques du milieu. À l'interface de deux milieux, une partie de l'onde est réfléchie et une partie est transmise, tel que présenté au paragraphe précédent. La durée entre l'instant d'émission du signal et l'instant de réception du signal réfléchi (écho) est appelée le temps de vol de l'onde ultrasonore dans le milieu étudié, noté T_v , comme la montre la figure IV-8.

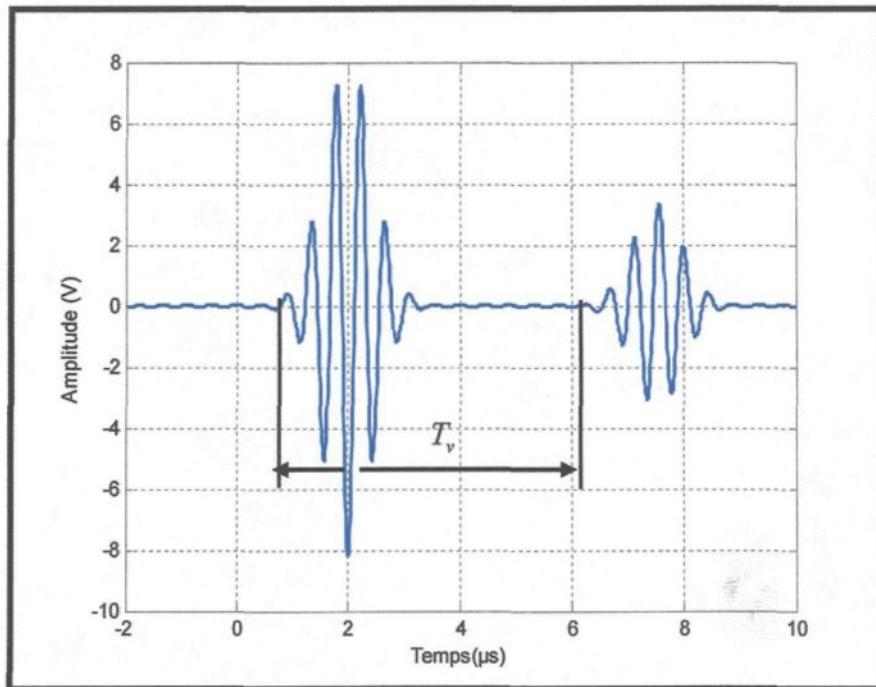


Figure IV-8: Mesure du temps de vol d'une impulsion ultrasonore après une réflexion simple

À partir de la mesure du temps de vol d'impulsion ultrasonore et connaissant le mode de propagation (longitudinal ou transversal) du son ainsi que sa vitesse dans le milieu considéré, il devient alors possible de mesurer l'épaisseur du milieu par le produit de la

vitesse du son dans le milieu et le temps de vol de l'onde ultrasonique. L'épaisseur est alors donnée par la relation suivante :

$$e = (cT_v)/2 \quad \text{IV.19}$$

où:

- e est l'épaisseur de la couche déposée en m;
- c la vitesse du son dans le milieu où l'onde se propage en m.s^{-1} ;
- T_v le temps de vol de l'impulsion ultrasonore en s.

IV.2 Théorie des transducteurs ultrasoniques piézo-électriques

IV.2.1 *Définition*

Lorsque l'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur, on fait appel à ce que l'on nomme classiquement "un transducteur". Ainsi, un transducteur piézo-électrique transforme une énergie électrique en une autre énergie mécanique et réciproquement.

Dans la plupart des applications, un élément piézo-électrique est utilisé sous forme d'un film mince de faible épaisseur. À l'état libre (chargé par l'air), il est représenté par une face électrique et est utilisé comme résonateur à cause de son grand coefficient de surtension Q_m comme le montre la figure IV-9 (a) [Ristic, 1983].

Il est représenté par une face électrique et deux faces acoustiques (voir figure IV-9 (b)), lorsqu'il est utilisé comme un générateur d'ondes acoustiques dans un liquide. Cela s'applique aussi lorsqu'il est collé à la surface d'un solide. Dans toutes les applications, le transducteur est généralement acoustiquement couplé au solide par des liquides couplants ou des gels.

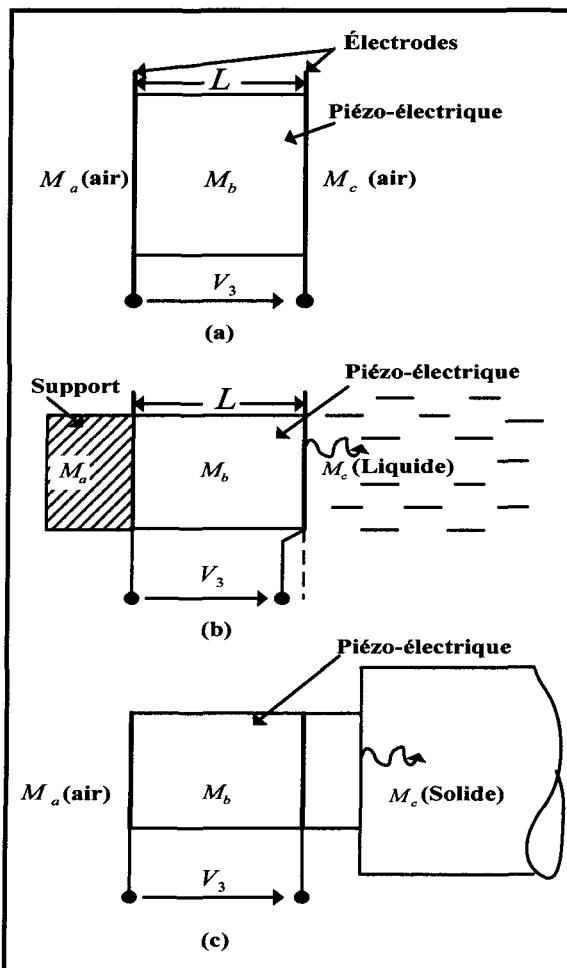


Figure IV-9: (a) Résonateur, (b) Générateur d'onde acoustique dans un liquide, (c) Générateur d'onde acoustique dans un solide [Ristic, 1983]

Dans le cas du résonateur, tel que représenté à la figure IV-9 (a), si ce dernier est à l'état libre (chargé par l'air), où M_c et M_a représentent le milieu d'air, l'impédance électrique d'entrée est une réactance [Ristic, 1983].

Pour le cas de la figure IV-9 (b) et la figure IV-9 (c), un des facteurs les plus importants est le rapport de l'énergie électrique par rapport à l'énergie acoustique rayonnée. Dans ces deux cas, dépendamment des impédances des milieux M_a et M_c , l'élément piézo-électrique M_b agit en tant que résonateur à faible coefficient de surtension Q_m .

Considérons une onde longitudinale qui se propage dans un milieu selon l'axe z avec un champ électrique orienté suivant le même axe tel qu'illustré à la figure IV-10 (a) . L'élément piézo-électrique peut être représenté par son schéma électrique équivalent, tel que présenté à la figure IV-10 (b).

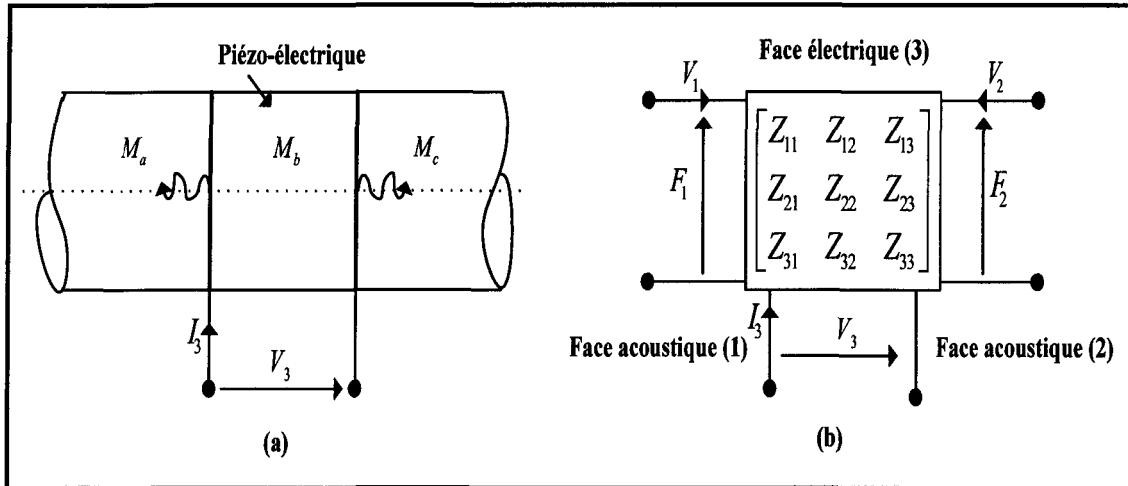


Figure IV-10: (a) Géométrie d'un élément piézo-électrique avec deux faces acoustiques (1), (2) et une face électrique (3). (b) Schéma électrique équivalent d'un élément piézo-électrique [Ristic, 1983]

Le comportement transitoire des transducteurs piézo-électriques ultrasoniques a fait l'objet d'un grand nombre de recherches. Citons à titre d'exemple le modèle Krimbultz (1970) et le modèle Mason (1948) [Ristic, 1983]. La figure IV-11 présente le comportement dynamique électromécanique d'un élément piézo-électrique analysé à l'aide du circuit équivalent de Mason, tout en négligeant les pertes internes. Ce circuit est représenté par deux faces mécaniques et une seule face électrique. Dans ce circuit, V_1 et V_2 sont analogues au courant et F_1 et F_2 sont analogues aux tensions [Ristic, 1983] et [Sato et Koyama, 1987]. De plus, un transformateur idéal électromécanique représente le lien entre le port électrique et les deux ports mécaniques [Ristic, 1983].

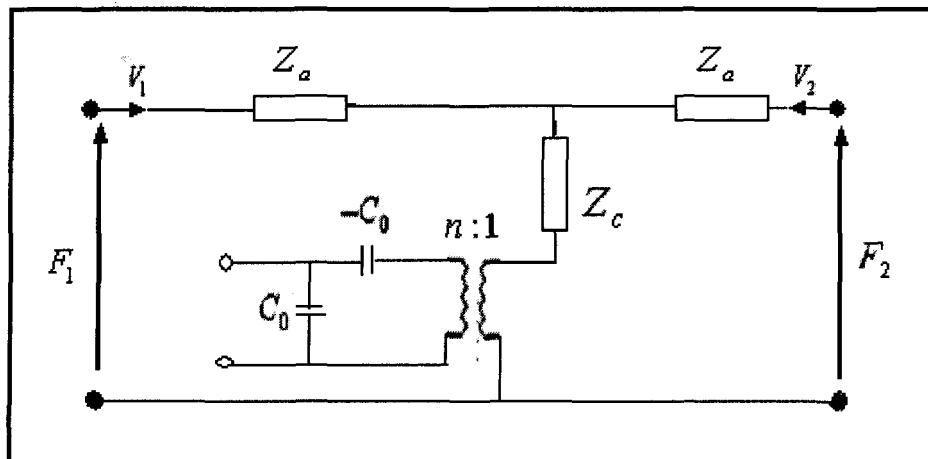


Figure IV-11: Circuit équivalent d'un élément piézo-électrique [Ristic, 1983]

Dans le circuit électrique équivalent de la figure IV-12, Z_a et Z_c sont les composantes électriques qui simulent les effets mécaniques, dont les expressions sont :

$$Z_a = j \bar{Z}_0 \tan\left(\frac{\beta_0 t_p}{2}\right), Z_c = \frac{j \bar{Z}_0}{\sin(\beta_0 t_p)}, \bar{Z}_0 = A_0 Z_0 = A_0 \sqrt{\rho_0 C_{33}^D}, \beta_0 = \frac{\omega}{c} \text{ et } h = \frac{e_{33}}{\sqrt{C_{33}^D \epsilon_s}}$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 \cot \beta_0 t_p & \bar{Z}_0 \csc \beta_0 t_p & \frac{h}{\omega} \\ \bar{Z}_0 \csc \beta_0 t_p & \bar{Z}_0 \cot \beta_0 t_p & \frac{h}{\omega} \\ \frac{h}{\omega} & \frac{h}{\omega} & \frac{1}{\omega C_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad \text{IV.20}$$

avec

- A_0 est la surface de l'élément piézo-électrique en m^2 ;
- ρ_0 est sa densité en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- Z_0 est impédance acoustique égale à $\sqrt{\rho_0 \cdot C_{33}^D}$ en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- c est la vitesse du son dans l'élément piézo-électrique en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;
- t_p est l'épaisseur de l'élément piézo-électrique en m;
- C_{33}^D est le coefficient d'élasticité de l'élément piézo-électrique en $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$.

Il est donc clair que pour un milieu non piézo-électrique, $e_{33}=0$, le transformateur devient donc un court-circuit. Le circuit équivalent d'un milieu non piézo-électrique est représenté à la figure suivante [Ristic, 1983] et [Shuya, 2005].

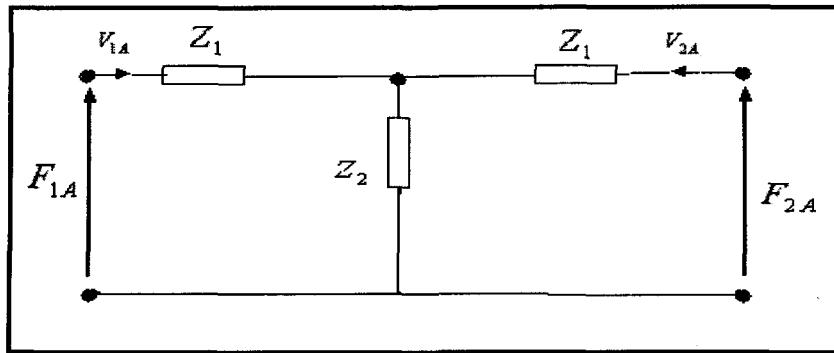


Figure IV-12: Circuit équivalent d'un élément non piézo-électrique [Ristic, 1983]

$$\text{avec } Z_1 = j \bar{Z}_1 \tan\left(\frac{\beta_1 t}{2}\right), Z_2 = \frac{j \bar{Z}_1}{\sin(\beta_1 t)}$$

où:

$$- \bar{Z}_1 = A \rho_1 c_1, \beta_1 = \frac{\omega}{c_1}$$

- ρ_1 est la densité du milieu non piézo-électrique en kg.m^{-3} ;
- c_1 est la vitesse du son dans le milieu non piézo-électrique en m.s^{-1} ;
- t est l'épaisseur du milieu non piézo-électrique en m.

En général, un capteur ultrasonique est constitué de plusieurs couches de matériaux ayant chacune une fonction différente, comme le montre la vue en coupe de la figure IV-13. Les couches I et II sont les couches intermédiaires, appelées aussi lame quart d'onde. Elles permettent un transfert maximal de l'énergie issue de l'élément piézo-électrique au milieu extérieur, leurs épaisseurs sont calculées à partir de l'équation V.1, donnée au chapitre V. Les couches III et V sont les électrodes conductrices servant à appliquer le champ électrique à l'élément piézoélectrique représenté par la couche IV et enfin, la couche VI

représente la couche de matériau amortisseur. Le choix de ce matériau amortisseur est important puisqu'il influence directement la forme des impulsions ultrasonores émises par le transducteur. Pour un matériau très amortissant, la majeure partie de l'énergie qui y pénètre est dissipée, favorisant de la sorte la création d'impulsions courtes. Au contraire, pour un matériau peu amortissant, l'énergie atteignant la face arrière du transducteur est renvoyée vers la face avant et accroît l'énergie transmise dans le milieu accumulé [Persson et Hertz, 1985].

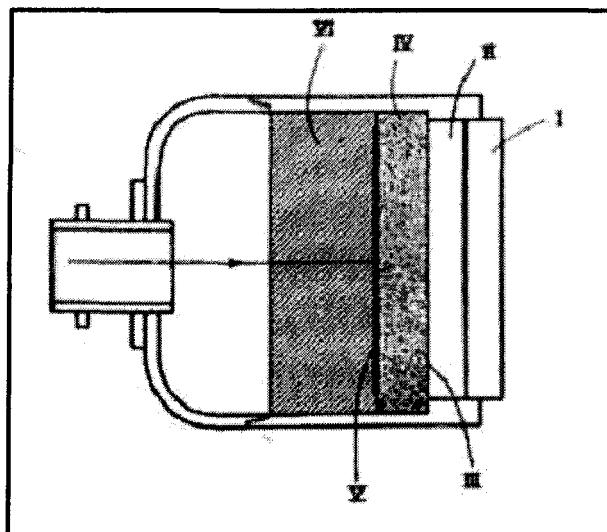


Figure IV-13: Vue en coupe d'un transducteur ultrasonore [Ristic, 1983]

À tout type de transducteur ultrasonique correspond son modèle équivalent de Mason dont un schéma est présenté à la figure IV-14 [Persson et Hertz, 1985], [Ohigashi et Itoh, 1988] et [Kasai et al, 1973].

avec

- Z_B est l'impédance acoustique de la couche amortisseur.

- Z_F est l'impédance acoustique de la charge.

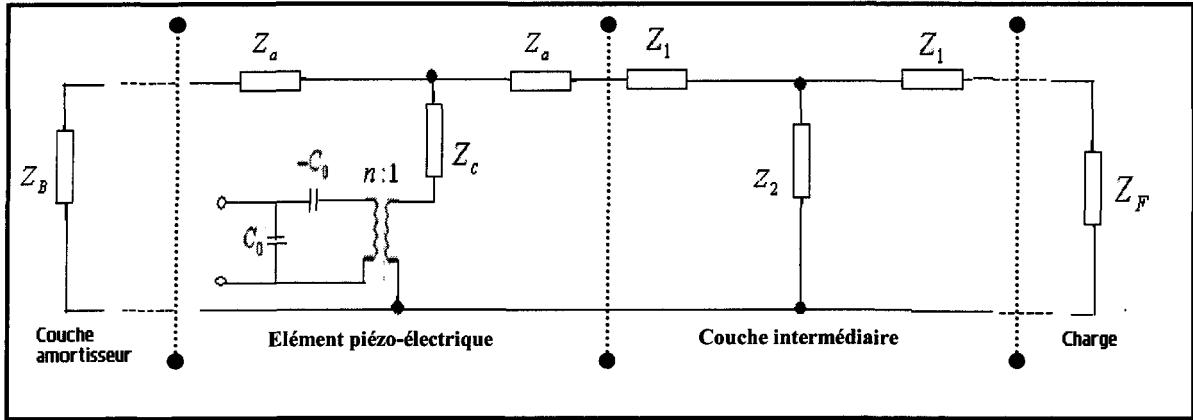


Figure IV-14: Circuit complet équivalent d'un transducteur avec une charge
[Ohigashi et Itoh, 1988]

IV.2.2 Simulation de la propagation d'une impulsion ultrasonore

Lorsqu'une onde ultrasonore se propage dans un milieu, sa forme change à cause de la dispersion et de l'atténuation. Ce phénomène peut être décrit mathématiquement par la relation suivante [Zhao et Basir, 2004]:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i x} \cos 2\pi f_i (t - x/c_i) \quad \text{IV.21}$$

où A_i , α_i , c_i sont respectivement l'amplitude, l'atténuation et la vitesse du son dans le milieu. f_i est la fréquence, n est le nombre de milieu, x est l'épaisseur du milieu et $s(t)$ est l'onde de pression. Afin de simuler le processus d'évolution de la forme d'onde, l'impulsion initiale nommée impulsion Gaussienne est décrite par la relation suivante [Zhao et Basir, 2004]:

$$s_1(t) = \frac{\exp(-t^2/4B)}{\sqrt{4\pi B}} \cos(2\pi f_c t) \quad \text{IV.22}$$

où:

- f_c est la fréquence centrale en Hz;
- B est la bande passante.

Le transducteur ultrasonique répond à cette excitation impulsionnelle par une onde de pression dont l'amplitude décroît exponentiellement jusqu'à son atténuation, comme le montre la figure IV-16. La forme d'onde de pression n'est pas identique à la forme de la tension appliquée, l'enveloppe de l'onde décroît plus rapidement selon l'importance du facteur de qualité Q_m . On constate alors que la forme d'onde de pression débute par une alternance négative due à la tension négative appliquée aux bornes du transducteur.

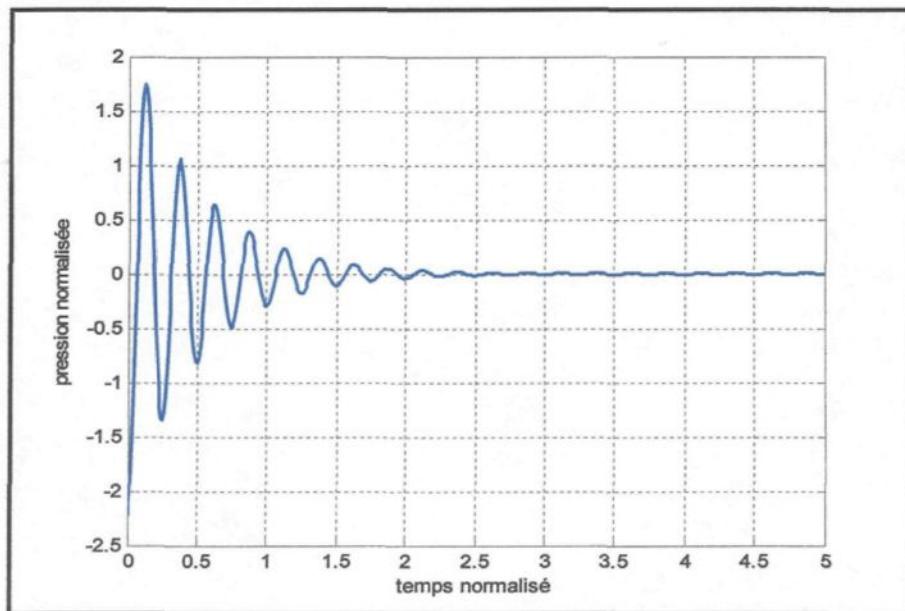


Figure IV-15: Simulation de la réponse d'une sonde piézo-électrique à une excitation négative

IV.2.3 Étude théorique de l'impulsion ultrasonore générée par un transducteur

Lorsque un transducteur piézo-électrique est excité par une impulsion positive, ce dernier produit deux ondes mécaniques sonores, notées B_0 et A_0 sur la figure IV-17 et qui se propagent en mode longitudinal, dans des directions opposées, soit une dans la couche intermédiaire et de la couche amortisseur. L'amplitude des ondes ultrasonores mécaniques est donnée par les relations suivantes [Kasai *et al.*, 1973]:

$$\begin{aligned} (A_1)_0 &= hQ \frac{z_1}{z_1 + z_0} & (A_0)_0 &= -hQ \frac{z_0}{z_1 + z_0} \\ (B_0)_0 &= -hQ \frac{z_0}{z_B + z_0} & (B_B)_0 &= hQ \frac{z_B}{z_B + z_0} \end{aligned} \quad \text{IV.23}$$

où $(A_1)_0$, $(A_0)_0$ et $(B_0)_0$ est le produit de la pression et la surface du transducteur. h est la constante piézo-électrique et Q , z_1 , z_0 et z_B sont la charge électrique, les impédances mécaniques de la couche intermédiaire, de l'élément piézo-électrique et de la couche amortisseur. L'impédance mécanique est égale au rapport de l'impédance acoustique sur la surface.

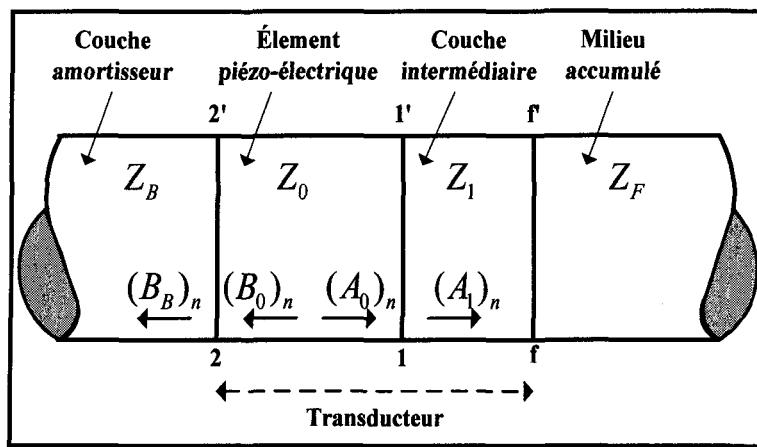


Figure IV-16: Circuit équivalent d'un transducteur en contact avec un milieu [Kasai et al., 1973]

L'impédance des divers matériaux le long du chemin de propagation des ondes acoustiques n'est pas identique. Cette disparité conduit une partie de chaque onde incidente à être réfléchie aux interfaces, tandis que l'autre partie est réfractée aux interfaces du transducteur. Quand l'impulsion $(A_1)_0$ se propage de la frontière 1-1' à la frontière f-f' (l'interface entre la couche intermédiaire et le milieu accumulé), la réflexion et la transmission de l'impulsion ultrasonore se produisent. Une partie de l'énergie de l'impulsion réfléchie se propage dans la couche intermédiaire, la réflexion et la transmission s'établissent une deuxième fois à l'interface de l'élément piézo-électrique et la couche intermédiaire.

Les amplitudes des impulsions ultrasonores $(A_1)_n$, $(A_0)_n$ et $(B_0)_n$ sont données par les relations suivantes [Kasai et al., 1973]. Dans ce cas, $(B_B)_n$ est négligeable.

$$\begin{aligned}
 (A_1)_n &= R_{10}R_{1F}(A_1)_{n-1} + T_{10}(B_0)_{n-1} \\
 (A_0)_n &= T_{01}R_{1F}(A_1)_{n-1} + R_{01}(B_0)_{n-1} \\
 (B_0)_n &= R_{0B}(A_0)_{n-1}
 \end{aligned} \tag{IV.24}$$

où R et T sont les coefficients de réflexion et de transmission des différentes interfaces des milieux:

$$\begin{aligned}
 R_{10} &= (z_0 - z_1)/(z_0 + z_1) & R_{1F} &= (z_F - z_1)/(z_F + z_1) \\
 R_{01} &= -R_{10} & R_{0B} &= (z_B - z_0)/(z_B + z_0) \\
 T_{10} &= 2z_1/(z_1 + z_0) & T_{01} &= 2z_0/(z_1 + z_0)
 \end{aligned}$$

Les amplitudes de l'impulsion pour n valeurs peuvent être obtenues en substituant les valeurs initiales de l'équation IV.23 dans l'équation IV.24 en augmentant n .

L'amplitude de l'onde ultrasonore normalisée se propageant suivant l'épaisseur du milieu accumulé peut être exprimée par la relation suivante:

$$(A_R)_n = K(A_1)_n / (A_1)_0 \tag{IV.25}$$

où $K = 2z_1(z_0 + z_F)/(z_F + z_1)$

CHAPITRE V

CHOIX TECHNOLOGIQUE ET MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE

V.1 Choix technologique du milieu non piézo-électrique

Lorsqu'un élément piézo-électrique est directement exposé à l'environnement (précipitations froides, pollution, rayon solaire, etc.), son efficacité diminue avec le temps, entraînant ainsi une mauvaise détection. De plus, dans le cas où l'élément piézo-électrique est utilisé à la fois comme émetteur et récepteur, une mince couche de glace déposée sur sa surface ne peut être détectée puisque le signal écho sera reçu avant que la période d'onde émise ne soit terminée. Dans ce cas, il devient alors difficile de distinguer le signal écho du signal émis et donc d'effectuer correctement la mesure de l'épaisseur.

Le fait d'intercaler une couche intermédiaire entre l'élément piézo-électrique et la couche à mesurer présente les avantages suivants :

- Dans un premier temps, cela permet un transfert maximal de l'énergie issue du milieu 1 (élément piézo-électrique) dans le milieu 3 (glace), à condition que l'impédance caractéristique de la couche intermédiaire soit égale à la valeur moyenne des impédances de l'élément piézo-électrique et de la couche accumulée. La valeur de l'impédance acoustique demandée Z_{mat} et

l'épaisseur e_{mat} de cette couche sont données par [Banks *et al.*, 1966], [Benech et Novakov, 1999] et [Gudra *et al.*, 2002] comme suit :

$$Z_{mat} = \sqrt[3]{Z_{piézo} Z_{glace}^2} \quad V.1$$

$$e_{mat} = (2n+1) \frac{\lambda}{4}$$

où:

- n est un nombre entier.
- λ est la longueur d'onde en m.

Cette couche intermédiaire d'adaptation d'impédance, appelée lame quart d'onde, est présente dans la plupart des transducteurs ultrasoniques.

- Dans un deuxième temps, cette couche intermédiaire sert de référence pour la détermination du temps de vol de l'onde ultrasonore dans le cas de faibles épaisseurs de la substance accumulée.
- Dans un troisième temps, cette couche sert à protéger l'élément piézo-électrique contre les perturbations environnementales (rayonnements ultraviolets, etc.), ce qui lui garantit une durée de vie plus élevée.

Pour la présente étude, notre choix s'est porté sur le polyméthacrylate de méthyle (souvent abrégé en PMMA), est un thermoplastique transparent dont le monomère est le

méthacrylate de méthyle (MMA). Ce polymère est plus connu sous le nom commercial de Plexiglas®. La structure chimique du PMMA est représentée à la figure suivante.

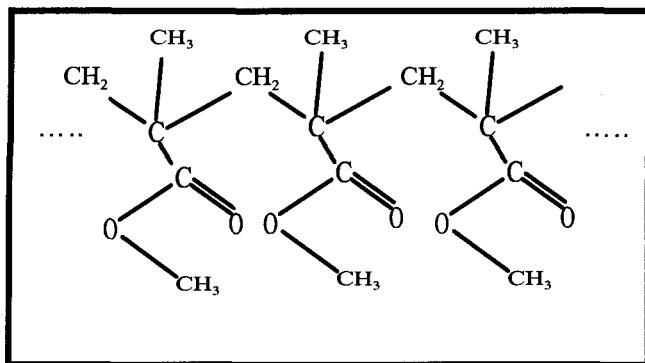


Figure V-1 : Structure du PMMA ($C_5O_2H_8)_n$

Le plexiglas® est utilisé dans notre cas comme une couche intermédiaire puisque ce dernier présente une impédance acoustique proche de la valeur de l'impédance obtenue à l'aide de l'équation V.1. Les caractéristiques du plexiglas® utilisé dans notre étude sont détaillées dans le tableau V-1.

Paramètres	Unités
Nature du produit	Plexiglas® forme solide avec une couleur transparente.
Origine	Canada
Module de Young	3
Densité	1,18
Vitesse du son	2680
Impédance acoustique	3,17
Coefficient d'absorption d'eau	$10^9 \text{ kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ kg.m^{-3} m.s^{-1} $10^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ %

Tableau V-1: Caractéristiques du plexiglas®

V.2 Réalisation du circuit d'émission et de réception de l'onde ultrasonore

Cette section présente les différents montages expérimentaux qui ont été développés pour les besoins de cette recherche comme la génération et la réception des impulsions ultrasonores, la mesure de la vitesse du son et de l'épaisseur d'une accumulation dans différents milieux étudiés.

Le circuit destiné à la génération et la réception d'impulsions est composé d'une partie électronique et d'une partie transducteur. La partie électronique assure l'émission et la réception de l'onde ultrasonique et la partie transducteur assure la conversion du signal électrique en une onde acoustique et réciproquement. Dans notre étude, l'émission et la réception se font par un seul et même transducteur piézo-électrique.

V.2.1 Partie électronique

La partie électronique est composée d'un circuit pour l'excitation et la détection de l'onde ultrasonore [Benech et Novakov, 1999], [Fernandez et Sanchez, 1987]. La forme d'impulsion émettrice utilisée dans nos investigations expérimentales est une forme impulsionale. Elle est très appropriée pour nos tests car elle représente une fonction d'excitation de durée limitée pour prévenir toute réponse intempestive du transducteur. L'onde impulsionale doit être d'une durée la plus brève possible pour permettre à l'écho d'être converti par l'effet piézo-électrique direct et détecté pendant le temps séparant deux impulsions, ainsi que pour permettre la mesure par le temps de vol de faibles épaisseurs.

V.2.1.1 Circuit d'émission

Pour produire cette onde impulsionnelle négative, nous avons réalisé un circuit électronique composé des étages suivants:

- Un bloc astable capable de générer un signal carré de 2,8 ms de période et de +5 V d'amplitude.
- Le deuxième étage est un monostable capable de générer un signal carré de +5 V d'amplitude et de 250 ns de durée.
- Un circuit à deux transistors en commutation, alimenté par une tension de +15 V continue, permet d'obtenir un signal carré de +15 V d'amplitude et de 250 ns de durée. Un transistor NTE 399 utilisé en mode saturation et blocage assure la charge et la décharge d'un condensateur C. Le condensateur C est tout d'abord chargé à travers la résistance R6 par une source de tension de +300 Volts continu. Les cinq diodes en série permettent une charge complète de la capacité. La décharge de la capacité C se fait à travers la boucle (3xD1, R7, R_L) tel qu'illustrée à la figure V-1.

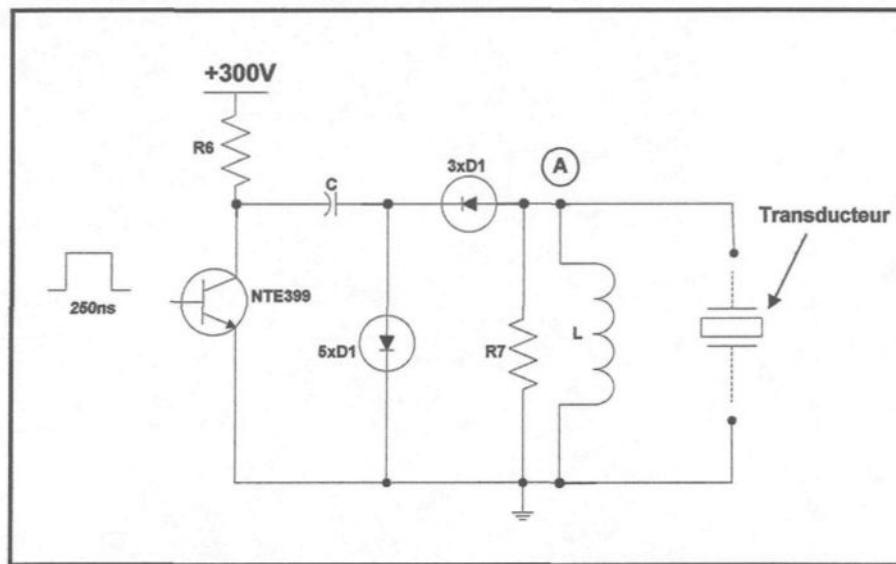


Figure V-2: Circuit électronique pour la génération d'impulsions

L'impulsion générée aux bornes du transducteur (point A) est une impulsion négative de 500 ns de durée avec une amplitude de 200 Volts. Elle peut être simulée par une fonction sinusoïdale et exponentielle, comme représentée à la figure V-2.

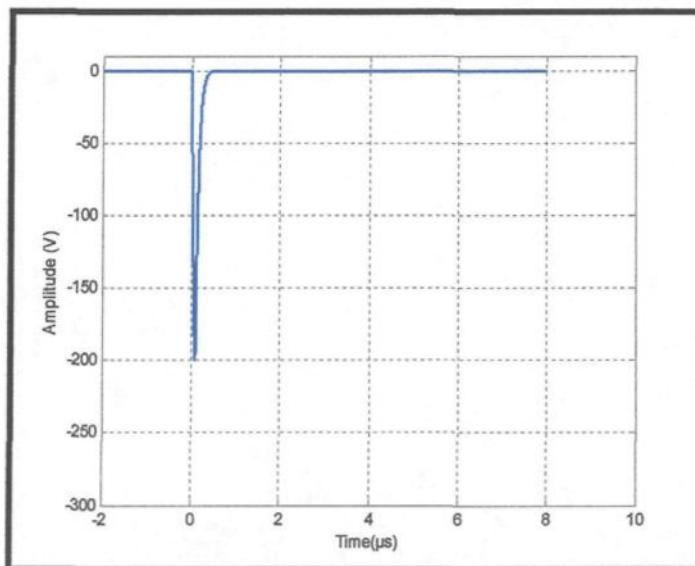


Figure V-3: Simulation de l'impulsion

V.2.1.2 Circuit de réception

Le circuit de réception est constitué des étages suivants:

- Un limiteur de tension placé entre le transducteur et l'étage amplificateur, capable de limiter la tension entre -5,4 Volts à 5,4 Volts pour empêcher l'impulsion négative de 200 Volts de passer à l'amplificateur de tension fonctionnant en haute fréquence.

Par effet piézo-électrique direct, l'écho obtenu, de quelques millivolts d'amplitude, passe à travers le limiteur de tension (voir figure V-3).

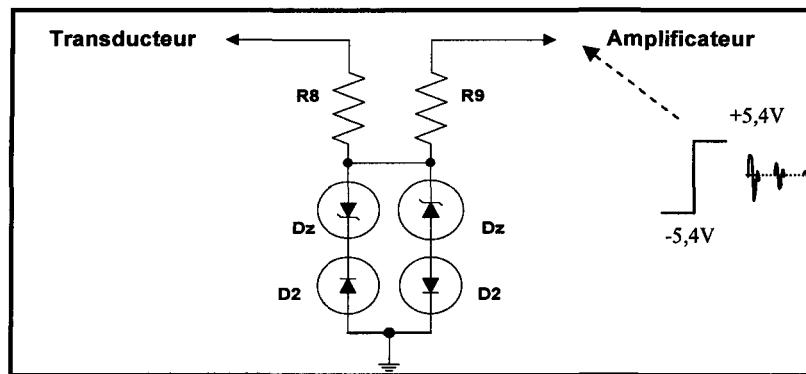


Figure V-4: Limiteur de tension

- Étage amplificateur de tension fonctionnant en haute fréquence, avec un gain égal à huit, utilisé pour amplifier les échos dont l'amplitude est de l'ordre de quelques millivolts.

V.2.2 Le transducteur

Le transducteur est une sonde piézo-électrique PZT, telle qu'illustrée à la figure V-4.

Pour notre étude, la sonde PZT est utilisée pour mesurer la vitesse de propagation dans les différentes précipitations (glace, givre et eau), pour mesurer l'épaisseur de la glace déposée sur une surface et pour discriminer les différentes précipitations froides. Les caractéristiques de la sonde PZT utilisée sont les suivantes:

- Dimension : Circulaire de 10 mm de diamètre
- Fréquence centrale de 2,25 MHz
- Compagnie : KB-AEROTECH; USA



Figure V-5: Sonde piézo-électrique

L'ensemble du dispositif électronique expérimental utilisé avec la sonde PZT est représenté à la figure V-5

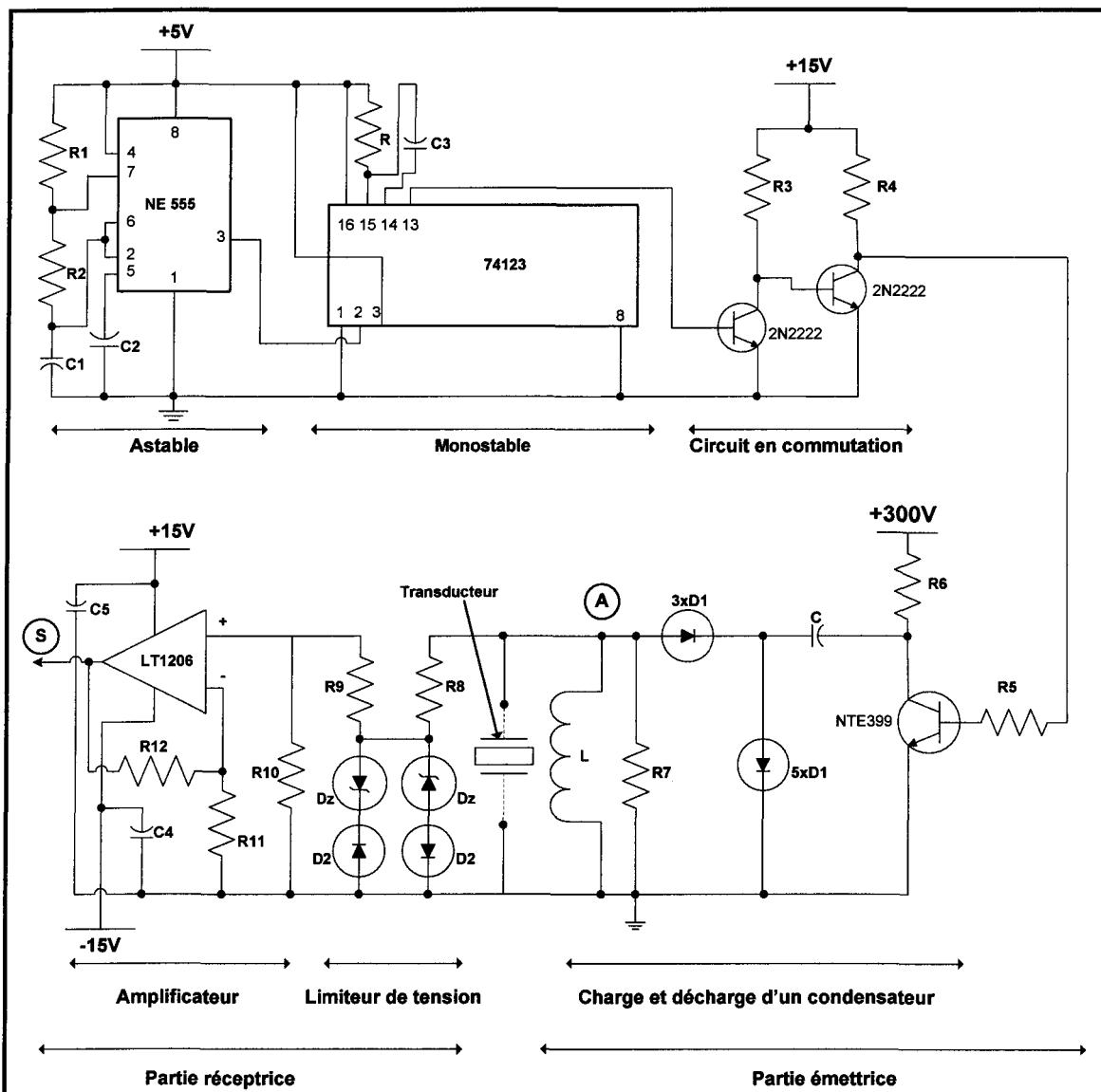


Figure V-6: Circuit électronique d'émission et de réception d'onde ultrasonore

Les spécifications techniques sur les composants du circuit de la figure V-5 peuvent être trouvées en annexe.

V.3 Méthodologie utilisée pour la mesure de la vitesse du son

Avant d'entamer la présentation des différents équipements utilisés, une procédure expérimentale a été utilisée pour mesurer la vitesse de propagation du son dans la glace, le givre et l'eau. Il était nécessaire d'effectuer des essais pour lesquels la formation de toute précipitation devait être aussi proche que possible des conditions réelles. Pour pouvoir calculer l'épaisseur du milieu accumulé, la vitesse du son dans laquelle l'onde se propage doit être connue. Les différentes étapes pour la mesure de la vitesse du son dans les différents milieux (glace, givre et eau surfondue) sont présentées comme suit:

- Le dispositif expérimental pour la mesure d'épaisseur du milieu accumulée est constitué d'un transducteur piézo-électrique de type PZT, d'un circuit générateur d'impulsion (détailé au paragraphe V.2.1) et d'une chambre climatique pour le maintien du modèle de test à une température fixe.
- Toutes les expérimentations de ce travail ont été effectuées avec les appareils de la **CIGELE** et le personnel technique a été mis à contribution. Les paragraphes suivants présentent une description complète de l'appareillage, des protocoles et des conditions expérimentales utilisées.

V.3.1 La chambre climatique

La chambre climatique utilisée est celle du laboratoire de la **CIGELE**. Elle est équipée d'un générateur de précipitations, d'un système d'oscillation des gicleurs et d'un système de ventilation. Le générateur est conçu pour une simulation des précipitations froides désirées. Un système de ventilation et un système d'oscillation composé d'un ensemble de quatre gicleurs pneumatiques placé à environ 2 m avec un angle approprié au-dessus de notre échantillon, sert à produire des gouttelettes d'eau dont la vitesse varie selon la pression d'air. L'angle d'oscillation des gicleurs est contrôlable, elle est de 55 degrés. La période d'oscillation du système est un paramètre contrôlable. Le réglage du débit d'eau et la pression d'air sont réglés selon le type d'accumulation désirée. La chambre climatique est aussi munie d'un système de refroidissement pour l'obtention de la température ambiante désirée. Pour notre étude, la température de la chambre est contrôlée à -12 °C. La chambre est représentée à la figure V-7.

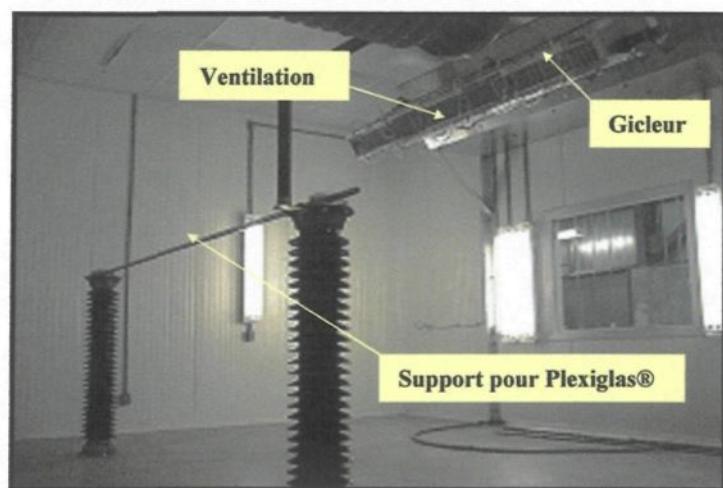


Figure V-7: Chambre climatique de la CIGELE

V.3.2 Procédure expérimentale pour la mesure de la vitesse du son dans les différentes précipitations

Les mesures de vitesse du son dans les différents milieux ont été réalisées à l'aide de la sonde PZT accouplé à une couche intermédiaire en plexiglas®. Le choix du plexiglas® a été privilégié par le fait qu'il présente une impédance acoustique proche de celle de la glace et de l'eau (voir tableau V-1), cela signifie une bonne transmission d'onde ultrasonore à l'interface entre les deux milieux (sonde et milieu accumulé). Pour les différents tests, les surfaces du plexiglas® sont légèrement polies par un papier sablé de grade 600, puis dégraissées avec un savon à main dégraissant Alovera, qui contient de l'abrasif plastique pour enlever tous les contaminants.

La couche intermédiaire de plexiglas® est placée dans la chambre climatique maintenue à une température de -12°C. Les tests d'accumulation sont répétés une dizaine de fois pour les différentes précipitations (glace, givre, eau). L'accumulation s'effectue jusqu'à l'obtention de l'épaisseur souhaitée du dépôt de glace ou de givre. Le dépôt doit être le plus uniforme sur la surface pour la mesure exacte de l'épaisseur qui est contrôlée manuellement à l'aide d'un pied à coulisse électronique.

Immédiatement après l'étape d'accumulation, une fois que l'épaisseur de la couche du milieu étudié est atteinte, les échantillons sont réfrigérés dans la chambre pendant environ 2h avant d'être soumis aux essais de mesure d'épaisseur. La température de la couche de glace est toujours considérée égale à celle de la chambre climatique. Les paramètres

environnementaux utilisés lors de l'étape d'accumulation sont résumés dans les tableaux V-2 et V-3.

Paramètres	Unités
Type de précipitation	Glace
Température de l'air	-12 °C
Vitesse du vent	3,3 m.s ⁻¹
Densité	0,8-0,9 kg.m ⁻³

Tableau V-2: Paramètres utilisés dans l'accumulation de glace

Paramètres	Unités
Type de précipitation	Givre
Température de l'air	-12 °C
Vitesse du vent	5,2 m.s ⁻¹
Densité	0,5-0,6 kg.m ⁻³

Tableau V-3: Paramètres utilisés dans l'accumulation du givre

V.3.2.1 *Appareillage*

- Pied à coulisse
- Un échantillon de plexiglas® de 3 mm, 6 mm et de 12 mm d'épaisseur.
- Un transducteur piézo-électrique de type céramique PZT.
- Une balance électronique type **METTLER TOLED**.
- Un circuit d'émission et de réception d'impulsion.
- Un oscilloscope **TEKTRONIX TDS210** d'une bande de fréquence allant jusqu'à 60 MHz.

V.3.2.2 Principe de mesure

La sonde piézo-électrique de type PZT utilisée en émission et en réception est placée sur la face non exposée du plexiglas®, comme indiqué à la figure V.8. Le couplage entre la sonde ultrasonique et le plexiglas®, nécessaire afin de réduire l'effet d'atténuation d'impulsion ultrasonique entre les surfaces, est réalisé par une huile spécifique dite « couplante ». Une fois le couplage réalisé, la sonde piézo-électrique est reliée au circuit électronique détaillé au paragraphe V.2.1, voir figure V-9.

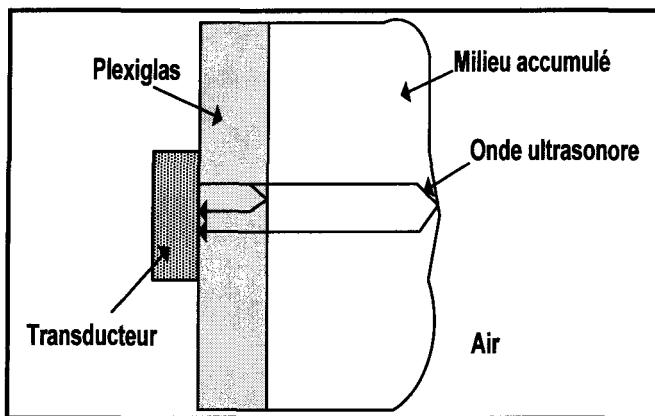


Figure V-8: Propagation d'une onde ultrasonore

Après excitation de la sonde piézo-électrique PZT par l'impulsion décrite à la figure V-3. Par effet piézo-électrique inverse, la sonde PZT répond à cette impulsion par une onde de pression dont l'amplitude décroît exponentiellement. La forme de l'onde de pression n'est pas identique à la forme de la tension appliquée du fait des phénomènes de résonance qui se produisent dans la sonde. L'onde ultrasonore émise par la sonde PZT se propage dans le plexiglas® à une vitesse égale à 2680 m.s^{-1} . Lors de la présence d'une couche de glace sur

la surface du plexiglas®, une partie d'énergie de l'onde est réfléchie et l'autre est transmise. Lorsque l'écho arrive au transducteur, celui-ci engendre des contraintes mécaniques sur la surface de la sonde piézo-électrique qui la déforme. Par effet piézo-électrique direct, ces déformations induisent à leur tour une tension électrique amplifiée et visualisée à l'aide de l'oscilloscope.

Tel qu'illustrée à la figure V-8, l'onde transmise se propage dans le milieu accumulé, puis à l'interface du milieu accumulé/air, le phénomène de réflexion et de transmission s'établit. La forme de l'onde primaire de la réponse de la sonde piézo-électrique PZT est utilisée comme signal de repère pour le calcul du temps de vol de l'impulsion. Les échos sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope digital. Connaissant l'épaisseur de la couche accumulée (glace, givre, eau), la vitesse du son du milieu est obtenue facilement par l'équation IV.19. Inversement, connaissant la vitesse du son dans les différentes accumulations et le temps de vol de l'impulsion, l'épaisseur peut être calculée facilement.

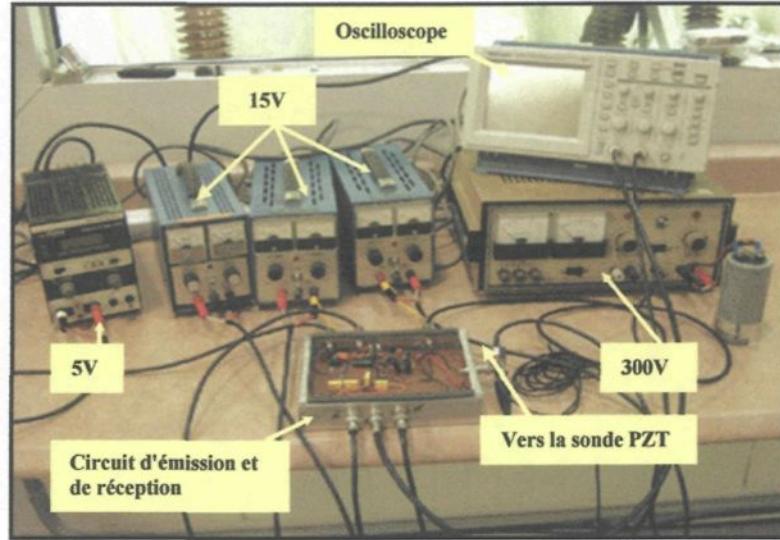


Figure V-9: Montage expérimental d'émission, de réception et de visualisation des impulsions ultrasonores

Le montage expérimental des essais de mesure de la vitesse de propagation du son et de l'épaisseur des différentes précipitations froides est représenté à la figure V-10.

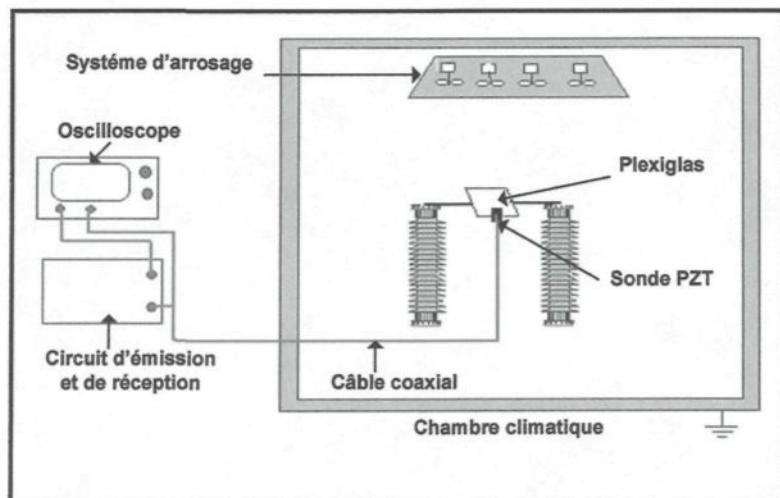


Figure V-10: Montage expérimental pour les essais de mesure de vitesse du son dans les différents milieux accumulés

CHAPITRE VI

RÉSULTATS EXPÉIMENTAUX ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats des tests expérimentaux qui ont permis de mesurer l'épaisseur des différentes accumulations (de glace, de givre et d'eau). Il est dédié à la présentation et l'analyse concernant l'utilisation d'une sonde piézo-électrique PZT. La sonde a servi d'émetteur et de récepteur de l'impulsion ultrasonore. L'amplitude de l'onde reçue permet d'identifier les différents milieux accumulés sur le transducteur.

VI.1 Vitesse du son dans les différents milieux accumulés

Nous avons procédé à une série de mesures de la vitesse de propagation du son dans les différents milieux (la glace, l'eau et le givre), afin de déterminer sa valeur moyenne. Les résultats présentés sont ceux obtenus par mesure directe visualisée à l'aide d'un oscilloscope digital à la sortie du circuit électronique. La valeur moyenne est calculée à partir de l'épaisseur et du temps de vol de l'onde ultrasonore dans le milieu considéré, donnée par l'équation IV.19.

Pour les trois milieux considérés (glace, givre et eau), les tests expérimentaux ont montré une augmentation du temps de vol de l'onde ultrasonore en fonction de l'épaisseur du milieu étudié. En effet, cette variation est présentée dans les figures VI-1, VI-2 et VI-3.

Pour la glace, le givre et l'eau, les valeurs moyennes de propagation du son sont respectivement égales à $3800 \pm 5 \text{ m.s}^{-1}$, $3800 \pm 5 \text{ m.s}^{-1}$ et $1500 \pm 5 \text{ m.s}^{-1}$.

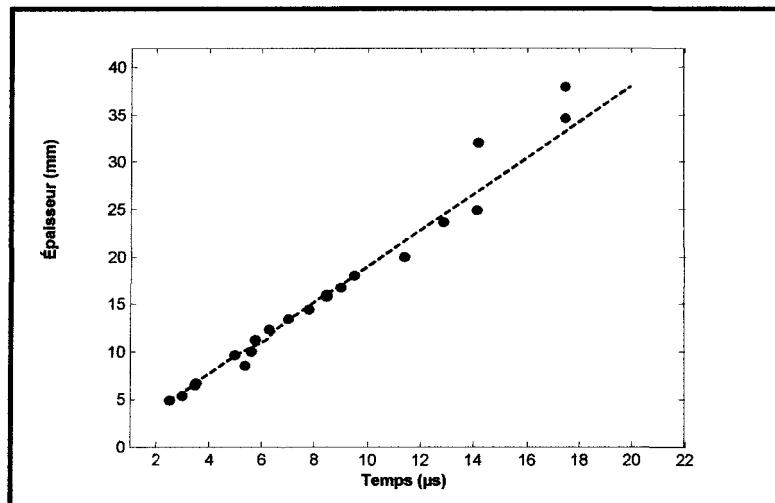


Figure VI-1: Mesure expérimentale de la variation de l'épaisseur de la glace en fonction du temps de vol de l'impulsion ultrasonore

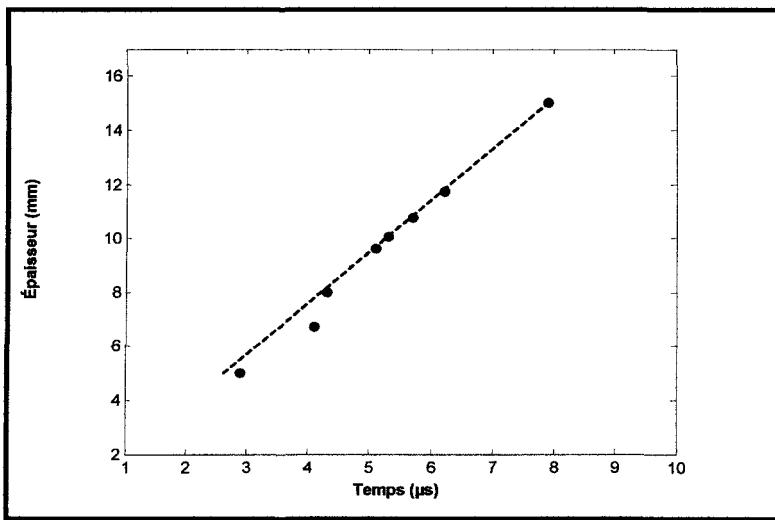


Figure VI-2: Variation de l'épaisseur du givre en fonction du temps de vol de l'impulsion ultrasonore

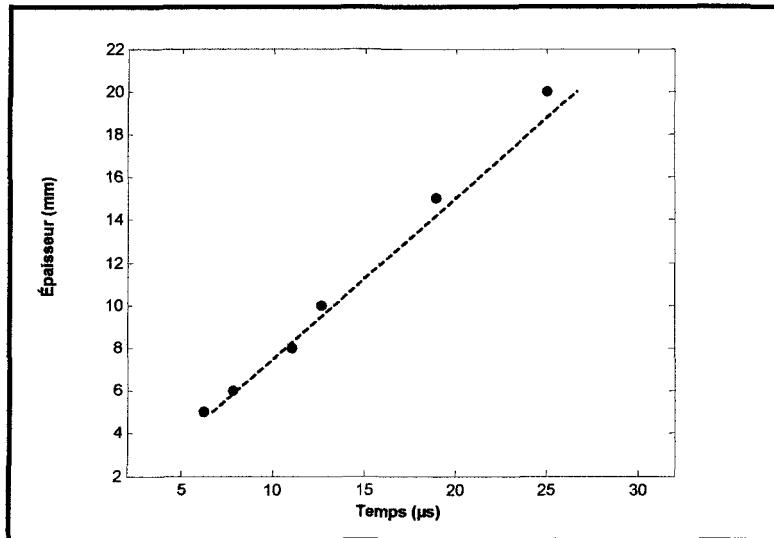


Figure VI-3 : Variation de l'épaisseur d'eau en fonction du temps de vol de l'impulsion ultrasonore

D'après les résultats obtenus, il est intéressant de remarquer que la vitesse de propagation dans un des milieux solides (glace, givre) est différente de celle obtenue pour l'eau. À titre d'exemple, pour une épaisseur de 1cm de glace, le temps de propagation d'onde ultrasonore est de 5,60 μ s. Par contre, pour une épaisseur de 1cm d'eau, le temps de propagation d'onde ultrasonore est de l'ordre de 12,61 μ s.

Théoriquement, il est possible de déterminer la vitesse du son dans un milieu solide par l'équation suivante [Hansman et Kirby, 1985]:

$$c = \sqrt{\frac{E_y (1-v)}{\rho(1+v)(1-2v)}} \quad \text{VI.1}$$

où:

- E_y est le module de Young en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

- ν est le coefficient du Poisson.

- ρ la densité du solide en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Dans le cas d'une couche de glace dont le module de Young est égal à 9,9 GPa [Blackburn *et al.*, 2000], $\nu=0,32$ [Blackburn *et al.*, 2000], $\rho = 0,92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [mesurée], la vitesse de propagation du son est de $3944 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur est proche de celle mesurée expérimentalement, puisqu'une erreur relative de 3,65 % est ainsi obtenue. Cela démontre une bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales permettant ainsi de valider la méthode par ultrasons utilisée.

VI.2 Impédance acoustique, coefficient de transmission et de réflexion des différents milieux

Comme illustré dans le chapitre précédent (figure V-8), la propagation d'une onde ultrasonore se fait du transducteur vers le plexiglas®, puis du plexiglas® vers le milieu accumulé. Connaissant ainsi la vitesse du son des différents milieux accumulés, il est possible d'en déduire leur impédance acoustique d'après l'équation IV.1; et le coefficient de transmission et de réflexion d'après les équations IV.17 et IV.18.

Le tableau VI-1 présente l'impédance acoustique, le coefficient de réflexion et le coefficient de transmission de l'onde ultrasonore en fonction des caractéristiques des milieux déposés (air, eau, glace et givre) sur un plexiglas® de $3,17 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ d'impédance acoustique.

	Air	Eau	Glace	Givre	Plexiglas®
ρ (g.cm ⁻³)	1,2	1	0,92	0,6	1,18
c (m.s ⁻¹)	343	1500	3800	3800	2680
$Z 10^6$ (kg.m ⁻² .s ⁻¹)	$413*10^6$	1,5	3,5	2,28	3,17
R	0,99	0,35	0,05	0,16	
T	0,01	0,65	0,95	0,84	

Tableau VI-1: Impédance acoustique, coefficient de réflexion et de transmission de l'onde ultrasonore

Les résultats présentés dans le tableau VI-1, montrent que le coefficient de transmission T et le coefficient de réflexion R diffèrent selon le milieu accumulé à la surface du plexiglas®. Cette différence est liée aux impédances acoustiques des différents milieux accumulés.

VI.3 Faisceau ultrasonore émis

Un faisceau ultrasonore émis par une source circulaire est représenté par deux zones (détailé au paragraphe IV.1.5.1). Le faisceau ultrasonore se propage dans le plexiglas® sous forme cylindrique sur une certaine distance qui dépend de la vitesse du son dans le plexiglas®, avant de diverger. Pour une épaisseur de 6 mm de plexiglas®, le faisceau ultrasonore garde une forme cylindrique. La divergence est produite en présence d'un milieu accumulé. Dans le cas d'une couche de glace ou de givre, le faisceau ultrasonore diverge avec un angle de 12 degrés d'après l'équation IV-10, à une distance de 20,9 mm d'après l'équation IV-9, par rapport à la sonde piézo-électrique. Par contre, dans le cas de

l'eau, le faisceau ultrasonore diverge avec un angle de 4,17 degrés à une distance de 37,5 mm par rapport à la sonde piézo-électrique.

Afin de conserver l'intensité du faisceau ultrasonore, il est nécessaire d'augmenter soit le diamètre de la source ultrasonore, soit la fréquence de l'élément émetteur d'onde ultrasonore. L'idéal est d'augmenter la fréquence de la source ultrasonore afin d'éviter une atténuation du faisceau.

VI.4 Mesure des différentes épaisseurs des milieux accumulés

VI.4.1 Épaisseur de 6 mm de plexiglas® avec de l'air

La figure VI-4 représente la forme des ondes ultrasonores pour une épaisseur de 6 mm de plexiglas® couplée à la sonde piézo-électrique PZT et chargée par l'air. Après excitation de la sonde piézo-électrique PZT par une impulsion, cette dernière donne naissance à une onde longitudinale dans le plexiglas®. L'onde ultrasonore se propage dans le plexiglas® à une vitesse de l'ordre de 2680 m.s^{-1} . À l'interface air/plexiglas®, 99 % de l'intensité d'onde ultrasonore est réfléchie et 1% est transmise (d'après le tableau VI-1). L'onde réfléchie suit son parcours et à l'interface sonde PZT/plexiglas®, 83 % de l'intensité de l'onde ultrasonore est réfléchie et 17 % de l'intensité de l'onde ultrasonore est transmise à la sonde PZT.

L'onde réfléchie subit une atténuation et une réflexion aux interfaces jusqu'à son atténuation tel qu'illustrée à la figure VI-4. La durée entre l'instant d'émission de l'impulsion et celui du signal de réception (écho) définit le temps de vol d'impulsion

ultrasonore. À partir du temps de vol d'impulsion ultrasonore, l'épaisseur du plexiglas® est directement calculée. Ainsi, un temps de vol de 4,5 μ s correspond bien à une épaisseur de plexiglas de 6,03 mm.

Pour la suite de nos investigations, le premier signal écho représente donc l'épaisseur du plexiglas® qui servira de référence pour le calcul des différentes épaisseurs des milieux accumulés sur la surface du plexiglas®.

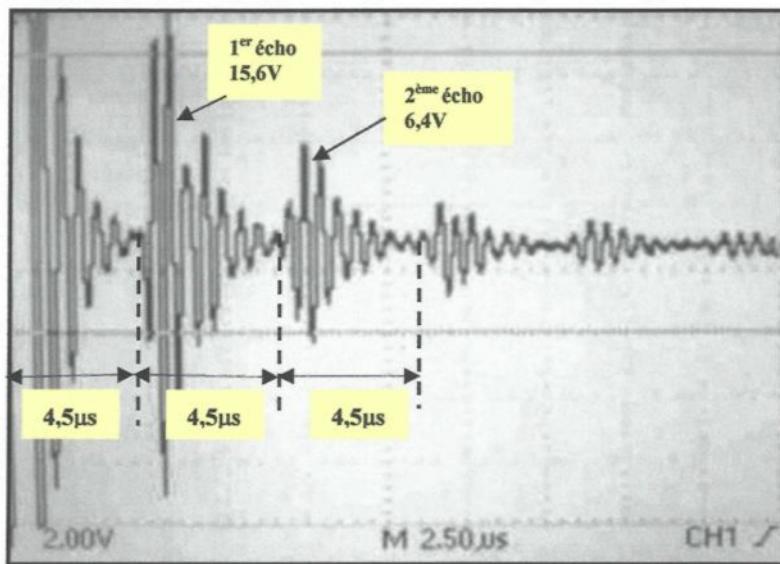


Figure VI-4: Mesure expérimentale d'une forme de l'onde visualisée à l'oscilloscope pour une épaisseur de 6 mm de plexiglas® chargé par l'air

VI.4.2 Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 10 mm d'eau

Dans cette étape, une couche d'eau est déposée sur la surface du plexiglas® dont la température varie entre 0 °C et 4 °C. L'onde émise par la sonde piézo-électrique se propage d'abord dans le plexiglas®. À l'interface entre l'eau/plexiglas®, 35 % de l'intensité de l'onde

ultrasonore est réfléchie et 65 % est transmise dans l'eau. L'onde transmise dans l'eau subit à son tour une réflexion de 99 % et une transmission de 1 % à l'interface air/eau. L'onde ultrasonore, réfléchit dans l'eau, se réfléchie et se transmet à l'interface plexiglas/eau. La partie transmise dans le plexiglas® est détectée par la sonde PZT. Le premier écho visualisé sur l'oscilloscope correspond bien au temps de vol de l'impulsion dans le plexiglas®. Tel qu'illustré à la figure VI-5, on observe un deuxième écho qui a une amplitude très faible par rapport au premier écho, le temps de vol entre les deux échos est égal à 4,5 μ s; ce qui répond à l'épaisseur du plexiglas®. L'amplitude du troisième écho est beaucoup plus importante que celle du premier écho et du deuxième écho; il correspond au temps de vol d'onde ultrasonore dans la couche d'eau. L'épaisseur de la couche d'eau est calculée à partir du temps de vol de l'onde ultrasonore entre le premier écho (écho du plexiglas®) et le troisième écho (écho de l'eau). Le temps de vol de l'onde ultrasonore dans ce cas est égal à 12,25 μ s, ce qui correspond à une couche d'eau de 9,18 mm d'épaisseur. Cette valeur est proche puisqu'une erreur relative de 8,9% est obtenue.

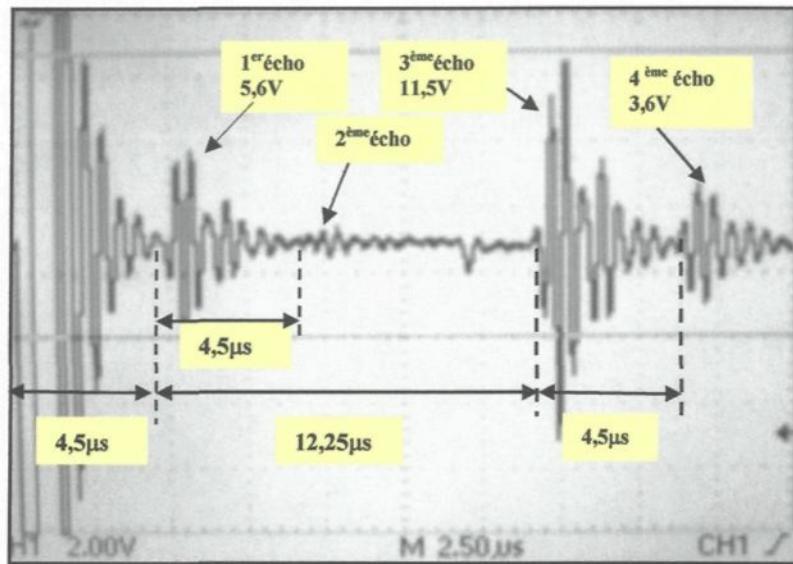


Figure VI-5: Mesure expérimentale de la forme de l'onde visualisée à un oscilloscope pour une épaisseur de 10 mm d'eau déposée à la surface d'une épaisseur de 6 mm de plexiglas®

VI.4.3 Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 10 mm de glace

Tel qu'illustrée à la figure suivante, une couche de glace de 10 mm d'épaisseur a été accumulée sur la surface du plexiglas® de 6 mm d'épaisseur. La mesure d'épaisseur de la glace est faite dans une chambre climatique à -12 °C.

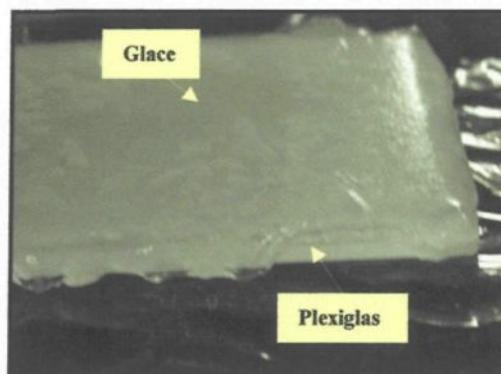


Figure VI-6: Accumulation de glace sur une surface de plexiglas®

L'onde ultrasonore générée par la sonde piézo-électrique PZT se propage dans le plexiglas®. Entre les deux milieux (glace/plexiglas®), 95 % de l'intensité de l'onde ultrasonore est transmise dans la glace et 5 % est réfléchie. À l'interface air/glace, 1 % de l'intensité de l'onde est transmise et 99 % est réfléchie. L'onde réfléchie dans la glace subit une réflexion et une transmission à l'interface plexiglas®/glace. Le premier écho désigne l'épaisseur du plexiglas® et le deuxième écho correspond au temps de vol de l'onde ultrasonore dans la glace (voir figure IV-7). Le temps de vol de l'onde ultrasonore entre le premier écho et le deuxième écho est égal à 5 μ s, ce qui correspond à une épaisseur de glace de 9,5 mm. Une erreur de 5 % est ainsi obtenue.

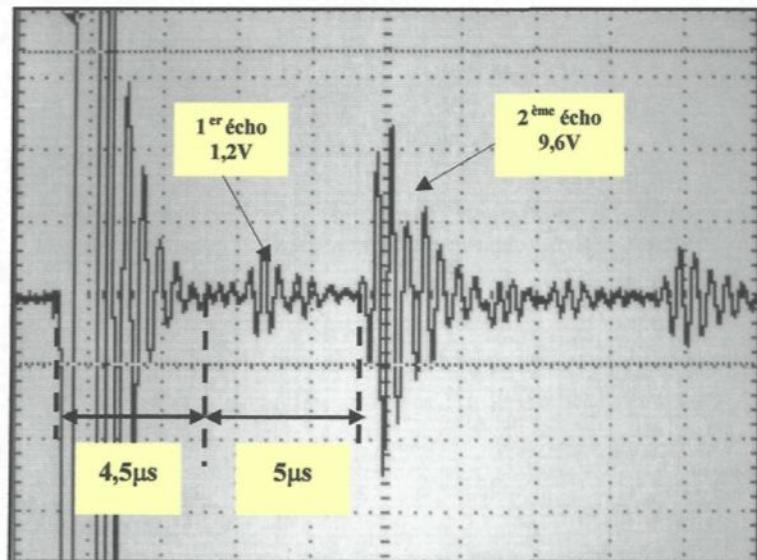


Figure VI-7: Mesure expérimentale de la variation de l'onde ultrasonore visualisée à l'oscilloscope pour une couche de glace de 10 mm accumulée sur un plexiglas® de 6 mm

VI.4.4 Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 2 mm de pollution- épaisseur de 10 mm de glace

La figure IV-8 présente le temps de vol de l'onde ultrasonore pour une couche de glace de 10 mm d'épaisseur accumulée sur une surface du plexiglas® de 6 mm d'épaisseur où une légère couche de pollution artificielle de 2 mm d'épaisseur est déposée entre les deux milieux. Pour produire cette couche de pollution artificielle qui est habituellement utilisée au laboratoire de la CIGELE [Sabri *et al.*, 2006], un mélange de 1g de poudre de silicate d'aluminium hydrate AC5302 avec 0,1g de NaCl a été utilisé. Le mélange est ensuite étalé sur le plexiglas® et laissé à sécher pendant 24 heures. La mesure d'épaisseur s'effectue ensuite en chambre climatique à une température de -12 °C.

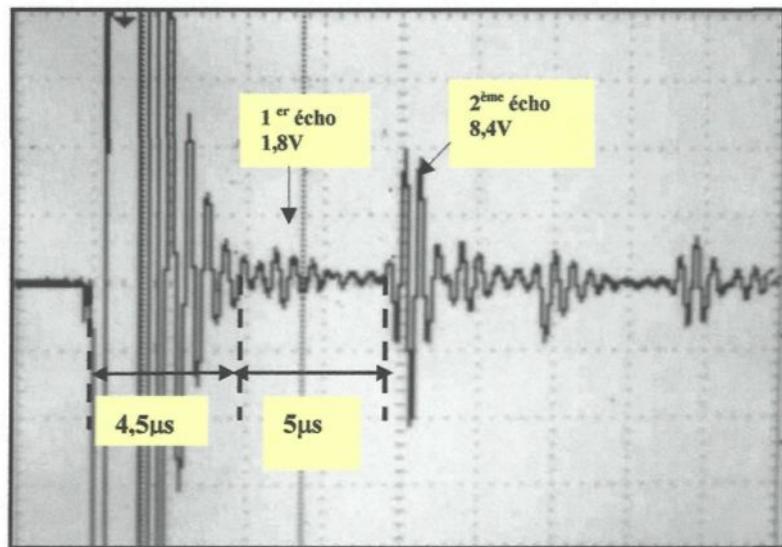


Figure VI-8: Mesure expérimentale de la forme de l'onde ultrasonore visualisée à l'oscilloscope pour une couche de pollution déposée entre le plexiglas® et la glace

Les résultats de la figure VI-8 permettent de remarquer que le premier écho représente toujours le temps de vol de l'onde ultrasonore pour une épaisseur de plexiglas® de 6 mm,

alors que le deuxième écho représente le temps de vol de l'onde ultrasonore dans la glace, car son amplitude est assez importante par rapport au premier écho. L'épaisseur est directement calculée à partir du produit du temps de vol d'onde ultrasonore séparant le premier et le deuxième écho et la vitesse du son dans la glace. L'épaisseur de la glace est donc égale à 9,5 mm. Ces résultats montrent donc qu'une légère couche de pollution déposée entre le plexiglas® et la glace n'influence pas le temps de vol de l'onde ultrasonore dans la glace, mais uniquement l'amplitude des échos. Ainsi, l'amplitude de l'écho de la glace est de 8,4 V contre 9,6 V pour l'amplitude de l'écho obtenue pour la même épaisseur de glace mais sans couche de pollution.

VI.4.5 Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 9 mm d'eau- épaisseur de 10 mm de glace

Pour cette étape effectuée dans la chambre climatique à -12 °C, nous avons déposé une épaisseur de glace de 10 mm sur un bain d'eau d'une épaisseur de 9 mm à une température située entre 0°C et 4 °C, telle qu'illustrée à la figure VI-9.

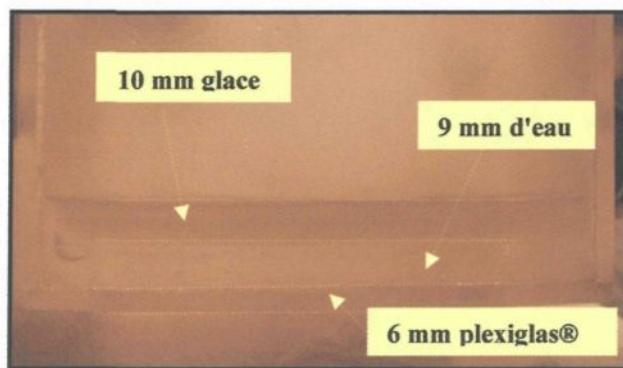


Figure VI-9: Représentation d'un échantillon composé de plexiglas®, eau et glace

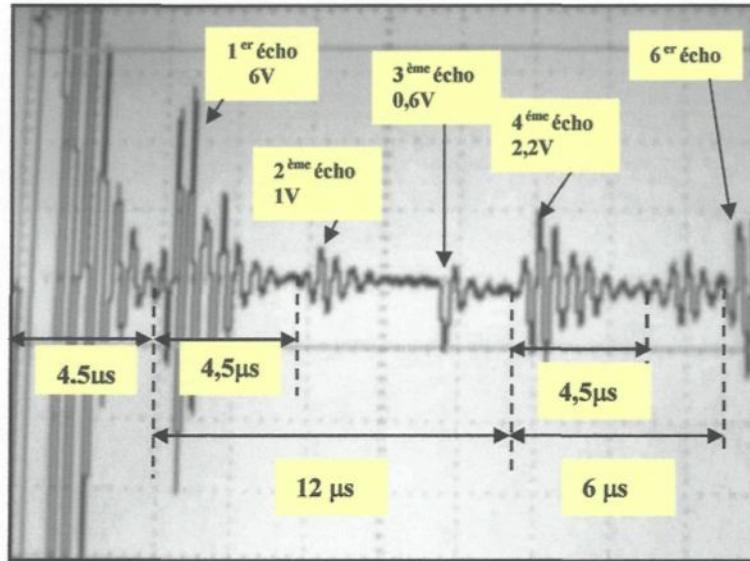


Figure VI-10: Mesure expérimentale de la forme de l'onde ultrasonore visualisée à oscilloscope pour une couche d'eau sise entre une couche de glace et de plexiglas®

Le premier écho correspond au temps de vol de l'onde ultrasonore dans le plexiglas® de 6 mm d'épaisseur. L'amplitude de cet écho subit une atténuation et une réflexion à l'interface plexiglas®/eau jusqu'à son atténuation, tel qu'illustrée à la figure VI-10 (représentée par le deuxième et le troisième écho). L'amplitude des deuxième et troisième échos correspond bien à un temps de vol de l'onde ultrasonore de $4,5 \mu\text{s}$ qui répond à une épaisseur de plexiglas® de 6,03 mm. On remarque que le quatrième écho présente une amplitude beaucoup plus importante que les deuxième et troisième échos, comme le montre la figure VI-10. Cela implique que ce dernier correspond au temps de vol de l'onde ultrasonore dans la couche d'eau. L'épaisseur de la couche d'eau est calculée à partir du temps de vol de l'onde ultrasonore entre le premier écho (écho du plexiglas) et le quatrième écho (écho de l'eau). Le temps de vol de l'onde ultrasonore est égal à $12 \mu\text{s}$ ce qui

correspond à une couche d'eau de 9 mm d'épaisseur. L'amplitude du quatrième écho, à partir de laquelle l'épaisseur d'eau est calculée, est différent de l'amplitude obtenue pour une couche d'eau seule présente sur la surface du plexiglas®, tel qu'illustrée à la figure IV-10. De plus, l'apparition d'une autre amplitude de l'onde ultrasonore (sixième écho) est importante par rapport à celui du cinquième écho, qui indique la présence d'une couche de glace sur la surface de la couche d'eau. L'épaisseur de cette dernière est calculée à partir du temps de vol de l'onde ultrasonore entre le quatrième écho (écho de l'eau) et le cinquième écho (écho de glace). Le temps de vol d'onde ultrasonore dans ce cas est égal à 6 μ s, équivalent à une couche de glace de 11,4 mm d'épaisseur.

Les résultats ainsi obtenus montrent qu'il est possible de mesurer l'épaisseur des couches de nature différentes, déposées à la surface du transducteur constitué d'une sonde PZT et d'une épaisseur de plexiglas®.

VI.4.6 Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 1,7 mm d'eau- épaisseur de 9 mm de glace

La figure VI-11 présente la forme de l'onde ultrasonore pour un échantillon composé d'une épaisseur de plexiglas® de 6 mm, d'une couche d'eau de 1,7 mm d'épaisseur et d'une couche de glace de 9 mm d'épaisseur.

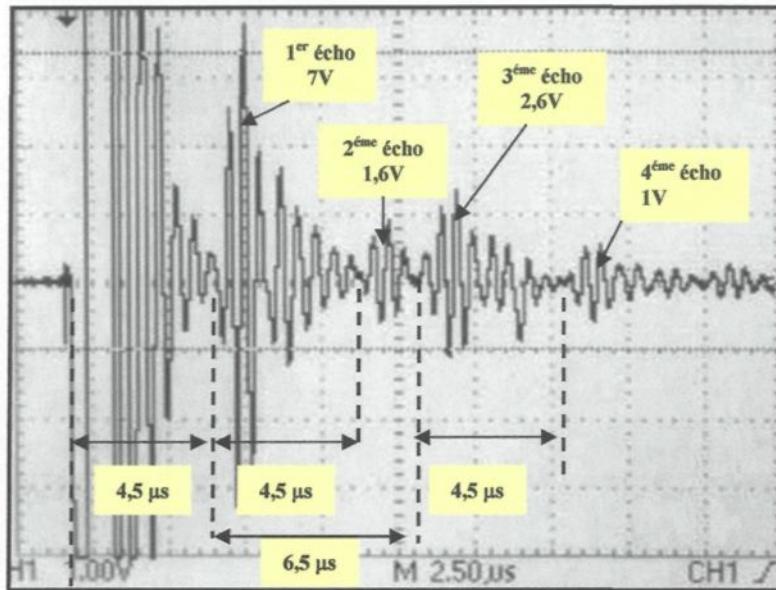


Figure VI-11: Mesure expérimentale de la forme d'onde de 6 mm de plexiglas®, 1,7 mm d'eau et 9 mm de glace

Le premier écho détecté par la sonde PZT correspond bien à l'épaisseur du plexiglas® de 6,03 mm d'épaisseur. La forme de l'onde ultrasonore subit une réflexion aux interfaces jusqu'à son atténuation. Le deuxième écho correspond bien à une atténuation du premier écho dans le plexiglas®. Le temps de vol entre les deux premiers échos est de 4,5 μ s, qui répond à une épaisseur de plexiglas® de 6,03 mm.

Tel qu'illustrée à la figure VI-11, l'amplitude du troisième écho est beaucoup plus importante que celle du deuxième écho, elle représente le milieu accumulé. Les résultats présentés sur la figure VI-10 montrent que le temps de vol de l'onde ultrasonore dans une couche d'eau de 9 mm d'épaisseur est de 12 μ s, il est normal que pour une couche de 1,7 mm d'épaisseur, le temps de vol de l'onde ultrasonore soit de 2,26 μ s, expliquant du même coup le fait que l'écho de la couche d'eau n'apparaisse pas sur la figure VI-11. Le troisième

écho représente donc la forme de l'onde ultrasonore dans la couche de glace. L'épaisseur de la couche de glace est calculée à partir du temps de vol de l'onde ultrasonore entre l'écho de la couche d'eau et celui de la couche de glace. Il est de 4,25 μ s, ce qui répond à une épaisseur de 8,056 mm. Une erreur de 10,5 % est ainsi obtenue. Une couche d'eau de faible épaisseur augmente donc l'erreur sur la mesure d'épaisseur de la glace.

VI.4.7 Épaisseur de 6 mm de plexiglas®- épaisseur de 10 mm de givre

Une accumulation du givre de 10 mm d'épaisseur a été déposée sur la surface du plexiglas® de 6 mm d'épaisseur, comme le montre la figure VI-12. La mesure d'épaisseur s'effectue en chambre climatique à -12 °C.

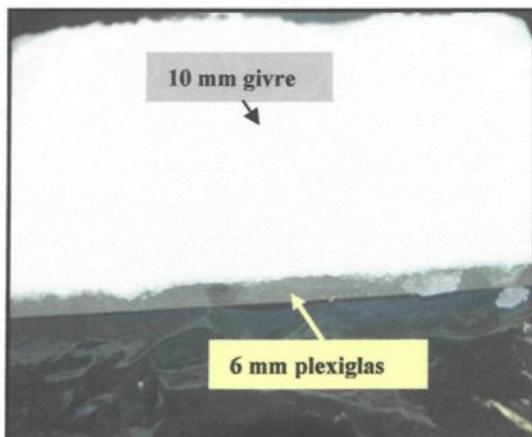


Figure VI-12: Représentation d'un échantillon composé de 6 mm de plexiglas® et de 10 mm de givre

Les résultats de la figure VI-13 montrent que, le premier écho correspond à l'épaisseur du plexiglas® de 6,03 mm. L'amplitude du premier écho subit une atténuation et une réflexion à l'interface plexiglas®/givre jusqu'à son atténuation tel que représentée à la

figure VI-13 (représentée par le deuxième écho). Le deuxième écho est séparé du premier écho par un temps de $4,5 \mu\text{s}$ qui correspond bien à une épaisseur de 6,03 mm de plexiglas®, comme indiqué à la figure VI-13. On constate, sur la figure VI-13, la présence d'un troisième écho de faible amplitude séparé par rapport au premier écho par une distance égale à $5,4 \mu\text{s}$ et équivalente à une épaisseur de givre de 10,26 mm, ce qui correspond à une erreur relative de 2,5 % par rapport à l'épaisseur réelle.

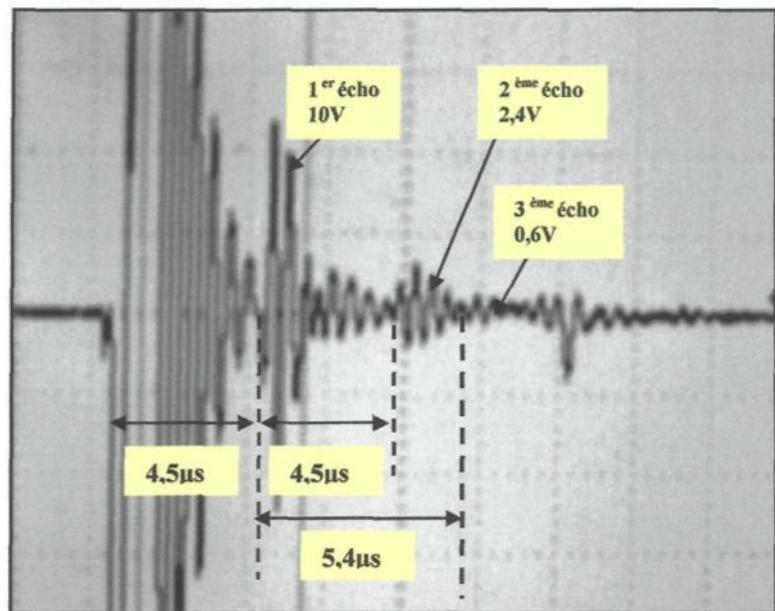


Figure VI-13: Mesure expérimentale de la forme de l'onde ultrasonore pour une accumulation de 10 mm de givre sur une épaisseur de 6 mm de plexiglas®

VI.5 Discrimination des différents milieux accumulés

La discrimination entre les différents milieux accumulés est un point important à considérer dans la réalisation d'un capteur efficace. Elle permet d'identifier la nature des précipitations froides en contact avec le transducteur, qui est une étape essentielle dans la

caractérisation de la dangerosité de l'accumulation et dans l'estimation du poids accumulé sur les conducteurs des lignes aériennes.

Les résultats précédents ont montré que l'adjonction d'une couche de plexiglas® permet, d'une part, de mesurer de faibles épaisseurs d'accumulation et d'autre part, de servir de référence temporelle pour la mesure d'épaisseur lorsque plusieurs milieux sont présents, ou encore lorsqu'une couche polluante ou perturbatrice de faible épaisseur s'immisce entre le plexiglas® et l'accumulation.

Les résultats précédents permettent aussi de mettre en évidence la possibilité fort intéressante de discrimination obtenue grâce à la présence du plexiglas®. Cette possibilité est en fait obtenue grâce à l'amplitude du premier écho provenant de la réflexion à l'interface entre le plexiglas® et le milieu accumulé. En effet, l'amplitude du premier écho dépend de deux paramètres: le coefficient de réflexion à l'interface d'après le tableau VI-1 et le coefficient de l'atténuation de l'onde ultrasonore dans le plexiglas®, qui est égale à $1,85 \text{ dB.cm}^{-1}$ [Zhao et Basir, 2004]. Dans ce contexte, l'amplitude de l'onde ultrasonore aux bornes de la sonde piézo-électrique est de 18 V dans le cas du plexiglas® en contact avec l'air. D'après l'équation IV.21, l'onde ultrasonore subit une atténuation dans son parcours à travers le plexiglas®. L'amplitude du signal écho du plexiglas® en contact avec l'air est égale 15,63 V après amplification. Expérimentalement, l'amplitude du premier signal écho est de 15,6 V pour une couche de plexiglas® de 6 mm déposée sur la surface de la sonde piézo-électrique (voir figure VI-4), ce qui correspond à une erreur relative de 4 %.

VI.5.1 Cas d'une couche d'eau

Les figures VI-4 et VI-5 montrent, les amplitudes et le temps de vol des échos sont différents. Cela s'explique par la présence d'une accumulation sur la surface du plexiglas®. Pour déterminer le type de cette dernière, on passe par le calcul suivant. Connaissant le coefficient d'atténuation dans le plexiglas® et d'après l'équation IV.21, il est possible de calculer l'amplitude du premier écho pour un plexiglas® de 6 mm d'épaisseur en contact avec l'air. La valeur calculée est de 15,63 V.

À l'interface du plexiglas® et de l'eau, 35 % de l'amplitude de l'onde est réfléchie et 65% de l'amplitude de l'onde est transmise. Par multiplication, l'amplitude de l'onde ultrasonore de 15,63 V par le coefficient de réflexion de 35 %, on obtient une amplitude du premier écho égale à 5,47 V à l'interface plexiglas®/eau. Expérimentalement, (voir les résultats de la figure VI-5), l'amplitude du premier écho est de 5,6 V, ce qui correspond à une erreur relative de 2,37%.

VI.5.2 Cas d'une couche de glace

La même démarche que celle présentée à la section précédente est appliquée dans le cas d'une couche de glace accumulée sur la surface du plexiglas®. Dans ce cas, le coefficient de réflexion de l'onde ultrasonore est égal à 5 % à l'interface du plexiglas/glace. Théoriquement, l'amplitude du premier écho est égale à 0,79 V après amplification. Expérimentalement, l'amplitude de l'écho du plexiglas® visualisée sur l'oscilloscope pour une couche de glace est égale à 1,2 V, tel qu'illustrée à la figure VI-7. Elle correspond à une

erreur relative d'environ 34%; une différence peut être expliquée par l'impédance acoustique de la glace, calculée à partir de l'équation IV.1 présentée dans le tableau VI-1, qui influence directement le coefficient de réflexion donné par l'équation IV.17 et qui ne serait pas tout à fait égale à sa valeur réelle. En effet, le fait que la glace soit en faible proportion et constituée de bulles d'air pourrait être la cause de cette différence puisque dans ces conditions, cette dernière devrait être considérée, au point de vue ultrasonique, comme un matériau poreux. Dans ces conditions, les équations IV.1 et IV.17 pour déterminer respectivement l'impédance acoustique de la glace et le coefficient de réflexion devraient être révisées.

VI.5.3 Cas d'une couche de givre

Pour une couche de givre, le coefficient de réflexion est de 16 %. L'amplitude du signal écho du plexiglas®, après amplification, est donc égale à 2,50 V. Cependant, l'amplitude de l'écho mesurée expérimentalement (voir figure VI-13) est de 10V; une valeur proche de celle obtenue dans le cas où le plexiglas® est en contact direct avec l'air.

La différence entre expérimental et théorique peut être expliquée de la même manière que la différence obtenue dans le cas de la glace. Cependant, le givre présente une proportion de bulles d'air beaucoup plus importante que dans le cas de la glace puisque sa densité est environ 40 % plus faible que celle de l'eau et 8 % dans le cas de la glace. La proportion importante de bulles d'air, faisant du givre un matériau d'une porosité importante, aurait donc pour effet de modifier la valeur de l'impédance acoustique et par conséquent, augmenter le coefficient de réflexion de l'onde ultrasonore. Des recherches

supplémentaires devront être entreprises afin de déterminer exactement l'influence des bulles d'air présentes dans le givre sur la valeur de l'impédance acoustique du givre. Aussi clarifier quels processus d'atténuation (dispersion ou diffusion tel que définies au chapitre IV) sont mis en cause.

Pour comparaison, l'impédance acoustique et la densité «apparente» ou «équivalente» de la glace et du givre ont été déterminés par calcul inverse, à partir de l'amplitude du premier écho généré à l'interface du plexiglas®/milieu accumulé et de la vitesse du son déterminée expérimentalement.

- **Cas de la glace:** L'amplitude expérimentale du premier écho du plexiglas® est égale à 1,2 V et le coefficient de réflexion est égal à 0,08. D'après la relation IV.17, l'impédance acoustique apparente de la glace devient égale à $2,7 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pour une vitesse du son de 3800 m.s^{-1} , correspondant à une densité équivalente de la glace de $0,71 \text{ kg.m}^{-3}$.
- **Cas du givre:** L'amplitude expérimentale du premier écho est de 10 V, le coefficient de réflexion est alors égal à 0,63. La relation IV.17 montre, l'impédance acoustique apparente du givre devient égale à $0,71 \cdot 10^6 \text{ kg.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pour une vitesse du son de 3800 m.s^{-1} , équivalent à une densité équivalente du givre de $0,186 \text{ g.cm}^{-3}$.

Le tableau VI-2 suivant représente une comparaison entre les impédances acoustiques et les densités de glace et de givre.

	Glace	Givre
Mesure d'après l'équation IV.1	$c \text{ (m.s}^{-1}\text{)}=3800$ $\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}=0,92$ $Z \text{ (10}^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)}=3,5$	$c \text{ (m.s}^{-1}\text{)}=3800$ $\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}=0,6$ $Z \text{ (10}^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)}=2,28$
Mesure expérimentale	$\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}=0,71$ $Z \text{ (10}^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)}=2,7$	$\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}=0,186$ $Z \text{ (10}^6 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}\text{)}=0,71$

Tableau VI-2: Comparaison entre la mesure théorique et la mesure expérimentale de l'impédance acoustique des deux milieux, glace et givre

Ainsi, on constate qu'il existe une grande disparité entre l'impédance acoustique calculée théoriquement (voir l'équation IV.1) et celle calculée expérimentalement d'après l'amplitude du premier écho. On remarque que la densité apparente de la glace devient $0,71 \text{ g.cm}^{-3}$ au lieu de $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$, ce qui pourrait s'expliquer par une augmentation de la densité de l'air dans la glace de 8 % à 29 %, contribuant ainsi à une réflexion plus importante de l'onde ultrasonore à l'interface du plexiglas®/glace. Par contre, dans le cas du givre, la densité apparente, déterminée à partir de l'amplitude du premier écho, est égale à $0,186 \text{ g.cm}^{-3}$ au lieu de $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$. La différence d'amplitude dénote une augmentation de la densité d'air de 40 % à 82 %. Par conséquent, la réflexion de l'onde ultrasonore dans ce cas devient très importante à l'interface du plexiglas®/givre et la dispersion est significative.

Les valeurs des densités apparentes, déterminées expérimentalement à partir de la mesure de l'amplitude du premier écho, permettent de mettre en évidence l'existence d'une couche de faible épaisseur en contact avec le plexiglas® et dont la densité serait différente du restant de l'épaisseur de glace ou de givre. Cependant cette hypothèse reste à démontrer par des investigations plus poussées.

CHAPITRE VII

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

VII.1 Conclusions générales

Cette recherche entreprise dans le cadre d'une maîtrise a permis de démontrer que la mesure du temps de vol d'une impulsion ultrasonique est tout à fait adaptée pour la mesure de l'épaisseur d'une couche de glace importante accumulée sur une surface plane. À cet effet, un transducteur ultrasonique formé par la combinaison d'un élément piézo-électrique couplé à une couche intermédiaire de plexiglas® a ainsi été développé, de même que le circuit électronique associé pour l'émission et la réception des impulsions ultrasonores. Par la même occasion, il a été possible de vérifier que l'adjonction de la couche de plexiglas® permettait une discrimination entre l'eau, le givre et la glace présente à la surface du transducteur. Les résultats obtenus sont d'une importance capitale puisqu'ils serviront de base au développement d'un capteur ultrasonique permet de suivre l'évolution d'une accumulation autour d'un cylindre et de déterminer la géométrie du dépôt accumulé et son poids.

D'après les résultats expérimentaux et théoriques, il est possible de tirer les conclusions suivantes:

1. L'utilisation d'une impulsion ultrasonique générée à l'aide d'un transducteur ultrasonique à base de PZT utilisé en mode d'émission/réception couplé à un circuit électronique adapté, a permis de mesurer la vitesse de propagation du son dans des différents milieux tel que la glace, le givre et l'eau. Les résultats sont conformes aux valeurs théoriques, permettant ainsi de valider la méthode et le circuit électroniques qui ont été développés.

2. L'utilisation du plexiglas® dans la réalisation de notre transducteur a permis :

- De mesurer une gamme importante d'épaisseurs de couches de substances de nature différente déposées à la surface du transducteur;
- De servir de référence pour mesurer l'épaisseur des accumulations lorsque plusieurs milieux sont présents ou lorsqu'une couche de pollution ou perturbatrice de faible épaisseur s'immisce entre le plexiglas® et le milieu accumulé;
- De permettre d'identifier la nature des dépôts de glace présents à la surface du plexiglas®. Dans le cas où le dépôt est formé d'un seul type d'accumulation, la discrimination est effectuée simplement en analysant l'amplitude du premier écho. Si plusieurs accumulations sont présentes, la discrimination devient plus complexe puisque l'amplitude et le temps de vol reliés aux différents échos doivent être analysés;
- De mettre en évidence le fait que les impédances acoustiques de la glace mais surtout du givre sont dépendantes de la présence de bulles d'air dans

ces derniers et que ces dernières doivent être reconsidérées. À cet effet, un calcul inverse a ainsi permis de calculer les nouvelles valeurs des impédances acoustiques à partir de l'amplitude du premier écho généré à l'interface plexiglas®/dépôt accumulé. Les valeurs obtenues sont ainsi plus faibles que les valeurs mesurées expérimentalement. Cela nous a permis d'attirer notre attention sur le fait de l'existence possible d'une couche de faible épaisseur de glace ou de givre avec une densité plus faible que le restant du dépôt de glace ou de givre qui serait présent à la surface du plexiglas®. Celui-ci serait due au processus de givrage des gouttelettes d'eau surfondues, qui serait différent dans les tous premiers instants de l'accumulation, lorsque la surface du plexiglas® est encore très froide et propre.

VII.2 Recommandations

A partir des résultats obtenus, plusieurs recommandations peuvent être émises, dans le but de contribuer aux futurs travaux de recherche reliés à la présente étude et qui permettront de développer un capteur distribué autour d'une surface cylindrique. Les recommandations pour les travaux futurs sont les suivantes :

1. Effectuer, en parallèle, une étude théorique et expérimentale afin d'apporter des précisions sur les propriétés physiques de la glace ou du givre à l'interface avec le plexiglas®. En particulier, des tests avec le prototype de transducteur présenté

précédemment pourrait être utilisé afin d'étudier l'amplitude du premier écho en fonction de différents paramètres tel que la température d'accumulation, le taux de précipitation ou encore la grosseur des gouttelettes d'eau. De même, une étude bibliographique et théorique devra être menée afin d'expliquer les phénomènes physiques mis en jeu;

2. Suivre l'évolution des propriétés mécaniques du plexiglas® avec le temps. Ce polymère, qui absorbe l'UV, peut présenter des signes de fatigue avec le temps (micro-stress) et donc influencer probablement son impédance acoustique. Pour des travaux futurs cet aspect important devra être pris en compte ou à étudier notamment avec la possibilité d'utiliser d'autres matériaux;
3. Améliorer le travail en traitant tout les figures par un système d'acquisition et de traitement de données au lieu d'être visualisées sur l'oscilloscope;
4. Faire un travail supplémentaire au niveau de l'amortissement des impulsions ultrasonores afin d'augmenter la sensibilité de la mesure d'épaisseur ainsi que le pouvoir de discrimination;
5. Puisque la structure cristalline de la glace ou du givre dépend des paramètres tel que la température d'air, la taille des gouttelettes, la vitesse du vent ainsi que la teneur de l'eau liquide, il serait intéressant d'étudier dans ce cas, la réponse du transducteur ultrasonique à différents types de glace et de givre pour pouvoir étudier et comparer l'influence de ces paramètres sur la propagation des ultrasons dans le milieu accumulé.

6. La présente étude a montré qu'une faible couche de pollution artificielle déposée entre le plexiglas® et la glace a une faible influence sur la réponse du transducteur, mais elle permet néanmoins d'effectuer la mesure de l'épaisseur de glace en apportant des soins particuliers lors de la visualisation des signaux des échos. Cependant, dans l'optique d'un traitement informatisé des informations, un traitement de signal adapté devra être développé pour la prise en compte d'une éventuelle couche de pollution;
7. Effectuer des tests avec un transducteur formé par un élément piézo-électrique PZT de diamètre de quelques millimètres couplé à une lame quart d'onde en plexiglas® ou autre matériau plus adéquat, le tout travaillant en émission/réception. Quelques essais en situation réelle auraient contribué à une plus grande originalité du travail;
8. Il serait intéressant de tester le comportement des transducteurs piézo-électriques PVDF, de configurations différentes (rectangulaire ou circulaire) couplés à une lame quart d'onde en plexiglas®, le tout travaillant en émission/réception. À cet effet, le montage électronique devra être adapté correctement et en particulier, l'étage limiteur et amplificateur;
9. Pour les deux points précédents, les distances relatives au champ proche et lointain devront être définies dépendamment des dimensions des éléments piézoélectriques utilisés afin de développer des mesures les plus ponctuelles possibles. À cet effet et si nécessaire, des études sur la focalisation des ultrasons devront être entreprises.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anderson M. et Meiners L., « Electro-optic ice device », US patent N° 6425286, Novembre 1999.

Ashrake handbook, « Heating ventilating and air-conditioning applications », American Society of Heating refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. 1991.

Aydi A, « Elaboration et caractérisations diélectriques de céramiques ferroélectriques et/ou relaxeur de fromule $MSnO_3-NaNbO_3$ (M=Ba, Ca). Thèse de doctorat en physique, Mars 2005.

Banks B, Gordon E et Rawding H, « La détection ultrasonique des défauts dans les matériaux », Paris 1966.

Bauer F, APS Conf, Proc. N° 78, W.H. Nellis, L. Seamon, R.A. Graham (eds.), American Institute of Physics. New York, pp251-267, 1882.

Barthod C., Passard M., Bouillot J., Galez C. et Farzaneh M., « High electric field measurement and ice detection using a safe probe near power installations », Sensors and Actuators A 113, PP 140-146, 2004.

Benech P et Novakov E., « Ultrasonic detection of air bubbles in ducts using PVDF », Journal Measurement Science Technologies 10, pp. 1032-1036.1999.

Blackwood et Carl I.R., « Apparatus and method for ice detection », US patent N° 5243185, Juillet 1992.

Blackburn C, Laforte C et Laforte J.L., «Apparatus for measuring the adhesion force of a thin ice sheet a substrate », Pro of the 9 th International Workshop Atmospheric Icing of Structures, chester, Royaume-Uni, Juin 2000.

Blackburn C, Laforte J.L. et Gagnon D., « Comparative study of the quantity of rime and glaze accreted on free rotating and fixed overhead ground cables : Effects of anti-torsion Device ». Iwais 2002

Brace J.G. et Sanfelippo T.S., « Acoustic wave H.sub.2.O phase-change sensor capable of self-cleaning and distinguishing air, water, dew, frost and ice », US patent N° 5051645, Janvier 1990.

Brossia C.E. et Wu S.C., « Fiber optic probe system », US patent N °4851817, Mars 1986.

Brown B et Goodman J.E., « Ultrasons de haute intensité », Applications Industrielles, Ed Dunod, Paris 1971.

Brown L.F. et Carlson D.L., « Ultrasound Transducer Models for Piezoelectric Polymer Films ». IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control. Vol 36 N°3, pp.313-18.1989.

Burns J.D., « Icing detection system », US patent N° 5760711, Avril 1996.

Burns J.D. et Anderson M.V., « Substance detection system and method », US patent N° 6052056, Avril 1997.

Chamuel J.R., « Ultrasonic aircraft ice detector using flexural waves », US patent N° 4461178, Avril, 1982.

Chen Q.X. et Payne P.A., « Industrial applications of piezoelectric polymer transducers », Decembre 1994.

Claffey K.J., Jones K.F. et Ryerson C.C., « Use and calibration of Resemount ice detectors for meteorological research », Atmospheric Research 36, pp 277-286. 1995.

Cober S.G. et Issac G.A., « Assessing the Resemount icing detector with in situ measurement », Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, pp 5151-528, Avril 2001.

Coursant R.H., Megnio C. et Tellier J.M., « Automatic method of intrinsic characterisation of lossy piezoelectric structures », in Proc. 6 th ISAF 86 IEEE, pp 730, 1986.

Daniels J.W., « Ice detecting system », US patent N° 4775118, Novembre 1985.

Davis G.T., « The applications of Ferroelectric Polymers », chapter 4, blackie and son Ltd-London. 1988.

Dognon A., « Les ultrasons et leurs applications », Presses universitaire de France, Paris 1953.

Donskoy D.M. et Sutin A.M., « Method and apparatus for acoustic detection and location of defects in structures or ice on structures », US patent N° 6301967, Janvier 1999.

Durin P.E. et Carr S.H., « A historical perspective on the occurrence of piezoelectricity in materials MRS bulletin/February, pp22, 1989.

Féllin B., « Remote sensing of atmospheric icing in Québec », Second International Workshop On Atmospheric Icing of Structures. Trondheim Norway, Juin 1984.

Federow H.L. et Silverman J.H., « Laser ice detector », US patent N° 5296853, Novembre 1992.

Fernandez R.A. et Sanchez P.S., « Broad-band driving of echographic arrays using 10 ns-500V efficient pulse generator », Ultrasonics, Vol 25, pp 221-229, 1987.

Furukawa T. et Wang T.T., « Measurement and Properties of ferroelectric Polymers», The Applications of Ferroelectric Polymers, Blackie and Son Ltd-London.

Gerardi J.J., Dahl P.R. et Hickman G A., « Smart skin ice detection and de-icing system », US patent N° 5206806. Janvier 1989.

Gerardi J.J., Dahl P.R. et Hickman G.A., « Piezoelectric sensor », US patent N° 5191791, Mai 1990.

Gerardi J.J., Hickman G.A., Khatkhate A.A. et Pruzan D.A., « Measuring ice distribution profiles on a surface with attached capacitance electrodes », US patent N° 5551288, Mars 1995.

Gudra T, Krzysztof et Opielinski, « Influence of acoustic impedance of multilayer acoustic systems on the transfer function of ultrasonic airborne transducers », Ultrasonics 40, pp. 457-463, 2002.

Guesdon C., « Études des précipitations des événements de verglas et givre à travers Québec ». Mémoire présenté à université du Québec à Chicoutimi, 2000.

Hansman Jr.R.J. et Dershowitz A., « Optically indicating surface de-icing fluids », US patent N° 5039439, Mars 1989.

Hansman R.J et Kirby M.S, « Measurement of Ice Accretion Using Ultrasonic Pulse-Echo Techniques », Journal. Aircraft, vol. 22, N° 6, pp. 530-535, 1985.

Hobbs et Victor P., « Ice Physics », Clarendon Press Oxford.1974.

Hsu D.K., Margetan F.J., Wormely S.J. et Simpson J.A., « Apparatus and method for detection of icing onset and ice thickness », US patent N° 5095754, Avril 1991.

Kasai C., Okuyuma D. et Kikuchi Y., « Generation and detection of short ultrasonic pulses via piezoelectric transducer with an intermediate layer of quarter wavelength ». Electronics and Communications in Japan, Vol 56, pp 43-9, 1973.

Klainer S.M. et Milanovich F.P., « Optical sensor for the detection of ice formation and other chemical species », US patent N° 4913519, Mars 1988.

Klim J.J., « Fiber optic ice detector », US patent N° 5748091, Octobre 1996.

Kirby M.S. et Hansman Jr.R.J., « Method and apparatus for measurement of ice thickness employing ultra-sonic pulse echo technique », US patent N° 4628736, Janvier 1985.

Koosmann M.R., « Membrane type non-intrusive ice detector », US patent, N° 4611492, Mai 1986.

Laforte J.L., Allaire M.A et Laflamme J., « Wind tunnel evaluation of a rime metering device using a magnetostrictive sensor », Atmospheric Research 36, pp 287-301. 1995.

Laforte J.L., Allaire M.A. et Laflamme J.L., « State of the art on power line de-icing », Journal of Atmospheric Research, Vol 46, pp 143-158, 1998.

Larue F. et Bisson J., « Ultrasonic method and apparatus for detecting and identifying such as ice on the surface of a structure », US patent N° 5507183, Avril 1994.

Leug W.P. et Yung K.K., « Internal losses in PVDF ultrasonics transducers », Journal Applied Physics, Vol 50. N° 12, pp 8031, 1979.

Li X., Vartuli J. et Shih W.H., « Detection of water-ice transition using a lead zirconate titanate-brass transducer », Journal of Applied Physics, Vol 92, N°1, Avril 2002.

Lovinger A.J., Davis D.D., Cias R.E. et Kometani M.J., « The role of molecular defects on the structure and phase transitions of PVDF. Polymer », Vol 28, pp 617, 1987.

Luukkala M., « Apparatus for indicating the freezing of the surface of an asphalt road, paved runway, or the like », US patent N° 4335613, Octobre 1980.

Luukkala M., « Detector for indicating ice formation on the wing of an aircraft », US patent N° 5467944, Septembre 1993.

Manitoba Hydro, « Ice Storm Management of Overhead Lines », CEA Workshop, 1^{er} Edition, 1993.

Matuseski T.J., Hongerholt D.D. et Rajana K.M., « Acoustic reflector attachment compatible with native aircraft structure », US patent N° 6378377, Avril 1999.

Matsushige K. et Takemura T., « Journal Polymer Science», Polymer Physics, Edition 16, 921, 1978.

Micheron F., « Thermodynamique du PVF2 et applications », extrait de la revue technique thomson- CSF, Vol 11, N°3, pp 513, 1979.

Noury N., « le capteur intelligent exemples industriels et en médecine » Thèse en doctorat présenté à l'université Joseph Fourier de Grenoble 1. Avril 2002.

Nunnally W.C., « Aircraft ice detection and de-icing using lasers », US patent N°5823474, Septembre 1996.

Ohigashi H., « Ferroelectric copolymers of vinylidene fluoride and trifluoroethylene with a large electromechanical coupling factor », Japan Journal Applied Physics, Vol 21, N° 8, pL455-L457.

Ohigashi H., «The Applications of Ferroelectrics Polymers», chapter 11, Blackie and Son Ltd- London 1988.

Ohigashi H. et Itoh T., « Analysis of Frequency Response Characteristics of Polymer Ultrasonic Transducers », Japanese Journal of Applied Physics, Vol 27, pp.354-360. 1988.

Pernick B.J., « Aircraft ice detecting system », US patent N° 5921501, Mai 1995.

Persson H.W. et Hertz C.H., « Acoustic impedance matching of medical ultrasound transducers », Ultrasonics, Mars 1985.

Polhman J.C. et Landers A., « Present state of the-art of transmission line icing », IEEE Trans. Power Apparatus Syst. Vol. PAS-*101, N°8, pp. 2443-2450, Aout 1982.

Ristic V., « Principles of Acoustic Devices ». John Wiley&Sons, New York 1983.

Rizet N., « Contrôle actif de vibration utilisant des matériaux piézo-électriques ». Thèse présentée devant l'institut national des sciences appliquées de LYON. 1999.

Roy S.A., Izad, DeAnna R.G et Mehregany M., « Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers », Sensors and Actuators A69. pp 243-250, 1998.

Sabri Y., Farzaneh M. et Zhnag J., « Arc characteristics of polluted insulators covered with ice », 2006 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City, Missouri USA, **2006**.

Sato T. et Koyama K., « Short pulse response of ultrasonic transducer mode of piezoelectric copolymer films of vinylidene Fluoride-Trifluoroethylene », Japonese Journal of Applied Physics, Vol 26, pp 100-102, **1987**.

Schugt M.A., « Acoustic channel contaminant detection on a surface », US patent N° 5922958, Mai **1996**.

Sherrit S., Wiederick H.D. et Mukherjee B.K., « An Accurate Equivalent Circuit For the unloaded Piezoelectric Vibrator in the thickness mode », Physics department, Journal Physics, Vol 30, pp, 2354-2363, **1997**.

Sherrit S., Wiederick H.D. et Mukherjee B.K., « Accurate Equivalent Circuits For unloaded Piezoelectric Resonators », Physics department, Royal Military College of Canada, Kington, On, Canada, K7K5L0.

Shuya L., « Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers », Ultrasonics, Vol 43, pp 5-373, **2005**.

Syrota A., « Bases physiques de l'imagerie ultrasonore », N° Paris Onze édition H37, **1994**.

Volat C et Farzaneh M., « De-icing/Anti-icing Techniques for Power Lines Current Methods and Future Direction », presented at the 11th Int. Workshop on Atmospheric Icing of structure, Montreal, Canada, Juin **2005**.

Wada Y. et Hayakawa R., « Piezoelectric and pyroelectricity of polymers ». Journal Applied Physics, Vol 15. N°11. pp 2041, **1976**.

Wada Y. et Hayakawa R., « A model theory of piezo and pyroelectricity of PVDF electret . Ferroelectrics », Vol 32, pp 115, **1981**.

Watkins R.D., Gillespie A.B. et Deighton M.O., « Ice detector », US patent N° 4604612, Juillet **1983**.

Weinstein L.M., « Ice detector », US patent N° 4766369, Mai **1987**.

Yagi T. et Tatemoto M., « A fluorine-19 NMR study of the microstructure of vinylidene fluoride trifluoethylene copolymers », Polymer Journal, vol 11, N°6, pp 429, **1978**.

Zhao B. et Basir O.A., « Estimation of ultrasound attenuation and dispersion using short time Fourier transform », Journal of Ultrasonics, Aôut 2004.

Zuckerman L., « Environmental matter detection system », US patent. N°4891628, Decembre 1988.

ANNEXE

DONNÉES TECHNIQUES DES COMPOSANTS DU CIRCUIT D'ÉMISSION ET DE RÉCEPTION DE L'IMPULSION

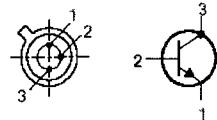
Étage monostable

Résistances	R1 R2	2 KΩ 100 KΩ
Capacités	C1 C2	10 nF 30 nF
Circuit intégré	NE 555 (Fairchild)	

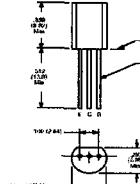
Étage astable

Résistances	R	5 KΩ
Capacité	C3	70 pF
Circuit intégré	74123 (Motorola)	

Étage transistor en commutation

Résistances	R3 R4	1 KΩ 1 KΩ
Transistors	2N2222 (Philips)	

Étage circuit génération d'impulsion négative

Résistances	R5 R6 R7 R_L	1 KΩ 30 KΩ 300 Ω 8 Ω
Capacité	C	1,5 nF
Bobine	L	8 mH
Diode	(8)D1	1N4004
Transistor	NTE 399 (NTE Electronics)	

Étage limiteur de tension

Résistances	R8 R9	1 KΩ 1 KΩ
Diodes	(2)D2	MUR820
Diodes Zener	(2)Dz	1N4733

Étage amplificateur haute fréquence

Résistances	R10 R11 R12	100 Ω 2.5 K Ω 3 K Ω
Capacités	C5 C4	100nF 100nF
Circuit intégré	LT1206	