



Titre: Développement d'un système actif pour la mesure de la permittivité
Title: complexe des matériaux

Auteur: Mohamed Taher Grati
Author:

Date: 2017

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Grati, M. T. (2017). Développement d'un système actif pour la mesure de la
Citation: permittivité complexe des matériaux [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/2898/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/2898/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Cevdet Akyel, & Tarek Djerafi
Advisors:

Programme: génie électrique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME ACTIF POUR LA MESURE DE LA
PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES MATÉRIAUX

MOHAMED TAHER GRATI
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME ACTIF POUR LA MESURE DE LA
PERMITTIVITÉ COMPLEXE DES MATÉRIAUX

présenté par : GRATI Mohamed Taher

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LAURIN Jean-Jacques, Ph. D., président

M. AKYEL Cevdet, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. DJERRAFI Tarek, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. NERGUIZIAN Chahé, Ph. D., membre

DÉDICACE

À ma famille !

REMERCIEMENTS

Je commence par remercier infiniment mon directeur des recherches M. Cevdet Akyel qui a accepté de diriger mon projet et qui m'a aidé beaucoup pour parvenir à ces résultats : les mots sont insuffisants pour reconnaître ses conseils précieux !

Je remercie aussi mon co-directeur M. Tarek Djerrafi qui m'a éclairé beaucoup de points dans mon projet et sa contribution était très significative.

Un grand remerciement au cadre technique du laboratoire Poly-Grames, notamment M. Jules Gauthier, M. Steve Dubé, M. Traian Antonescu, M. Jean Sébastien Décarie, Mme Rachel Lortie. Je tiens aussi à souligner le rôle de la mission universitaire des tunisiens en Amérique du nord à travers ses représentants ici : Mme Yosra Rimani, M. Hachmi Ben Daly.

Finalement, j'offre cette réussite à ma famille dont je me rappelle chaque jour, à tous mes amis et chaque personne qui m'a aidé de proche ou de loin !

RÉSUMÉ

La détermination de la permittivité complexe est une nécessité dans le domaine de la recherche scientifique à savoir la science des matériaux, les télécommunications, la conception des circuits microondes, la biologie... Plusieurs méthodes ont été développées pour la mesurer dans le domaine temporel ou fréquentiel en utilisant les techniques de transmission ou réflexion, les méthodes de l'espace libre et la résonance.

Le présent mémoire s'intéresse au développement d'un système actif pour la recherche de la permittivité complexe qui se base sur la résonance. L'oscillation prend place dans une cavité résonnante opérant à la fréquence de 2495 MHz faisant partie de la bande ISM (industriel, scientifique et médical). Le système entre en oscillation dès que l'on satisfait les deux conditions de Barkhausen relatives au gain et à la phase. Il est composé d'éléments passifs qui introduisent des pertes et des déphasages ainsi que des composants actifs qui compensent ces pertes.

La méthode choisie est le calcul du facteur de qualité pour la cavité vide puis lorsqu'elle est perturbée par l'introduction de l'échantillon ainsi que la fréquence de résonance pour chaque état. La détermination de ces deux facteurs est possible par l'application de deux algorithmes distincts se basant sur les deux courbes de la résonance : celle des amplitudes et celle des phases. On calcule les fréquences au niveau du sommet et au niveau de la moitié de la puissance pour obtenir le facteur de qualité absolu relatif à la cavité vide puis on se déplace sur la courbe de résonance en phase pour chercher la nouvelle fréquence de résonance obtenue après l'insertion d'un échantillon du matériau dont on souhaite mesurer la permittivité. On cherche aussi le facteur de qualité relatif de la cavité perturbée. Un déphaseur nous permet de faire le balayage de toute la bande et un modulateur sert à faire de petites variations constantes de phase.

On applique la théorie de perturbation pour étudier la déviation des paramètres de la cavité à savoir le facteur de qualité et la fréquence de résonance. Une fois ces paramètres trouvés, on applique des formules reliant ces facteurs aux deux composantes de la permittivité complexe et finalement on obtient cette quantité.

Le temps d'exécution total est inférieur à 30 secondes (il varie de 20 secondes à 30 secondes suivant le niveau des pertes du milieu en question). Ce système est capable de fonctionner avec n'importe quelle cavité ayant une fréquence de résonance située entre 2000 MHz et 2500 MHz. Il s'adapte automatiquement au niveau des pertes des matériaux testés en donnant plus de gain à la boucle d'opération et la seule sortie de notre système est la fréquence de résonance fournie par le fréquencemètre qui indique la présence d'une oscillation et collecte

les mesures si elle a lieu.

L'environnement de développement est "visual studio 2013" car c'est une plateforme de développement accessible et facile à utiliser sur les systèmes d'exploitation Windows. De plus, elle est compatible avec les équipements électroniques fonctionnant sous l'environnement .Net. Les résultats de mesures sont stockés dans des bases de données avec "MYSQL" car elle nous donne un accès instantané aux valeurs. La communication avec les composants électroniques est régie par le standard de communication "IEEE 488" connu également sous le nom "GPIB" et les mesures ont été faites à la température ambiante.

Nous comparons nos résultats à des mesures qui ont été faites dans des conditions similaires ou proches car les paramètres de la cavité varient avec plusieurs facteurs à savoir la température, la fréquence, la pression...

ABSTRACT

The determination of complex permittivity is crucial in many fields in scientific research such as materials science, telecommunications, microwave circuits design, biology... A lot of techniques have been implemented to calculate it in the time domain or the frequency domain. They are based on transmission or reflection, free space methods or resonance.

The current work is the development of an active system to calculate permittivity based on resonance technique. The oscillation occurs inside a resonant cavity operating at the level of 2495MHz part of the ISM band. The system starts oscillation as soon as both Barkhausen conditions are satisfied (gain and phase). This system is composed of passive components bringing losses and phase changes to the loop as well as active components to compensate those losses.

The chosen method consists of calculating quality factor for an empty cavity then after loading it as well as the resonance frequency corresponding to each state. The determination of those factors is made possible thanks to both algorithms based on resonance curves: magnitudes and phases. We measure frequencies at the level of the peak then the level of half power in order to get absolute quality factor related to the empty cavity then we move through phase curve so that we could obtain the new frequency after perturbing the cavity. A phase shift is used to sweep the whole bandwidth and a modulator is used to add or subtract the same quantity of degrees in the phase.

We apply perturbation theory in order to study cavity parameters shifting. Once this variation found, some expressions enable us to find out both parts of complex permittivity.

The whole process doesn't take more than 30 seconds (indeed, it is comprised between 20 and 30 seconds depending on medium losses). The developed system is able to work with any cavity having resonance frequency situated between 2000MHz and 2500 MHz. It is adapted automatically to medium losses by giving extra gain to the loop and the only output of our system is frequency reading.

The application has been programmed using "visual studio 2013" as it is a compatible environment with Windows OS and easy to get with. More over, used electronic devices work with .Net platform. Results are stored using data bases with "MYSQL" because it gives us instant access to data. Communication between devices is governed by IEEE 488 standard known also as GPIB and measurements are done in room temperature.

We compare obtained results with some references either with vector network analyzer or in the literature.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
LISTE DES ANNEXES	xiv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 PRÉSENTATION DU PROBLÈME	1
1.2 DIFFÉRENTES MÉTHODES DE LA MESURE DE LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE	2
1.2.1 SONDE COAXIALE	2
1.2.2 LIGNE DE TRANSMISSION	3
1.2.3 MÉTHODES DE L'ESPACE LIBRE	4
1.2.4 RÉSONANCE	4
1.3 LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE	5
1.4 CHOIX DE LA CAVITÉ	5
1.4.1 DÉFINITIONS	5
1.4.2 RAISONS DE NOTRE CHOIX	6
1.5 PLAN DU MÉMOIRE	6
CHAPITRE 2 NOTIONS THÉORIQUES	8
2.1 INTRODUCTION	8
2.2 SYSTÈMES OSCILLANTS	8
2.2.1 DÉFINITIONS	8

2.2.2	CONDITIONS D'OSCILLATION	8
2.2.3	MODES DE PROPAGATION DANS LA LITTÉRATURE	9
2.3	THÉORIE DE LA PERTURBATION	9
2.4	MATRICE DE RÉPARTITION D'UNE CAVITÉ RÉSONANTE	10
2.5	CONCLUSION	11
CHAPITRE 3	PRÉSENTATION DU SYSTÈME	12
3.1	INTRODUCTION	12
3.2	EXPLICATION DU FONCTIONNEMENT	12
3.2.1	COMPOSANTS UTILISÉS	13
3.2.2	ALGORITHMES DÉVELOPPÉS	18
3.3	CONCLUSION	25
CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	26
4.1	INTRODUCTION	26
4.2	INTERFACE GRAPHIQUE	26
4.2.1	APPLICATION PRINCIPALE	26
4.2.2	MODULE DE RECHERCHE DE LA PERMITTIVITÉ	27
4.3	RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSIONS	27
4.3.1	RÉSULTATS AVEC LE VNA	27
4.3.2	DISCUSSIONS	33
4.4	CONCLUSION	35
CHAPITRE 5	CONCLUSION	36
5.1	SYNTHÈSE DES TRAVAUX	36
5.2	LIMITATIONS DE LA SOLUTION PROPOSÉE	36
5.3	AMÉLIORATIONS FUTURES	37
RÉFÉRENCES		38
ANNEXES		41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Résultats trouvés avec le vna.	33
Tableau 4.2	Résultats expérimentaux avec le système actif.	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Sonde diélectrique : n1501a de agilent technologies.	2
Figure 1.2	Ligne de transmission.	3
Figure 1.3	Distribution du champ du mode TM_{010}	6
Figure 2.1	Courbe des amplitudes de s_{21} en fonction des fréquences.	11
Figure 3.1	Courbes de résonance en amplitudes et en phases	13
Figure 3.2	Schéma du système.	14
Figure 3.3	Gain du premier amplificateur.	15
Figure 3.4	Atténuation très grande.	16
Figure 3.5	Atténuation acceptable.	17
Figure 3.6	Paramètres s de la cavité sur le vna.	18
Figure 3.7	Étape initiale de l'algorithme.	19
Figure 3.8	Étape intermédiaire de l'algorithme.	19
Figure 3.9	Obtention du sommet.	20
Figure 3.10	Niveau -3db de la courbe.	21
Figure 3.11	Déplacement sur la zone d'intersection.	21
Figure 3.12	Segment d'intersection.	23
Figure 3.13	Agrandissement du segment d'intersection.	23
Figure 4.1	Courbe du méthanol.	28
Figure 4.2	Courbe du plexiglas.	28
Figure 4.3	Courbe de l'eau pure.	29
Figure 4.4	Courbe du pyrex.	29
Figure 4.5	Courbe du téflon.	29
Figure 4.6	Courbe de l'acétone.	30
Figure 4.7	Courbe du verre.	30
Figure 4.8	Courbe du caoutchouc.	30
Figure 4.9	Courbe du carton.	31
Figure 4.10	Courbe du duroid 6002.	31
Figure 4.11	Courbe du duroid 6006.	31
Figure 4.12	Courbe du duroid 6010.	32
Figure 4.13	Courbe du 1-butanol.	32
Figure 4.14	Courbe du 2-propanol.	32
Figure A.1	Atténuation du déphaseur en fonction du déphasage	43
Figure A.2	Atténuation obtenue en fonction de la valeur assignée	43

Figure C.1	Courbe du téflon.	77
Figure D.1	Étape d'identification.	78
Figure D.2	Fenêtre principale.	78
Figure D.3	Sous menu du fichier.	79
Figure D.4	Détails de l'application.	79
Figure D.5	Module de la recherche de la permittivité.	80
Figure D.6	Fenêtre d'initialisation.	80
Figure D.7	Recherche du sommet.	81
Figure D.8	Détermination des points limites à -3db	81
Figure D.9	Insertion du nom de l'échantillon.	82
Figure D.10	Insertion du volume de l'échantillon.	82

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

E_z	COMPOSANTE DU CHAMP ÉLECTRIQUE SUIVANT L'AXE Z
H_ϕ	COMPOSANTE DU CHAMP MAGNÉTIQUE SUIVANT L'ANGLE ϕ
J_m	FONCTIONS DE BESSEL DU PREMIER ORDRE
J'_m	DÉRIVÉES DES FONCTIONS DE BESSEL DU PREMIER ORDRE
k_{mn}	NOMBRE D'ONDE TRANSVERSALE
x_{mn}	RACINES DES FONCTIONS DE BESSEL
$G(i)$	GAIN (>1 POUR LES COMPOSANTS ACTIFS ET <1 POUR LES COMPOSANTS PASSIFS)
$\phi(i)$	PHASE RESPECTIVE DE CHAQUE ÉLÉMENT DANS LA BOUCLE
ϵ'	CONSTANTE DIÉLECTRIQUE
ϵ''	FACTEUR DE PERTES
δ	PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION
Z_m	IMPÉDANCE INTRINSÈQUE DU MÉTAL CONSTITUANT LES PAROIS
$[S]$	MATRICE DE RÉPARTITION
C	CONTOUR FERMÉ QUI DÉLIMITE LA SURFACE GLOBALE DES PAROIS DE LA CAVITÉ
A	SURFACE GLOBALE DES PAROIS DE NOTRE CAVITÉ
ω_0 ou f_0	FRÉQUENCE DE RÉSONANCE AVANT LA PERTURBATION
ω_r ou f_r	FRÉQUENCE DE RÉSONANCE APRÈS LA PERTURBATION
f_2 et f_1	LES DEUX FRÉQUENCES LIMITES À -3db
GPIB	GENERAL PURPOSE INTERFACE BUS
Q_l	FACTEUR DE QUALITÉ DE LA CAVITÉ VIDE
Q_r	FACTEUR DE QUALITÉ DE LA CAVITÉ PERTURBÉE
V_c	LE VOLUME DE LA CAVITÉ
V_s	LE VOLUME DE L'ÉCHANTILLON

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	CODES MATLAB	41
Annexe B	CODES VB.NET	44
Annexe C	CALCUL DES PARAMÈTRES DE LA CAVITÉ À PARTIR DE LA COURBE DE RÉSONANCE	77
Annexe D	APPLICATION DÉVELOPPÉE	78

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 PRÉSENTATION DU PROBLÈME

La mesure de la permittivité complexe est un sujet qui a sollicité plusieurs chercheurs.

L'étude de l'interaction entre les champs électromagnétiques et divers matériaux, en particulier les tissus biologiques nécessite une connaissance des propriétés diélectriques de ces milieux. De plus, les substances biologiques sont hétérogènes, d'où l'importance de connaître la constante diélectrique de chaque partie, (1).

(2) a traité la diélectrométrie hyperfréquence des liquides à perte élevée qui est l'étude de la rigidité électrique, donc la valeur maximale du champ électrique que le matériau peut supporter. Pour de tels liquides, le rapport entre les parties imaginaire et réelle de la permittivité complexe est de l'ordre de un ou plus. Les liquides à perte élevée sont des solutions aqueuses : l'eau avec des substances organiques et non organiques. L'eau est le liquide le plus étudié depuis longtemps. La raison de l'intérêt impressionnant pour l'eau est due à son omniprésence dans notre environnement. Habituellement, l'eau est utilisée comme liquide de référence pour la mesure différentielle des liquides contenant de l'eau à l'essai, par exemple les vins et les moûts.

Une autre application de la mesure de la permittivité complexe est la tomographie en capacité électrique (TCE). C'est une technologie qui reproduit la répartition de la permittivité diélectrique des matériaux à l'essai. La TCE a été utilisée comme outil de traitement en particulier pour la mesure de débit en deux phases. Ces applications se concentrent principalement sur les échantillons diélectriques, dont la conductivité est négligeable, (3).

(4) a développé un capteur dédié à la mesure du profil vertical de la permittivité complexe et la température de tout milieu dans lequel les électrodes de capteur sont insérées. Les applications potentielles sont l'estimation de l'humidité et de la salinité dans un milieu poreux, comme le sol. Il se compose de condensateurs empilés verticalement le long des deux conducteurs, des cylindres parallèles de 5 cm de diamètre et à une distance de 10 cm pour analyser un volume important de moyenne 1 L. Il mesure leurs admittances à partir d'un pont d'impédance équilibré fonctionnant à une fréquence comprise entre 1 et 20 MHz, éventuellement 30 MHz. Grâce à la précision de la conception et la modélisation basée sur la théorie des circuits électroniques, la détermination des admittances tient compte de toutes les distorsions dues aux effets électromagnétiques du pont à l'intérieur du capteur lorsqu'on travaille à haute fréquence.

De plus, la création de nouveaux matériaux possédant des caractéristiques physiques modi-

fiables a sollicité la recherche poussée sur la science des matériaux. Citons les alliages nanocristallins comme exemple qui ont des performances excellentes à éliminer les interférences électromagnétiques mais ils n'existent pas encore dans des structures pour la fabrication des circuits intégrés.

Pour satisfaire les besoins d'une meilleure qualité de transmission, les constructeurs des circuits intégrés cherchent toujours à utiliser des matériaux avec de meilleures propriétés diélectriques, (5).

L'étude de la permittivité complexe nécessite une connaissance approfondie des concepts et théorèmes liés à ce sujet. Dans ce chapitre, nous allons aborder les principaux concepts mis en évidence dans notre développement. Le choix d'une technique dépend de plusieurs facteurs à savoir la fréquence d'intérêt, l'intervalle dans lequel se trouve la constante relative diélectrique, le taux d'erreur tolérable, les propriétés du matériau (homogène, isotrope...), sa forme, son état (solide, liquide, cylindrique, en poudre...), sa température...

1.2 DIFFÉRENTES MÉTHODES DE LA MESURE DE LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE

1.2.1 SONDE COAXIALE



Figure 1.1 Sonde diélectrique : n1501a de agilent technologies.

Cette méthode est utilisée pour caractériser la permittivité complexe des matériaux selon différentes fréquences. Elle requiert un contact direct avec le matériau en question, c'est pourquoi elle a besoin d'une surface minimale pour fonctionner correctement. Ce dispositif fonctionne de la manière suivante : il y a la propagation des ondes électromagnétiques qui facilitent l'influence des champs électromagnétiques sur l'ouverture de la sonde sur le

matériau. Le coefficient de réflexion peut être relié à la permittivité complexe en utilisant l'analyse modale des champs dans la ligne de transmission, ou en analysant les champs du matériau diélectrique. Elle a l'avantage d'être non destructive et elle est valable pour une grande bande de fréquences, (6). Selon (7), en dépassant quelques centaines de mégahertz, il faut changer le modèle car l'approximation d'une ligne de transmission idéale doit être changée en considérant la sonde un réseau de deux ports. Ainsi, une étape préliminaire de calibration est requise : ceci complique cette méthode.

1.2.2 LIGNE DE TRANSMISSION

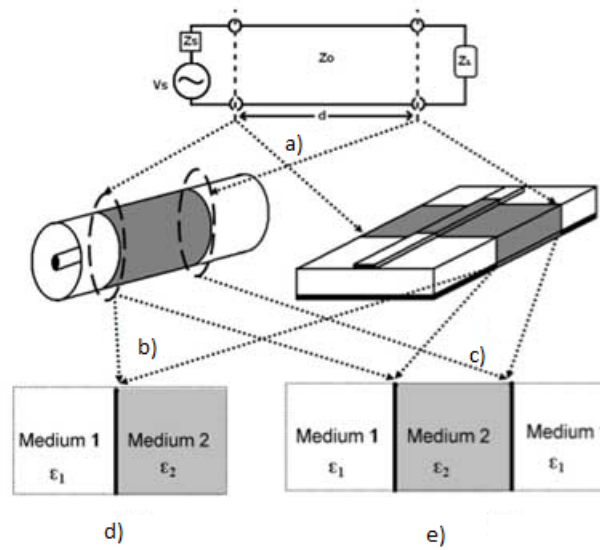


Figure 1.2 Ligne de transmission.

Dans la figure (1.2), (a) est une ligne de transmission basique, (b) est une ligne de transmission coaxiale, (c) est une ligne microruban, (d) est la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2 et finalement (e) est le bloc diélectrique équivalent. Cette méthode se base sur la théorie des lignes de transmission. Un échantillon du matériau est placé à l'intérieur de la ligne de transmission et une onde électromagnétique est envoyée vers cet échantillon. L'inconvénient de cette méthode est le fait de sa limitation dans la zone des hautes fréquences qui dépassent 10 GHz à cause des pertes qui augmentent avec la fréquence, (8). De plus, cette méthode nécessite un grand échantillon pour les fréquences basses.

1.2.3 MÉTHODES DE L'ESPACE LIBRE

La méthode de l'espace libre est utilisée pour les applications à très hautes fréquences. Cette méthode permet de chercher les propriétés des matériaux dans un espace ouvert. On fait recours à des miroirs pour diriger le faisceau vers un échantillon du matériau. Les mesures peuvent être réalisées dans des diverses conditions de fonctionnement comme des températures élevées. L'échantillon doit être large et plat ce qui n'est pas le cas parfois. Un autre inconvénient de cette méthode est le fait d'être sensible aux réflexions entre les antennes émettrices et l'échantillon, (9).

1.2.4 RÉSONANCE

Les techniques de la résonance sont très utilisées dans la détermination de la constante diélectrique et le facteur de pertes des matériaux des circuits imprimés opérant au niveau des fréquences des micro ondes. Les cavités résonantes sont utilisées pour recevoir le matériau et effectuer les mesures nécessaires. De plus, les mesures qui sont basées sur la variation des fréquences de résonance sont les plus précises en Physique.

Ces cavités sont définies par leur mode de propagation qui peut être de la forme TM_{0n0} ou TE_{01n} . Le premier indice est "0" pour travailler avec des modes de résonance à plus basses fréquences (pour éviter des résonances trop proches les unes des autres. Les deux paramètres principaux sont le facteur de qualité une mesure sans unité du taux d'amortissement d'un oscillateur et la fréquence de résonance est une fréquence caractéristique du système qui peut accumuler de l'énergie si celle-ci est appliquée d'une manière périodique.

(10) a développé une nouvelle méthode pour la détermination du facteur de qualité Q des cavités résonantes. La méthode consiste à déterminer la susceptance équivalente du circuit en dessinant un abaque de Smith qui contient les valeurs de VSWR et les positions minima de tension. Ensuite, on obtient facilement les facteurs Q car la courbe des susceptances versus les fréquences est une ligne droite. L'auteur suggère aussi que le cercle dessiné au début soit centré avec l'abaque de Smith en question. Cette méthode est compliquée et nécessite un balayeur de fréquences pour dessiner l'abaque de Smith voulu.

(11) a développé un système actif de mesure de cette propriété diélectrique en introduisant une nouvelle contribution qui consiste à chercher le facteur de qualité relatif. Ce paramètre est déterminé à partir de la courbe de résonance des phases : la courbe de résonance d'une cavité est simplement les valeurs en phase du système en fonction des fréquences. Son système traite le cas d'un échantillon cylindrique sous forme de tige. Il a fait recours au mode TM_{010} et la seule sortie du système est la lecture de la fréquence d'oscillation. Ainsi, c'est un système qui génère son propre signal d'oscillation. Néanmoins, ce système nécessite un changement de

calibration de la cavité suivant la nature de l'échantillon : les liquides avec pertes nécessitent une calibration plus faible en comparant avec d'autres matériaux. Donc, il faut une calibration du système pour des matériaux avec des pertes élevées en changeant le couplage de cette cavité. Ceci s'ajoute à la séparation du traitement statique du traitement dynamique pour la manipulation des résultats collectés ce qui engendre des délais d'exécution supplémentaires. (12) a proposé un dispositif électronique qui permet de calculer de façon automatique les valeurs des deux paramètres : la fréquence de résonance et le facteur de qualité. Le système développé devient imprécis pour de grandes valeurs de Q et ceci à cause des variations rapides de la fréquence du générateur. Le système se base sur la théorie de perturbation en évaluant la variation des deux paramètres de la cavité avant et après l'insertion de l'échantillon.

1.3 LA PERMITTIVITÉ COMPLEXE

La permittivité est une quantité utilisée pour décrire les propriétés diélectriques des ondes électromagnétiques et l'atténuation de l'énergie contenue dans ces ondes dans un milieu quelconque.

Dans le domaine fréquentiel, la permittivité complexe ϵ^* d'un milieu peut être exprimée de la manière suivante :

$$\epsilon^* = (\epsilon'_r - j\epsilon''_r)\epsilon_0 \quad (1.1)$$

Selon (13), la partie réelle ϵ'_r est appelée la constante diélectrique et elle représente l'énergie stockée quand le matériau est exposé à un champ électrique. Le facteur de pertes ϵ''_r qui représente la partie imaginaire, nous donne une idée sur l'absorption et l'atténuation de l'énergie. ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide.

1.4 CHOIX DE LA CAVITÉ

1.4.1 DÉFINITIONS

Une cavité électromagnétique est un volume vide ou rempli de diélectrique, limité par des parois du type électrique (interface avec un conducteur) ou du type magnétique (interface avec un diélectrique à haute permittivité). Dans le premier cas, il s'agit d'une cavité métallique et dans le second cas d'un résonateur diélectrique, (14).

Chaque solution pour les équations de Maxwell dans un guide d'ondes représente un mode de propagation. Cette propagation peut se faire selon 4 formes :

-TEM : $E_z = 0$ et $H_z = 0$

-TE : $E_z = 0$

-TM : $H_z = 0$

-hybride : les directions de E et H sont aléatoires, il est préférable d'avoir un seul mode qui s'installe dans la cavité ou le guide d'ondes car il y a possibilité de dispersion et perte d'information en présence d'autres modes, (15).

1.4.2 RAISONS DE NOTRE CHOIX

Les modes de propagation sont de la forme TM_{mnp} . Nous avons choisi de travailler avec le mode TM_{010} pour différentes raisons. Tout d'abord, les modes TM sont des modes monopoles possédant une composante longitudinale du champ électrique et ainsi, ils peuvent interagir avec le signal RF.

Par souci de symétrie qui nous aide pour l'introduction de l'échantillon, on choisit le centre de la cavité où le champ électrique est maximum avec une symétrie axiale.

Dans notre cas où on a un système actif qui est finalement une configuration d'oscillateur, il faut éviter les valeurs "n" trop élevées, car il y aura à ce moment des fréquences d'oscillation trop proches l'une de l'autre et le suivi du déplacement de la fréquence en question serait difficile à accomplir.

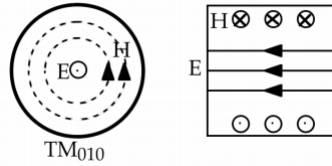


Figure 1.3 Distribution du champ du mode TM_{010} .

Pour les modes supérieurs ($m > 1$), les champs proches du signal deviennent de plus en plus faibles puisque l'énergie emmagasinée est concentrée au niveau du bord extérieur de la cavité, (16).

De plus, la distribution du champ du mode TM_{010} est caractérisée par une symétrie de révolution ce qui rend le couplage de la cavité sous plusieurs angles plus flexible, (17).

1.5 PLAN DU MÉMOIRE

Nous avons commencé par l'introduction de notre sujet en le plaçant dans son cadre de recherche : nous avons cité les anciens travaux et les différentes techniques existantes pour

pouvoir choisir notre méthode de travail que nous jugeons être la meilleure et la plus efficace pour arriver au résultat voulu qui est la recherche de la permittivité complexe d'un matériau outre les métaux et les matériaux magnétiques.

Après d'avoir fixé une méthode bien déterminée, nous étudions les concepts et les notions qui s'y rapportent dans le deuxième chapitre. Étant donné que nous allons développer un système résonant, nous abordons le sujet d'oscillation et les conditions requises pour l'avoir. Ensuite, nous touchons au cœur de notre sujet qui est la permittivité complexe en expliquant notre méthode appliquée qui est la théorie de perturbation et notre outil de vérification qui est la matrice S extraite de l'analyseur de réseaux vectoriel.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le système en utilisant la technique citée auparavant. En fait, la présentation porte sur les deux axes : matériel en citant les composants utilisés et la fonctionnalité de chacun dans notre sujet et logiciel en détaillant les algorithmes mis en œuvre pour la recherche des facteurs de qualité avant et après la perturbation ce qui nous permettra de déterminer la permittivité complexe.

Après avoir développé notre système et l'avoir testé sur des matériaux, nous montrons les résultats obtenus sur le plan logiciel ainsi que matériel dans le quatrième chapitre. En fait, nous affichons les composantes de l'interface graphique de notre système pour mettre en valeur l'apport réalisé dans le calcul de la permittivité. De plus, une comparaison avec les résultats obtenus dans la littérature aura lieu avec nos résultats expérimentaux pour valider l'efficacité de notre méthode.

Finalement, nous clôturons ce mémoire par une synthèse des travaux dans laquelle nous citons les résultats obtenus dans notre projet. Nous mentionnons aussi les limitations de notre système et nous finissons notre étude par quelques propositions qu'on peut utiliser à l'avenir pour améliorer notre système.

CHAPITRE 2 NOTIONS THÉORIQUES

2.1 INTRODUCTION

Dans le présent chapitre, nous allons expliquer le phénomène d'oscillation, la théorie de perturbation avec laquelle nous avons calculé la permittivité complexe et enfin, nous allons expliquer la matrice de répartition qui contient les paramètres "S" utiles dans l'étude de tout quadripôle et représentant un outil important pour déterminer ses paramètres caractéristiques comme la fréquence de résonance, etc.

2.2 SYSTÈMES OSCILLANTS

2.2.1 DÉFINITIONS

"Un oscillateur sinusoïdal est un système autonome qui, à partir d'une source de tension continue, délivre un signal sinusoïdal aussi pur que possible (c'est-à-dire sans harmonique), de fréquence et amplitude fixes (ou ajustables par l'utilisateur)," (18). Le système mis en œuvre est un système actif. Un système actif est un système dans lequel l'élément à mesurer est placé dans un oscillateur micro-ondes et ainsi, la puissance du signal sortant de cet oscillateur avec la fréquence nous fournissent des informations sur les propriétés diélectriques du matériau en question, (19). On l'appelle un système actif car il est composé par des composants actifs tel que les amplificateurs. Les systèmes actifs ont des avantages par rapport aux systèmes passifs. En effet, selon le même auteur, ces systèmes possèdent des performances supérieures au niveau de l'efficacité, temps de réponse, la plage dynamique qui signifie le rapport du maximum de puissance tolérée sur le minimum, la réduction des erreurs de mesure...

2.2.2 CONDITIONS D'OSCILLATION

Pour que le système entre en oscillation, il faut satisfaire les deux conditions de Barkhausen, (11) :

$$\prod_{i=1}^n G(i) \geq 1 \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^n \phi(i) = 2\pi p \quad (2.2)$$

avec :

l'indice i représente chaque élément dans la boucle de ce système.

p est un entier positif

n est le nombre de composants qui constituent le système

$G(i)$ représente le gain.

$\phi(i)$ représente la phase.

En d'autres termes, à la fréquence de résonance, les composants actifs compensent les pertes du quadripôle et leurs déphasages compensent celui de cet élément, (19).

2.2.3 MODES DE PROPAGATION DANS LA LITTÉRATURE

Selon l'équation d'onde :

$$\nabla^2 \vec{E} - 1/c^2 \partial^2 / \partial t^2 \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - 1/c^2 \partial^2 / \partial t^2 \vec{H} = 0$$

Pour une géométrie bien déterminée, le nombre de solutions de ces équations ayant une dépendance au temps est infini.

Pour les modes TM_{mnz} , les champs sont donnés par les expressions suivantes, (16) :

$$E_z(r, z, t, \phi) = E_0 J_m(k_{mn} r) e^{j\omega t \cos(m\phi) \cos(k_z z)} \quad (2.3)$$

$$H_\phi(r, z, t, \phi) = H_0 J'_m(k_{mn} r) e^{j\omega t \cos(m\phi) \cos(k_z z)} \quad (2.4)$$

tels que E_z et H_ϕ sont respectivement la composante du champ électrique suivant l'axe z et la composante du champ magnétique suivant l'angle ϕ .

J_m sont les fonctions de Bessel de première espèce

J'_m sont les dérivées des fonctions de Bessel de première espèce

$k_{mn} = x_{mn}/r_0$ est le nombre d'onde transversale

r_0 est le rayon de la cavité

x_{mn} sont les racines des fonctions de Bessel

Les modes monopoles sont ceux qui n'ont pas de variation azimutale (l'angle dans le plan horizontal entre la direction de l'objet et une direction de référence), (16).

2.3 THÉORIE DE LA PERTURBATION

La théorie de perturbation est l'étude de la réponse de la cavité résonante suite à l'insertion d'un échantillon dans cette cavité. Elle est définie comme étant la déviation d'une solution

exacte qui est dans notre cas, l'état de la cavité vide.

La perturbation peut être soit juste sur la surface ou même sur tout le volume. L'auteur (20) a développé une expression qui permet de calculer l'effet des pertes sur les parois conductrices d'une cavité. En fait, il existe des pertes dans les conducteurs qui sont faibles et on peut les déterminer en utilisant l'expression énoncée ci-dessous qui calcule les courants surfaciques. On suppose que le champ magnétique tangentiel reste inchangé tout au long de la paroi et on suppose aussi que les champs E et H sont faiblement perturbés par rapport aux E_0 et H_0 les champs de l'état vide. Il a trouvé la formule suivante :

$$\gamma + \gamma_0^* = \frac{Z_m \oint_C |H_0|^2 dl}{4P_0} \quad (2.5)$$

$\gamma = \frac{(1+j)}{\delta}$ tel que δ est la profondeur de pénétration.

H_0 est le champ magnétique avant la perturbation.

Z_m est l'impédance intrinsèque du métal constituant les parois.

C est un contour fermé qui délimite la surface globale des parois de la cavité.

$$P_0 = \int_A (1/2) \text{Re}(E_0 H_0^*) da \quad (2.6)$$

E_0 est le champ électrique avant l'insertion de l'échantillon

A est la surface globale des parois de notre cavité.

2.4 MATRICE DE RÉPARTITION D'UNE CAVITÉ RÉSONANTE

"La matrice $[S]$, matrice de répartition (scattering matrix), est l'outil de base pour l'étude des quadripôles ou des multipôles linéaires en hyperfréquence. Les paramètres S ont un lien direct entre les transferts de puissance, entrée et sortie d'un quadripôle et la puissance est la chose la plus facile à mesurer en hyperfréquence" (21).

La détermination des paramètres " S " est très utile pour faciliter l'étude des cavités, (avec les autres quadripôles) : les pertes et les paramètres de la cavité peuvent être déduits à partir de la courbe de résonance suivant les fréquences. En effet, le facteur de qualité Q et la fréquence de résonance peuvent être trouvés grâce à cette réponse. Cependant, la détermination des paramètres " S " nécessite des appareils sophistiqués comme l'analyseur de réseaux vectoriel. Selon (22), l'analyseur de réseau vectoriel VNA est une forme d'analyseur de réseau RF largement utilisé pour les applications de conception RF. Un analyseur de réseau vectoriel est un système de test qui permet de caractériser les performances des appareils hyperfréquences

en termes de paramètres de diffusion du réseau ou de paramètres S.

Les paramètres de la cavité résonnante à savoir le facteur de qualité et la fréquence de résonance peuvent être retrouvés avec les courbes disponibles sur le VNA :

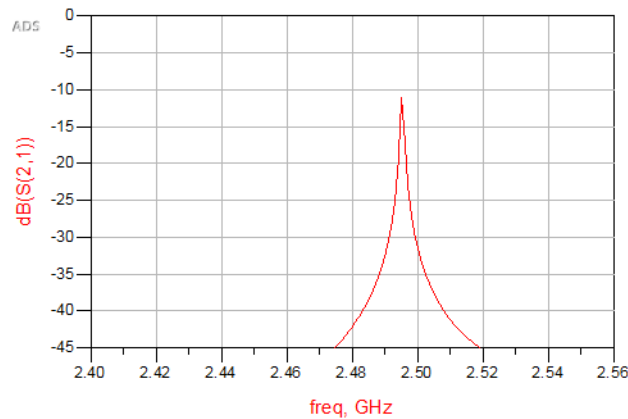


Figure 2.1 Courbe des amplitudes de s_{21} en fonction des fréquences.

La fréquence de résonance est celle qui correspond au maximum de l'amplitude du paramètre S_{21} . Le facteur de qualité nécessite un traitement supplémentaire qu'on va détailler par la suite.

2.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les théories et les concepts qui se rapportent à la thématique des cavités résonnantes. D'une part, nous avons touché aux systèmes actifs sujet de notre développement. D'autre part, nous avons vu le VNA qui représente une alternative pour la détermination des paramètres de la cavité avec la matrice "S".

L'avantage principal d'un système actif est de ne pas utiliser le VNA qui contient un balayeur de fréquence pour sortir la courbe de résonance de la cavité. Le signal généré provient de la cavité et des amplificateurs qui l'accompagnent. Ainsi, on élimine dès le départ le VNA qui est un système de mesures assez cher !

CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DU SYSTÈME

3.1 INTRODUCTION

La résonance est un phénomène physique obtenu lorsqu'on s'approche de la fréquence caractéristique d'un système. Dans notre cas, la fréquence caractéristique est celle de la cavité résonante. Au niveau de la résonance, les amplitudes du signal hyperfréquence augmentent jusqu'à obtenir un pic au niveau de la fréquence caractéristique. Nous avons utilisé ce concept pour développer notre système. Dans cette section, nous allons montrer les courbes réelles du signal qu'on peut visualiser sur le VNA mais avec notre approche, on utilise uniquement un fréquencesmètre qui détecte les niveaux souhaités sur la courbe de résonance en appliquant un algorithme de recherche sur la courbe de phase. En d'autres termes, si le fréquencesmètre affiche une valeur non nulle cela veut dire que nous coupons la courbe des amplitudes sinon, nous sommes au dessus de la courbe.

3.2 EXPLICATION DU FONCTIONNEMENT

Le système actif développé aux microondes a une particularité qui le diffère de ses semblables (oscillateurs courants) aux basses fréquences. Dans les oscillateurs RF, la présence d'un cristal est suffisante pour déterminer la fréquence d'oscillation. Une fois le critère de Barkhausen est satisfait (phase totale du système est un multiple de 2π), le système fournit immédiatement le signal à la fréquence d'oscillation du cristal sans autre ajustement. Tandis qu'avec une cavité dont la fréquence de résonance se situe aux GHz, il y a apparition d'une fréquence d'oscillation dans une petite bande qui correspond au sommet de la courbe des amplitudes.

On se trouve au voisinage et alors, il faut se servir d'un modulateur de phase à 3 niveaux pour générer des fréquences d'oscillation selon la courbe des phases et avec un algorithme approprié, on choisit la différence des fréquences minimum pour décider l'endroit où le balayage de phase doit s'arrêter.

On considère alors qu'on a atteint la vraie fréquence de résonance du résonateur parmi tant de fréquences d'oscillation du système. Dans le langage mathématique, on vient de prendre la dérivée de la courbe de phase et on s'arrête là où la pente est maximum.

Les figures affichées ne sont pas visibles dans un système actif. Elles sont décrites à titre indicatif pour illustrer le vrai fonctionnement de la recherche de la fréquence de résonance.

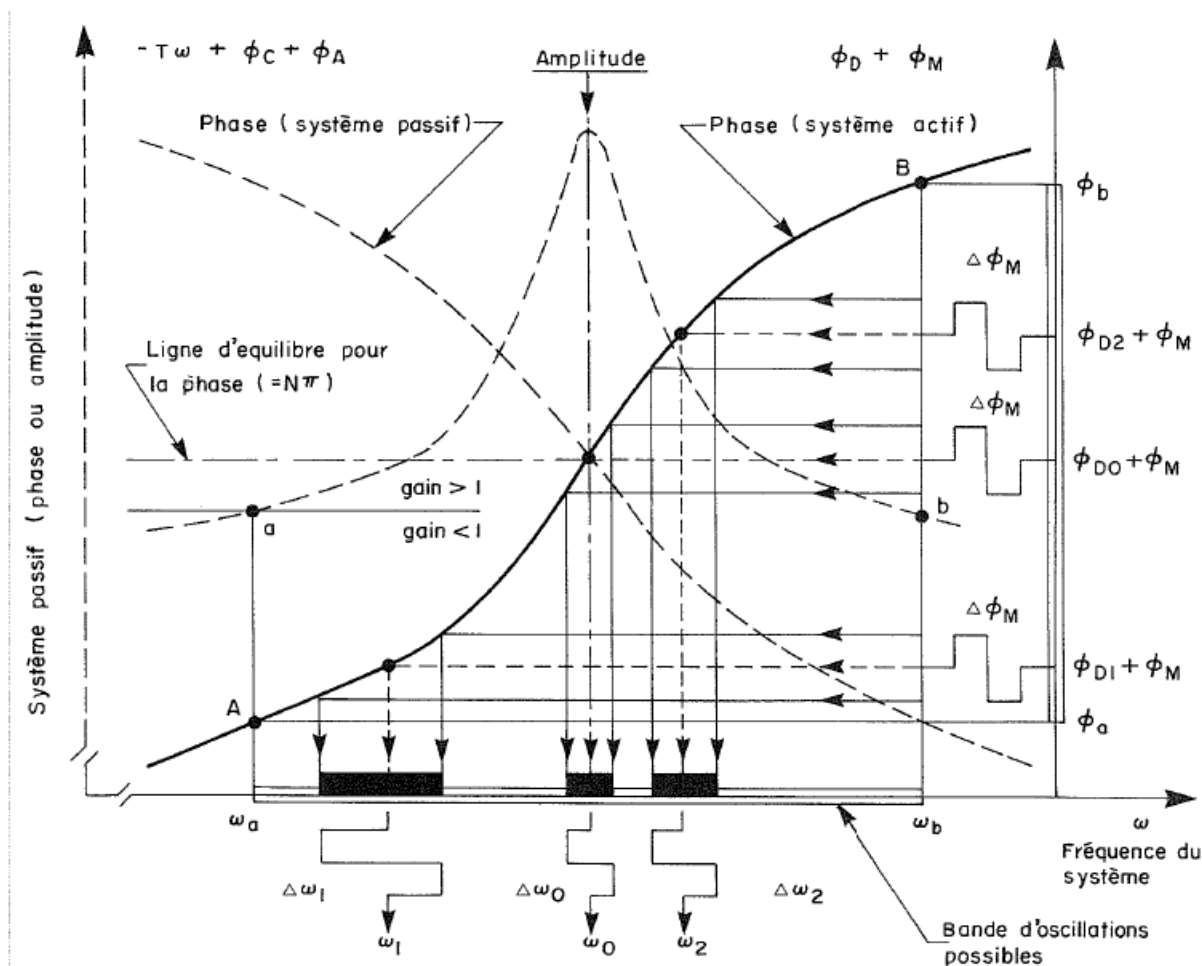


Figure 3.1 Courbes de résonance en amplitudes et en phases

3.2.1 COMPOSANTS UTILISÉS

Nous avons développé le système suivant :

Un signal rf circule entre les différents composants. L'origine de ce signal est le bruit de fond des composants : en fait, il existe toujours un signal rf dans les composants utilisés qui est faible mais grâce aux amplificateurs, on obtient finalement un bon signal capable d'atteindre le seuil de détection du fréquencemètre.

Nous commençons par le déphaseur analogique. C'est un composant alimenté par une source de courant allant de 0V à 20V. La commande de ce déphaseur est faite en variant la tension communiquée. En fait, le déphaseur est capable de faire un tour complet sur la bande de fréquence (360 degrés) ce qui correspond à presque 18 degrés par volt. Son rôle principal

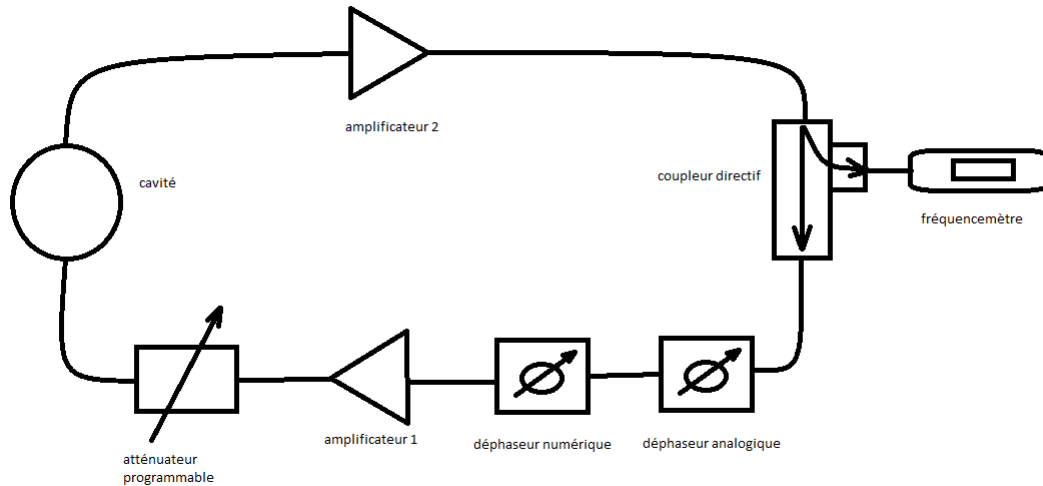


Figure 3.2 Schéma du système.

est de dévier le signal rf avec le degré souhaité. De cette façon, on peut balayer toute la bande des fréquences car n'importe quel déphasage nous renseigne sur une fréquence donnée. Nous expliquons davantage ce phénomène avec la figure (3.1) des courbes de résonance qu'on trouve dans (11).

Comme il est indiqué sur la courbe en trait discontinu, l'amplitude maximale est obtenue pour une fréquence ω_0 qui est la fréquence caractéristique de notre système : 2495 MHz. On fait recours au déphaseur analogique pour lire les autres fréquences comme par exemple ω_1 et ω_2 et ceci en changeant la phase du signal pour parcourir toute la bande passante.

Deux amplificateurs sont utilisés pour amplifier le signal atténué dans la boucle. On utilise deux amplificateurs pour protéger les composants de notre système. En fait, un amplificateur opère sur le signal atténué par la cavité et permet de compenser les pertes par défaut. Ensuite, l'autre amplifie davantage le signal pour pouvoir lire la fréquence d'oscillation. De plus, le premier amplificateur est alimenté par une alimentation de 5v et il permet d'obtenir un gain supérieur à 30db.

Il est possible de travailler avec un seul amplificateur avec une grande puissance permettant de compenser les pertes et obtenir l'oscillation mais dans ce cas, on risque d'endommager les composants électroniques tel que l'atténuateur ou le déphaseur. De plus, un seul amplificateur peut arriver à la saturation donc, nous utilisons deux amplificateurs pour avoir au moins le deuxième en régime linéaire.

Le deuxième amplificateur est alimenté avec une tension de 28v et permet d'obtenir un gain de 25db.

Un coupleur directif 10 db, c'est à dire, il prélève une quantité du signal RF pour la mesurer

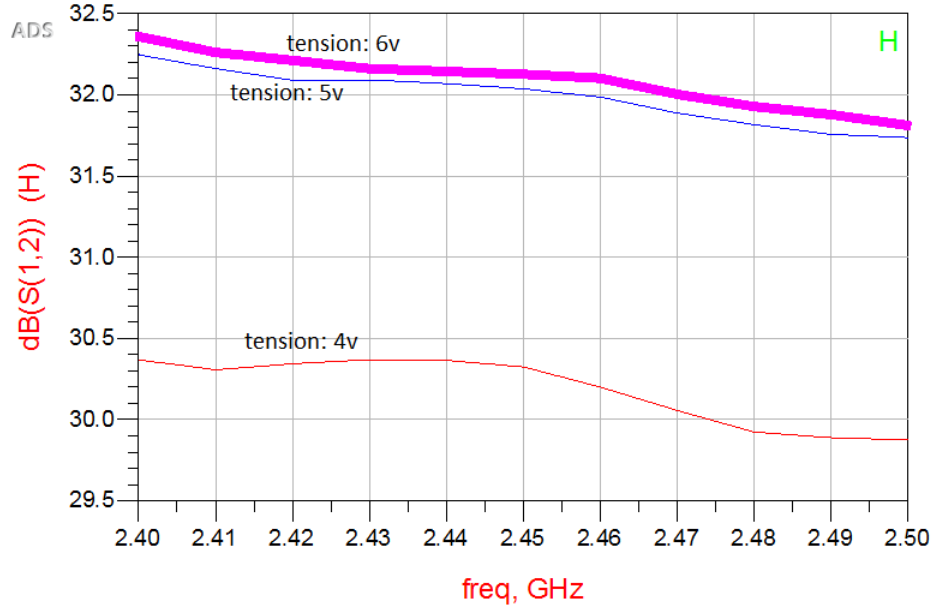


Figure 3.3 Gain du premier amplificateur.

avec le fréquencesmètre. La quantité prélevée peut être évaluée de la manière suivante :

$$X = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.1)$$

Dans notre cas, on a 10db donc le rapport entre les deux puissances est $P_1 = 10 * P_2$ car $10 = 10^{\frac{10}{10}}$.

Nous avons placé quelques atténuateurs fixes de 3db, 6db et 10db entre les composants électroniques pour les protéger d'une part. D'autre part, on a essayé de réduire les réflexions entre les composants car cette réflexion peut agir sur le seuil de décision du fréquencesmètre et ainsi, on risque d'obtenir des résultats faux. En effet, lorsqu'il existe une portion du signal réfléchi, elle s'ajoute au signal original et peut créer une deuxième fréquence ce qui nuit au fonctionnement du fréquencesmètre qui devient incapable de décider quelle fréquence choisir. On passe maintenant au déphaseur numérique : il joue le rôle d'un modulateur alimenté par un générateur. Nous avons construit le support du déphaseur au sein du laboratoire Polygrames de l'école Polytechnique à l'aide des techniciens. En effet, la conception de ce support a été faite en utilisant le simulateur ADS et on l'a fabriqué avec du duroid 6002.

En absence de courant, il laisse passer le signal rf sans le dévier mais lorsqu'il y a une tension,

il y a une déviation déduite à partir de la fiche technique du composant : pour une tension variant de 0V à 15V, il y a une déviation de 0 degré à 220 degrés presque.

Le déphaseur numérique est utilisé pour dévier le signal légèrement pour être capable de lire la variation de fréquence après ce changement. Ainsi, on change légèrement la tension appliquée pour retrouver $\Delta\omega$. Dans la figure précédente, par exemple les différences $\Delta\omega_0$, $\Delta\omega_1$ et $\Delta\omega_2$ peuvent être calculées en lisant les deux fréquences correspondantes aux différents déphasages pour chaque cas.

On utilise aussi un atténuateur programmable. Il possède une atténuation par défaut de 60db et un pas par défaut de 0.25db mais en développant notre produit, nous avons réussi à réduire ce pas jusqu'à 0.1db : c'est la limite de l'atténuateur. Ce composant est utilisé pour contrôler l'amplitude du signal qui va entrer dans la cavité résonante. Dans la figure précédente, la courbe en traits discontinus représente les valeurs des amplitudes en fonction des fréquences et en changeant l'atténuation du signal, on peut se déplacer verticalement sur la courbe : le seuil du fréquencemètre nécessaire pour prendre une décision représente une ligne droite horizontale qui coupe la courbe des amplitudes et engendre la seule zone où c'est possible d'avoir une oscillation : là-bas se trouve la fréquence de résonance de la cavité.

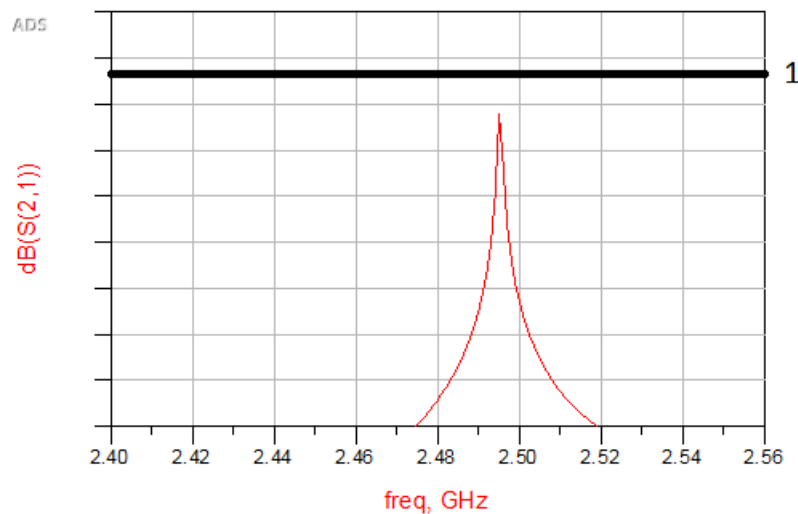


Figure 3.4 Atténuation très grande.

Le niveau 1 (3.4) correspond à un état où on a atténué beaucoup le signal rf donc le seuil de détection du fréquencemètre ne coupe pas la courbe de résonance en amplitude et ainsi, on obtient une valeur nulle sur notre fréquencemètre ce qui signifie absence de signal.

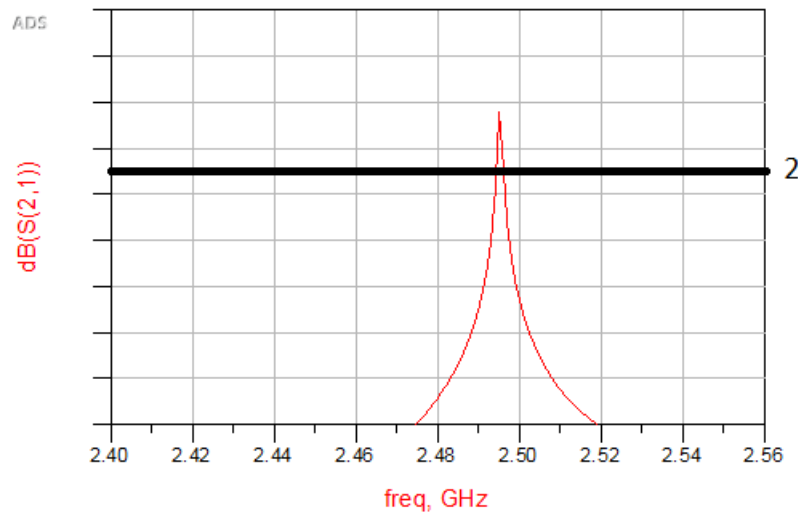


Figure 3.5 Atténuation acceptable.

Le niveau 2 (3.5) correspond à un état où l'atténuation est acceptable donc en utilisant le déphaseur, on peut lire les fréquences de la bande qui représente l'intersection entre la courbe des amplitudes et le seuil de détection représenté par la ligne 2.

Nous passons à la cavité : en fait, c'est le lieu de résonance. Le phénomène de la résonance existe lorsqu'on s'approche de la fréquence caractéristique de notre cavité qui est 2495 MHz.

La figure des paramètres S (3.6) montre clairement le fonctionnement de notre cavité. On s'intéresse au coefficient S_{21} . On trouve que le signal est filtré, donc toutes les fréquences sont rejetées à l'exception de celles qui entourent la fréquence caractéristique de la cavité qui est 2495 MHz. On explique ainsi la raison de l'existence d'une seule bande de fréquence celle autour de 2495 MHz.

Le signal rf subit une atténuation en passant par la cavité. Donc, on doit l'amplifier et ici vient le rôle du deuxième amplificateur. Le signal sortant de l'amplificateur 2 a une valeur importante qui risque d'endommager le fréquencemètre en absence d'un coupleur directif. Le coupleur directif permet de retrancher une quantité du signal rf qui va être mesurée par le fréquencemètre et le reste continue son chemin pour entrer une autre fois dans la boucle de notre système. Il est à noter que la partie prélevée du signal contient la même information dans le signal principal ce qui permet une décision exacte. De plus, nous avons utilisé des atténuateurs fixes entre les composants comme par exemple entre le déphaseur et

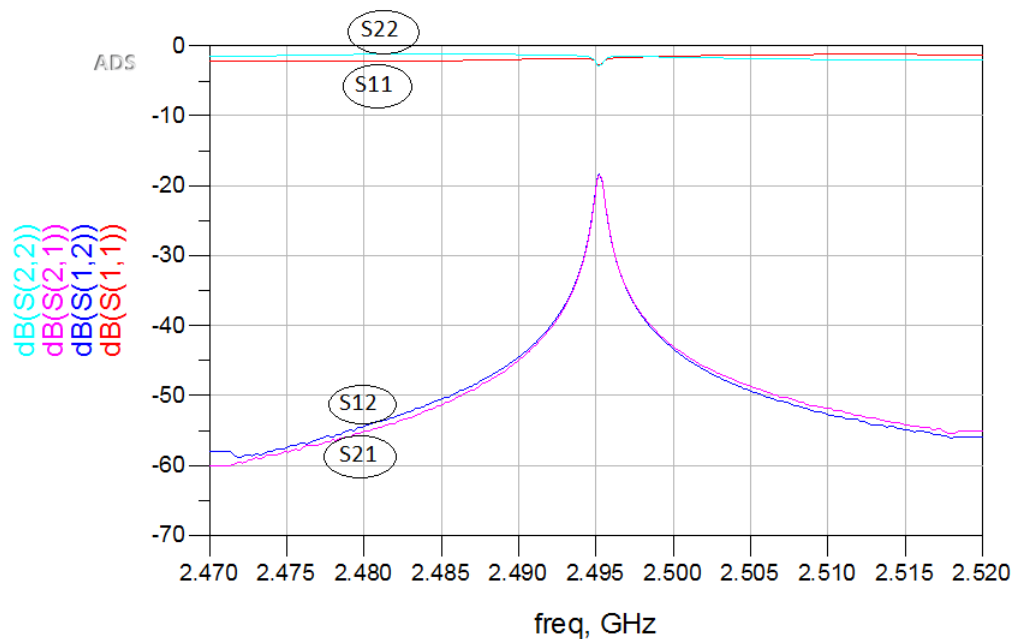


Figure 3.6 Paramètres s de la cavité sur le vna.

l'atténuateur pour éliminer toute réflexion du signal dans le sens inverse. Si on suppose que le signal revient aussi, alors au niveau du fréquencesmètre, on obtient plus qu'un signal et le fréquencesmètre lit deux fréquences différentes, donc il y a un problème car il ne sait pas laquelle afficher.

3.2.2 ALGORITHMES DÉVELOPPÉS

Maintenant, après de détailler le fonctionnement de nos composants, on s'intéresse aux algorithmes développés.

L'étape 1 (3.7) correspond à une grande atténuation avec laquelle on commence pour être sûr que nous sommes au dessus de la courbe de résonance puis avec l'atténuateur programmable, on va descendre vers le sommet. Le fréquencesmètre ne lit aucune fréquence car la droite de son seuil ne coupe pas la courbe de résonance.

On passe à l'étape suivante en changeant graduellement la valeur de l'atténuation jusqu'à trouver une valeur affichée sur le fréquencesmètre ce qui signifie qu'il y a une intersection entre la courbe de résonance et la droite horizontale qui représente le seuil de décision comme présenté dans la figure (3.8) de l'étape intermédiaire de l'algorithme.

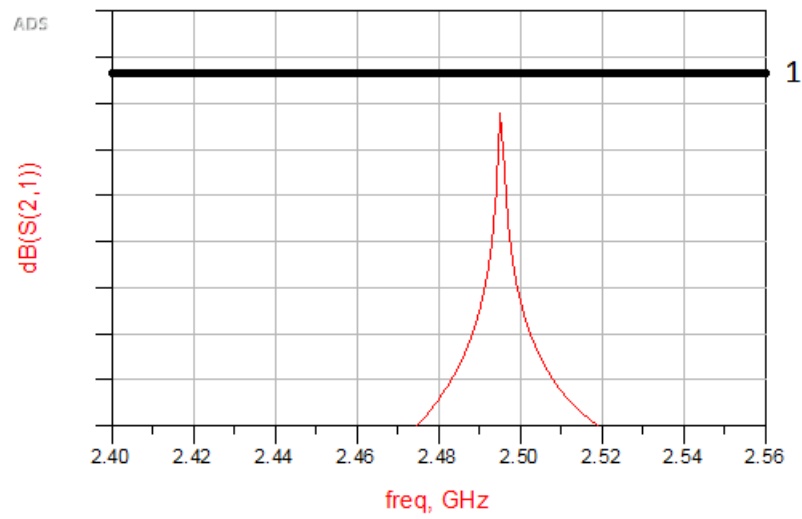


Figure 3.7 Étape initiale de l'algorithme.

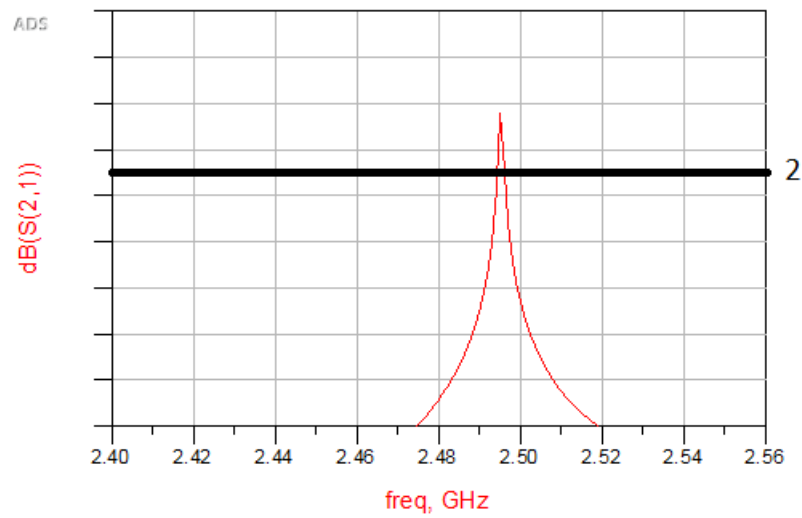


Figure 3.8 Étape intermédiaire de l'algorithme.

On poursuit cette recherche en appliquant l'algorithme suivant :

- Si la courbe coupe le seuil de décision, on monte de la moitié de la valeur descendue.
- Si la courbe ne coupe pas, on descend avec la même valeur descendue.

La condition d'arrêt est la limite de l'atténuateur. En fait, la valeur du pas de déplacement va être divisée par deux jusqu'à une limite qui est 0.1 db dans notre cas. Lorsqu'on atteint la limite, on suppose que nous sommes au niveau du sommet (3.9).

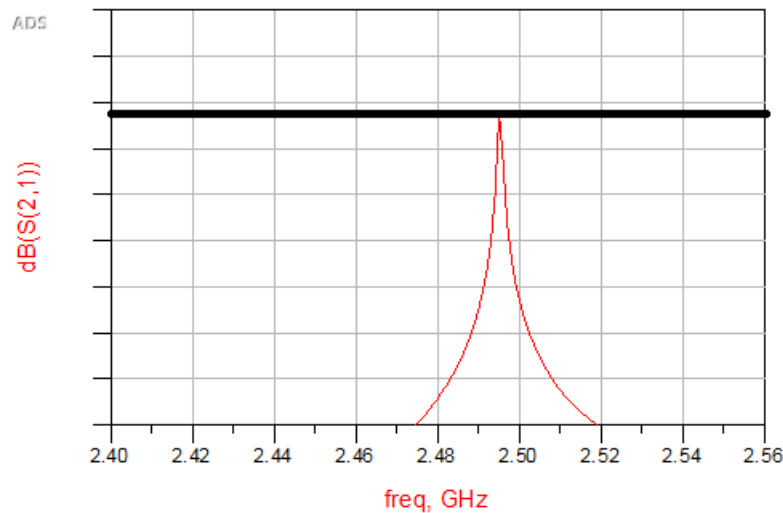


Figure 3.9 Obtention du sommet.

Après de localiser le niveau du sommet, on descend d'une valeur de 3db dans la courbe de résonance (3.10) et lorsqu'on balaie toute la bande en faisant varier la phase de 360 degrés, le fréquencesmètre est capable de lire les fréquences limites de l'intersection entre la courbe de résonance et le seuil de détection de cet appareil.

On fixe le niveau des amplitudes en gardant la même valeur d'atténuation et on se déplace horizontalement sur le segment d'intersection entre la courbe de résonance et le seuil de détection. Le déplacement est assuré par le déphaseur principal qui change la phase à chaque fois et ainsi on obtient une nouvelle fréquence. On évalue à chaque déplacement la différence entre les deux fréquences celle du départ et celle finale.

En gardant le même pas de déplacement sur le segment avec le déphaseur principal (3.11), on augmente la valeur de la tension qui alimente le déphaseur avec la même quantité pour obtenir le même déphasage en degrés, on remarque que la différence de fréquence la plus petite correspond à la zone qui contient la fréquence de résonance.

On parcourt tout le segment d'intersection en enregistrant toutes les différences de fréquences

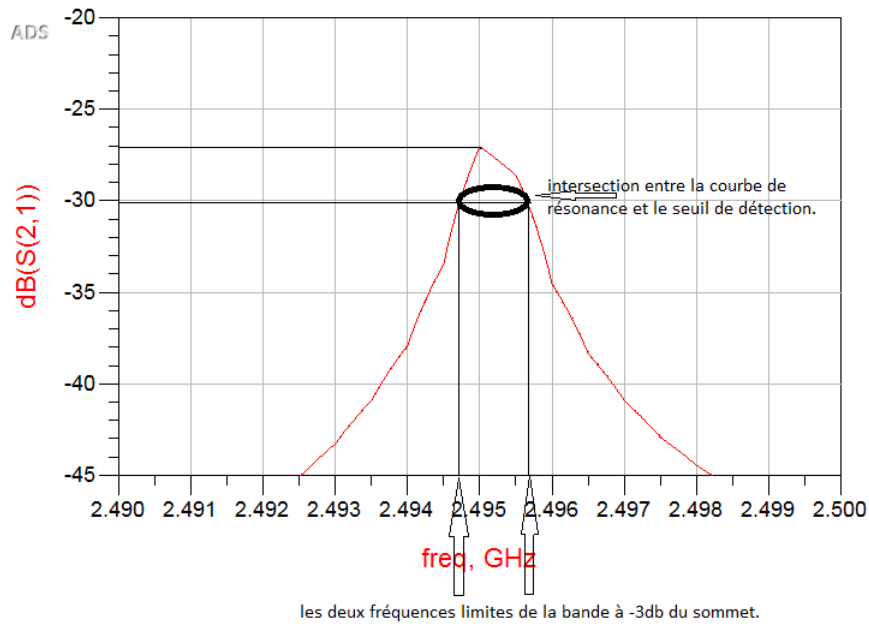


Figure 3.10 Niveau -3db de la courbe.

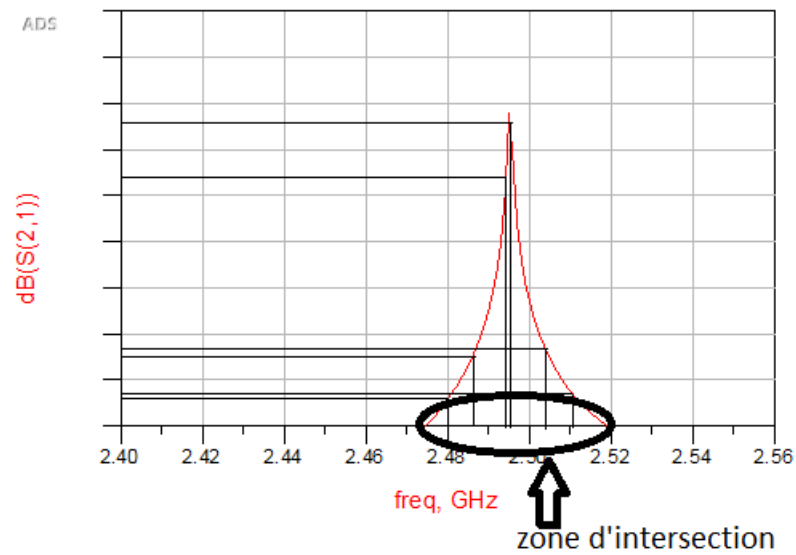


Figure 3.11 Déplacement sur la zone d'intersection.

et à la fin, on trouve la différence la plus petite qui contient la fréquence de résonance. On fait une supposition qui dit que le milieu de cette zone est la fréquence de résonance f_0 .

f_0 a été obtenue avec les variations appliquées à l'atténuateur pour toucher le sommet de la courbe d'amplitudes qui ne s'affiche pas dans un système actif mais on détecte ce sommet en passant par la bande d'oscillation la plus petite obtenue par balayage de phase.

Une fois la fréquence centrale f_0 et les deux fréquences limites de la bande à -3db f_1 et f_2 sont déterminées, on obtient facilement le facteur de qualité absolu défini par l'équation suivante :

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3.2)$$

avec :

- f_0 est la fréquence de résonance

- f_2 et f_1 sont les deux fréquences limites à -3db

On cherche le facteur de qualité Q absolu juste au début et il est absolu car il est mesuré lorsque la cavité est vide.

Maintenant, on insère l'échantillon dans la cavité et on évalue les nouvelles valeurs de la fréquence de résonance et le facteur de qualité relatif. Le facteur de qualité relatif est le facteur de qualité de la cavité après l'insertion de l'échantillon. La recherche de ce facteur relatif se fait de la manière suivante :

-on place notre système dans une zone où il y a une oscillation c'est-à-dire, le fréquencemètre affiche une valeur non nulle de la fréquence. Ainsi, la droite de détection du fréquencemètre coupe la courbe de résonance.

-Soit [AB] le segment d'intersection entre la courbe de la résonance et le seuil de détection du fréquencemètre (3.12). Maintenant, on se déplace sur le segment d'intersection. Le déplacement est possible si on garde les mêmes conditions de travail et on change légèrement la déviation avec le déphaseur numérique. Si on fait un agrandissement sur la zone [AB] et on passe à la courbe des phases, on obtient la figure (3.13).

En effet, grâce au déphaseur, il est possible de se déplacer sur l'échelle des phases et à chaque phase correspond une fréquence comme le montre la figure précédente. Nous avons remarqué que si on ajoute quelques degrés de phase puis on les retranche, on trouve une différence relative à chaque phase et ceci s'appelle une modulation carrée de la phase qui reste constante pendant toute la procédure de recherche. Selon la figure précédente, la différence la plus petite est celle qui correspond au déphasage 0 degré et ce déphasage correspond aussi au sommet de la courbe de résonance ce qui nous permet de trouver par lecture directe la nouvelle fréquence de résonance.

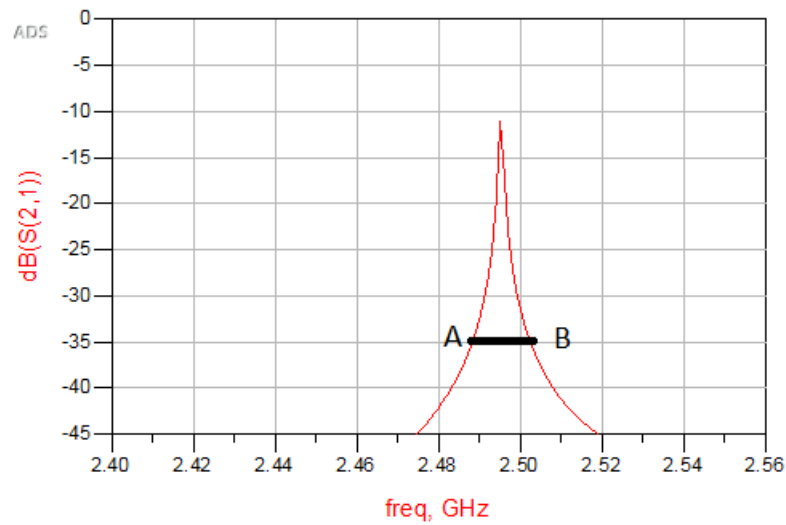


Figure 3.12 Segment d'intersection.

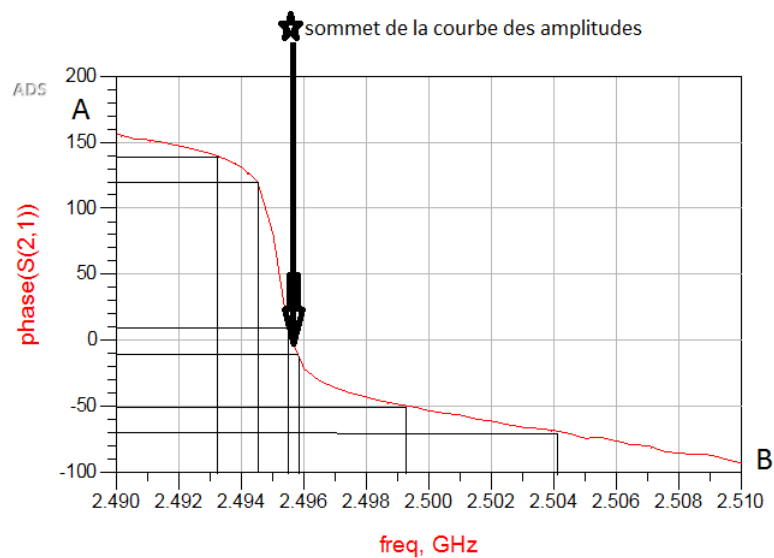


Figure 3.13 Agrandissement du segment d'intersection.

Le déphasage 0 degré n'est pas celui du déphaseur sinon il devient inutile. En fait, les différents composants apportent un déphasage au système et il faut le compenser pour rendre la phase globale du circuit un multiple de 2π . En fait, on applique notre algorithme suivant :

- on commence par placer notre système dans un état d'oscillation, c'est-à-dire une fréquence non nulle du fréquencemètre.

-on se déplace sur le segment [AB] qui représente l'intersection entre le seuil de détection et la courbe de résonance. Ce déplacement est assuré par le déphaseur principal commandé par la source de tension : on ajoute à chaque fois plusieurs degrés ce qui place le système dans un autre état car la phase a varié considérablement.

Maintenant, on reste dans le même état obtenu et on varie la phase du modulateur légèrement en notant à chaque fois la différence de fréquences déduite par la lecture des deux fréquences résultantes après chaque variation de phase. On répète ce processus à chaque déplacement sur le segment [AB] et à chaque fois, on compare la différence de fréquences obtenue avec la précédente. Si la nouvelle différence est plus petite que la dernière, on continue dans le même sens de déplacement, mais si la nouvelle est plus grande, on change de direction et on revient sur nos pas jusqu'à trouver la différence de fréquence la plus petite qui nous indique qu'on est rendu à la condition de la phase exacte pour l'obtention de la résonance au sommet.

Le nouveau facteur de qualité est déterminé en utilisant la formule suivante :

$$Q_r = Q_l \left(\frac{\Delta\omega_0}{\Delta\omega_r} \right) \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (3.3)$$

Q_r est le facteur de qualité de la cavité contenant l'échantillon.

Q_l est le facteur de qualité de la cavité vide.

ω_0 et ω_r sont respectivement les fréquences de résonance avant et après la perturbation.

$\Delta\omega_0$ et $\Delta\omega_r$ sont respectivement les minimums de différences de fréquences avant et après la perturbation qui correspondent aux fréquences de résonance.

Remarque : on a fait une comparaison entre les deux déphaseurs pour s'assurer que la quantité de tension donnée fournit le même déphasage en degrés. Ceci est nécessaire car on fait le rapport $(\frac{\Delta\omega_0}{\Delta\omega_r})$ donc il faut respecter les mêmes conditions de travail.

La détermination de la permittivité complexe est possible maintenant puisqu'on a déterminé les paramètres de la cavité avant et après la perturbation. Dans sa thèse, (11) a introduit les expressions des deux parties : réelle et imaginaire de cette quantité. Les expressions suivantes sont valables uniquement dans le cas d'une cavité cylindrique avec le mode TM_{010} :

$$\epsilon'_r = 1 + 0.539 \left(\frac{V_c}{V_s} \right) \frac{\delta f}{f} \quad (3.4)$$

$$\epsilon''_r = 0.269 \left(\frac{V_c}{V_s} \right) \delta \left(\frac{1}{Q} \right) \quad (3.5)$$

tel que V_c et V_s sont respectivement le volume de la cavité et le volume de l'échantillon.

$$\frac{\delta f}{f} = \frac{f_0 - f_r}{f_r}$$

$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_r} - \frac{1}{Q_l}$ est la différence des inverses des facteurs de qualité avant et après la perturbation. À noter que la fréquence f_r change avec chaque échantillon inséré et c'est pourquoi, on obtient une constante diélectrique différente pour chaque matériau.

3.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre système de mesures dans ses deux aspects : matériel et logiciel. En fait, nous avons abordé les composants utilisés en montrant leurs utilités dans notre projet. Pour résumer, notre algorithme de recherche du sommet est composé de deux boucles imbriquées : l'une pour changer l'atténuation et l'autre pour parcourir toute la bande passante. La démarche suivante consiste à parcourir la bande passante mais sur la courbe des phases pour retrouver la nouvelle fréquence de résonance déviée. De plus, nous avons expliqué l'algorithme de mesure des différents facteurs de qualité ce qui nous permet d'arriver finalement à la quantité voulue qui est la permittivité complexe.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 INTRODUCTION

Nous avons testé notre système sur quelques échantillons liquides et solides pour le valider et mettre en évidence son efficacité de calcul. En appliquant les formules énoncées dans le chapitre précédent, nous obtenons la permittivité complexe immédiatement.

Il y a des échantillons qui nécessitent un couplage plus fort que les autres et qui possèdent beaucoup de pertes ce qui engendre une partie imaginaire de la permittivité plus grande. Un couplage plus fort en changeant les antennes de couplage de la cavité en transmission a un impact important sur la détérioration du facteur de qualité Q . Si c'est un couplage électrique, on change la profondeur de pénétration dans la cavité. Si c'est un couplage magnétique, on change la direction des boucles magnétiques sur la paroi de la cavité.

Pour notre système, nous avons essayé de faire un compromis entre les différents échantillons pour éviter de changer le couplage pour chaque échantillon. En effet, nous avons trouvé une solution par programmation à ce dilemme qui consiste à donner plus de gain (en réduisant la valeur de l'atténuateur programmable). Ainsi, il suffit d'ajouter un temps supplémentaire et on trouvera facilement la zone d'oscillation.

4.2 INTERFACE GRAPHIQUE

4.2.1 APPLICATION PRINCIPALE

Les captures d'écran des différents fenêtres de notre application sont incluses dans l'annexe D. L'interface graphique commence par une étape d'identification dans laquelle on demande les coordonnées de l'utilisateur.

Après de fournir les informations requises, on est dans l'application et toutes ses possibilités sont offertes. La barre supérieure contient 5 sous menus qui permettent d'utiliser les fonctionnalités de notre système d'une façon séparée : il y a le sous menu du fichier, le fréquence mètre, l'atténuateur programmable, le port GPIB et un sous menu pour donner quelques détails sur la conception de l'application.

Le sous menu du fichier nous offre 4 possibilités qui sont :

- commencer une nouvelle mesure ce qui déclenchera le module de la recherche de la permittivité complexe.
- effacer l'historique des mesures : cette action videra la base de données consacrée aux mesures faites sur le paramètre diélectrique.

- montrer l'historique des mesures : on communique avec la base de données à travers une requête pour obtenir ces informations.
- quitter l'application.

Les sous menus du fréquence mètre, l'atténuateur programmable et le port GPIB sont similaires. En fait, ils contiennent 3 actions chacun qui sont le déclenchement de ce module, l'affichage de la fiche technique ou de l'historique. Finalement, le dernier sous menu contient des détails sur la conception de l'application.

4.2.2 MODULE DE RECHERCHE DE LA PERMITTIVITÉ

Le module de la recherche de la permittivité complexe est accessible à travers le sous menu du fichier qui se trouve dans l'application principale. Mais avant l'apparition de cette fenêtre, il y a quelques consignes à respecter. En effet, pour un nouvel utilisateur, on doit lui indiquer qu'il faut mettre en marche les générateurs de tension avec les valeurs correspondantes. On effectue les étapes mentionnées dans la partie "algorithmes" par ordre pour avoir les bons résultats.

Une fenêtre nous avise que le sommet a été trouvé.

Ensuite, on effectue le balayage de toute la bande de fréquences au niveau de la moitié de puissance.

Après avoir trouvé le facteur de qualité absolu à partir des points de l'étape précédente, on cherche le facteur de qualité relatif ainsi que la nouvelle fréquence de résonance de l'échantillon sous test. A cette étape, le système s'adapte automatiquement au niveau des pertes de l'échantillon. En fait, nous avons développé un algorithme qui cherche l'oscillation et place l'atténuateur au niveau de -3db de cette zone trouvée. L'algorithme ajoute un temps supplémentaire (une seconde par 2db ajoutée au gain) mais on gagne l'élimination de la nécessité de changer le couplage à chaque fois qu'on utilise un nouvel échantillon.

Finalement, on demande à l'utilisateur de donner le nom et le volume de l'échantillon. Ces informations seront enregistrées dans la base de données avec la date correspondante et ceci pour les afficher lorsqu'on a besoin de consulter l'historique des mesures.

4.3 RÉSULTATS OBTENUS ET DISCUSSIONS

4.3.1 RÉSULTATS AVEC LE VNA

Pour valider notre projet, nous avons besoin d'une référence. D'habitude, on utilise l'analyseur de réseaux pour déterminer la courbe de résonance et à partir de laquelle, les paramètres en question sont déduits à savoir la fréquence de résonance et le facteur de qualité. Dans la

présente section, on montre les courbes obtenues avec l'analyseur pour pouvoir les comparer par la suite avec les résultats trouvés en utilisant notre système qui ne possède comme sortie que le fréquencesmètre. Des courbes de quelques échantillons de matériaux placés à l'intérieur de la cavité sont affichées. Les fichiers ".S2P" ont été récupérés de l'analyseur de réseaux vectoriel et leur traitement a été fait sous ADS. Ensuite, on récupère les deux colonnes des fréquences et leurs coefficients S_{21} correspondants.

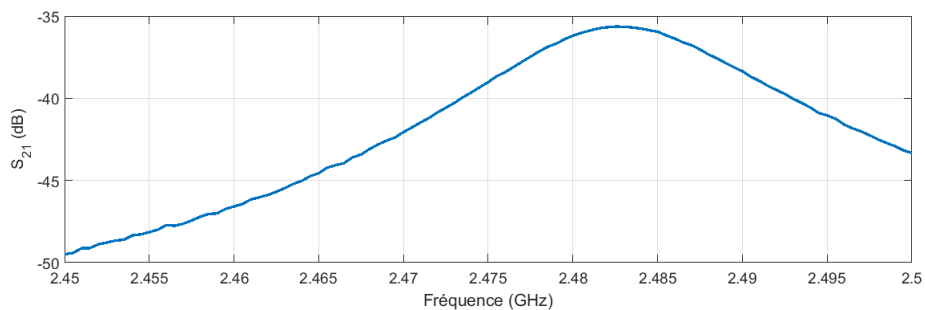


Figure 4.1 Courbe du méthanol.

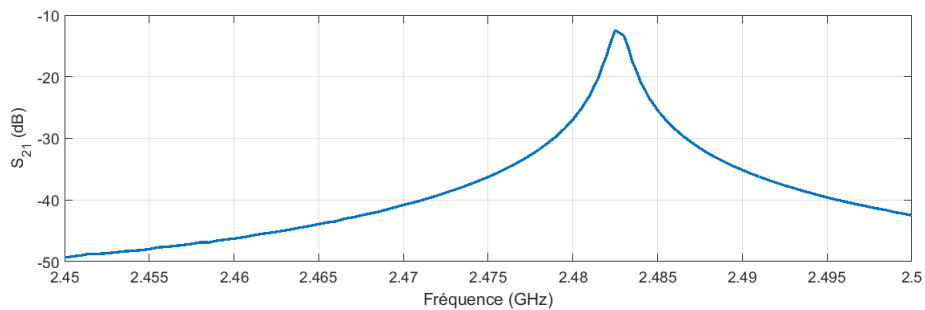


Figure 4.2 Courbe du plexiglas.

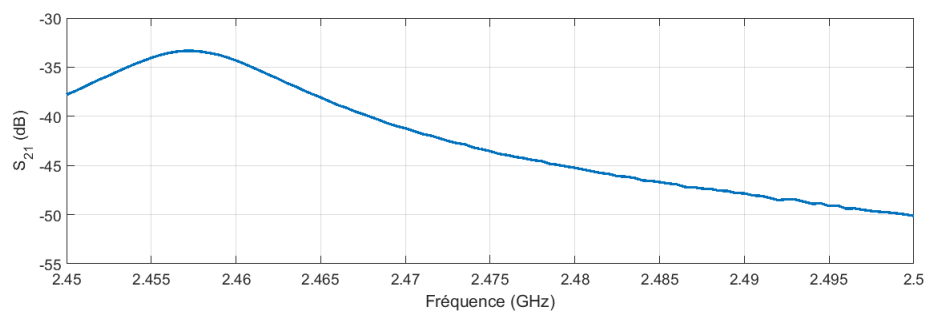


Figure 4.3 Courbe de l'eau pure.

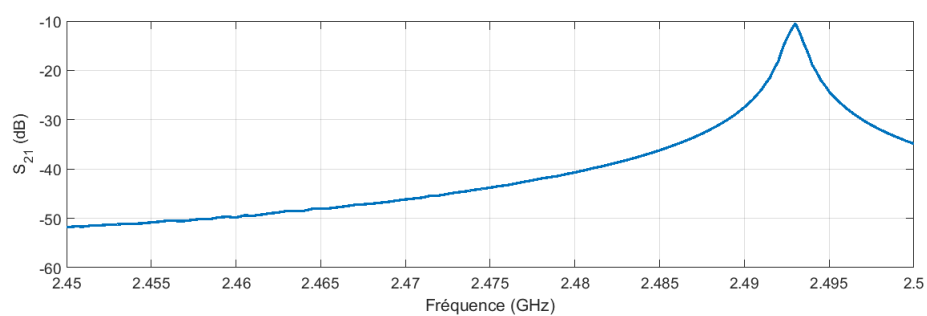


Figure 4.4 Courbe du pyrex.

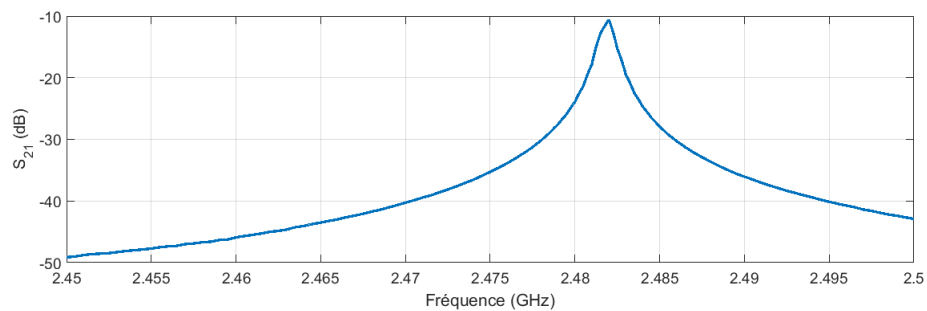


Figure 4.5 Courbe du téflon.

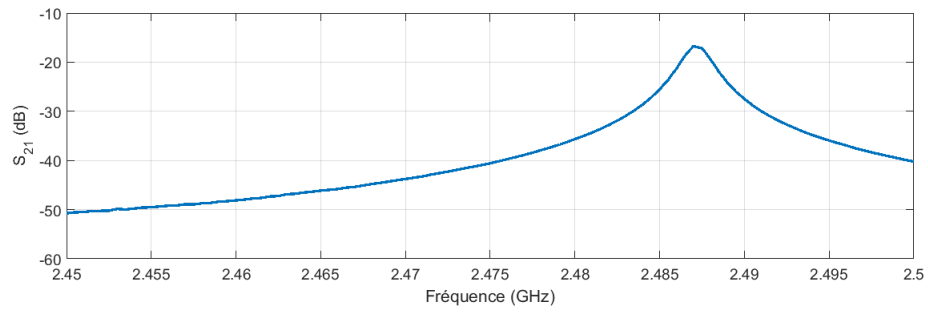


Figure 4.6 Courbe de l'acétone.

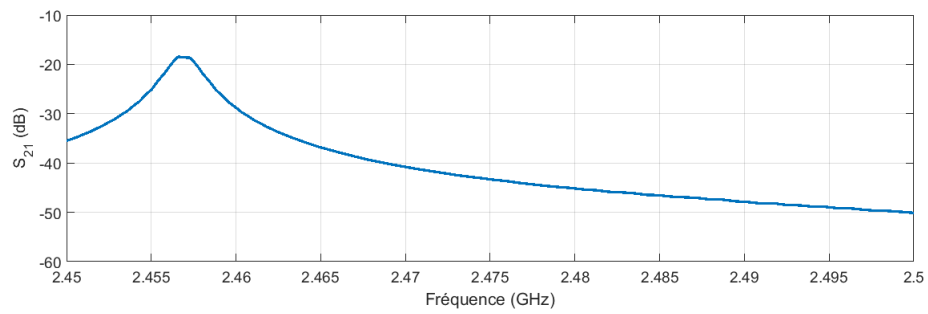


Figure 4.7 Courbe du verre.

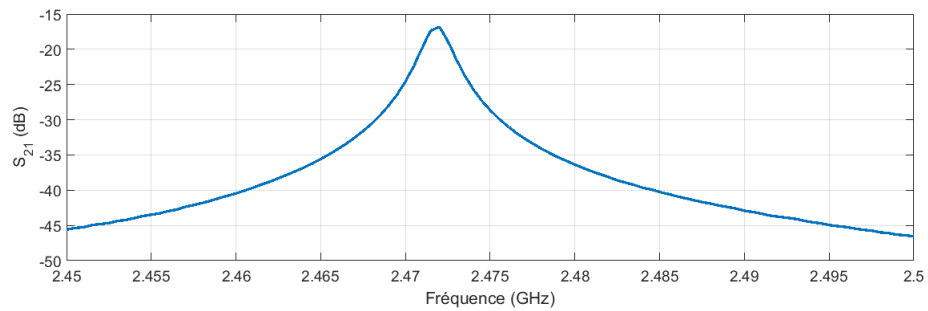


Figure 4.8 Courbe du caoutchouc.

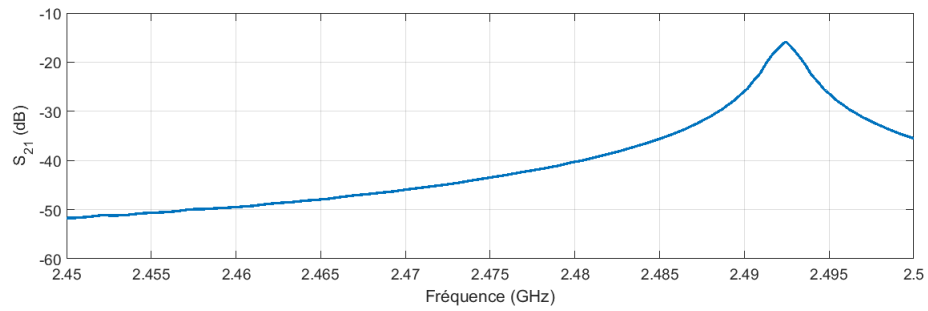


Figure 4.9 Courbe du carton.

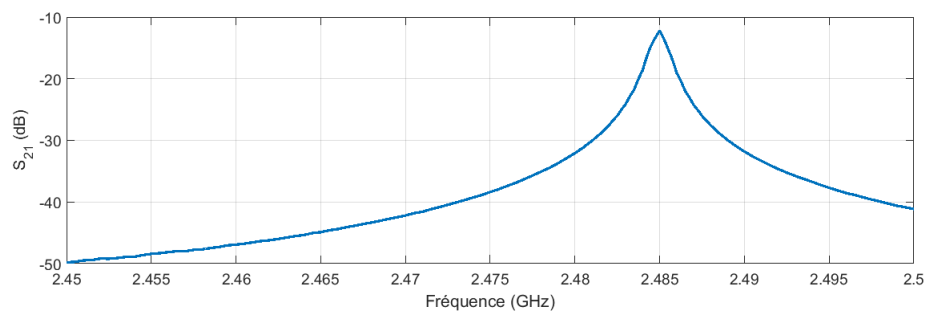


Figure 4.10 Courbe du duroid 6002.

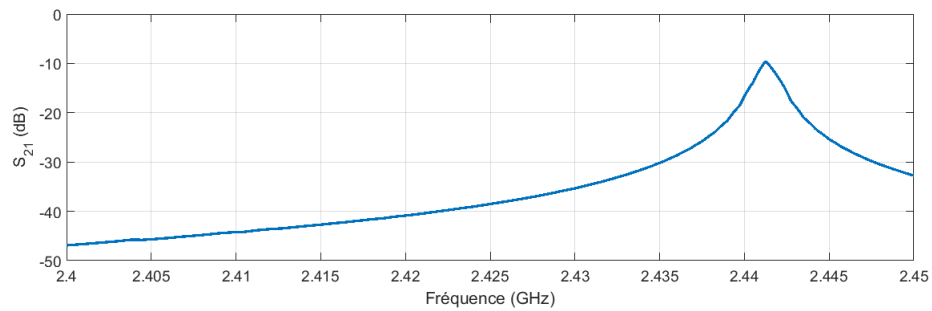


Figure 4.11 Courbe du duroid 6006.

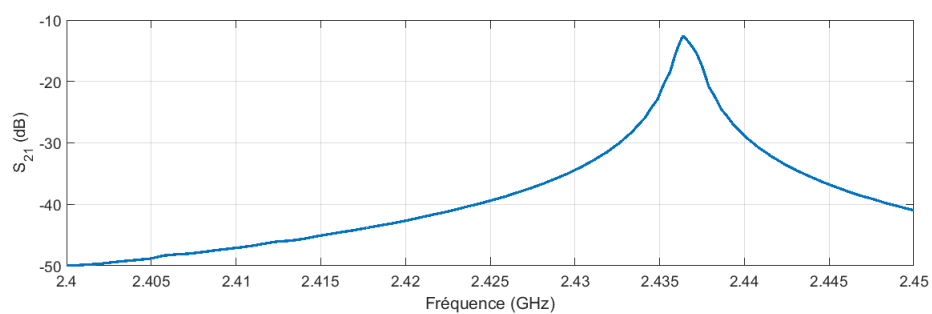


Figure 4.12 Courbe du duroid 6010.

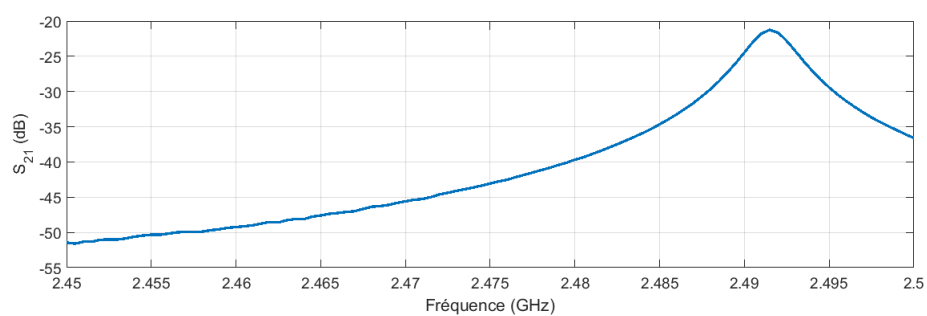


Figure 4.13 Courbe du 1-buthanol.

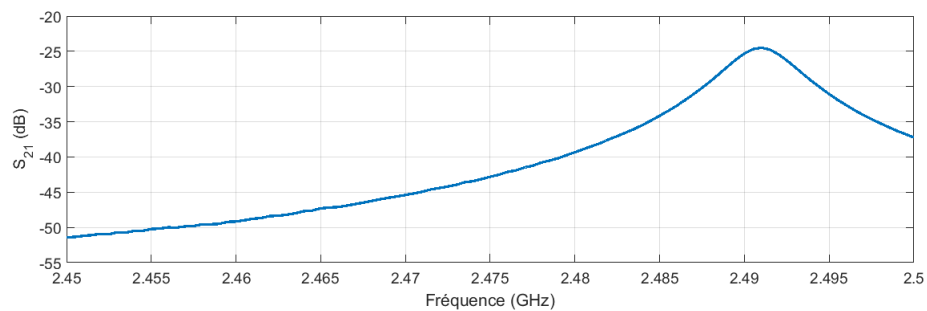


Figure 4.14 Courbe du 2-propanol.

Nous avons affiché ces courbes pour pouvoir les comparer avec les résultats expérimentaux trouvés avec l'application.

On calcule les facteurs de qualité relatifs des échantillons mesurés graphiquement. Selon les courbes trouvées, les fréquences de résonance et les facteurs de qualité obtenus après la perturbation sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 Résultats trouvés avec le vna.

matériau	fréquence de résonance	facteur de qualité
1-butanol	2491.5 MHz	775.46
2-propanol	2491 MHz	593.09
caoutchouc	2471.9 MHz	1454.05
carton	2492.5 MHz	830.83
duroid 6002	2485 MHz	1553.125
duroid 6006	2441.3 MHz	1877.92
duroid 6010	2436.4 MHz	1853.55
méthanol	2482.5 MHz	155.15
plexiglas	2482.5 MHz	1655
eau pure	2457.3 MHz	213.67
téflon	2481.9 MHz	1909.15
acétone	2487.1 MHz	1036.29
verre	2456.9 MHz	1228.45
pyrex	2493 MHz	2624.21

4.3.2 DISCUSSIONS

Nous avons remarqué durant les mesures faites que certains matériaux ont plus de pertes que les autres ce qui nécessite parfois plus de gain pour déclencher l'oscillation. De plus, il ne faut pas faire beaucoup de mesures en insérant des échantillons après de calculer le facteur de qualité absolu lorsque la cavité était vide. En fait, ce terme est calculé une fois au début puis on s'intéresse aux facteurs relatifs des échantillons insérés. Si on reste longtemps dans les mesures, la fréquence de résonance et le facteur de qualité enregistrés au début lorsque la cavité était vide risquent de changer et ainsi, on obtient des résultats erronés.

Pour faire des mesures avec les liquides, nous appliquons le premier algorithme à la cavité qui contient un tube vide puis on insère le liquide dedans et on continue. On calcule les paramètres de la cavité supposée vide de cette façon pour ne pas inclure le matériau qui constitue le tube dans nos résultats.

Tableau 4.2 Résultats expérimentaux avec le système actif.

nom	volume	partie réelle	partie imaginaire	facteur de qualité	fréquence
1-butanol	25	3,615209	0,781143	1354,84318	2491,9915
2-propanol	25	17,276112	2,007753	664,221623	2486,3428
caoutchouc	452	4,033589	0,032069	1591,033189	2471,9969
carton	100	4,002404	0,535514	786,182670	2490,308
duroid 6002	417	2,811017	0,007821	1565,763844	2482,5751
duroid 6006	596	6,357332	0,011924	2019,294002	2441,6917
duroid 6010	330	11,580724	0,0197997	2070,319605	2436,7667
methanol	25	34,681822	19,806721	131,71771	2478,0209
plexiglas	500	2,627687	0,022535	1712,722508	2481,4561
eau pure	25	85,776315	8,547529	265,079777	2457,2422
téflon	770	2,042517	0,006064	2027,522392	2481,7568
acetone	25	23,585456	1,128136	903,099618	2483,6147
verre	680	4,377439	0,038824	1130,188713	2456,5569
pyrex	58	3,499121	0,297979	2502,766821	2493,0686

Selon (23), la permittivité complexe du téflon est évaluée à $2.08-j0.004$ ce qui est en harmonie avec nos résultats. Les résultats concernant le caoutchouc et le carton sont en concordance avec (24). Suivant (25), la permittivité du plexiglas est comprise entre 2.2 et 3.4 : nous avons trouvé 2.62 donc on confirme cette valeur. La banque de données (26) a indiqué que la permittivité du 2-propanol est 18.44 à la même température que la nôtre (17.27 est la valeur expérimentale). Le duroid 6002 a une permittivité relative de $2.94-j0.0012$, (27) et nous avons trouvé $2.81-j0.007$. Concernant les duroid 6006 et 6010, la constante du premier est 6.15 avec une tolérance de 0.15, (28) et la constante du deuxième est 11.4 avec des pertes ne dépassant pas 0.02, (28) ce qui est proche de nos résultats. La permittivité du méthanol est estimée à 33.1 dans la littérature, (29) et nous avons trouvé 34.68. Pour l'acétone, la permittivité est 21.2, (30) ce qui est en harmonie avec nos mesures : on a obtenu 23.58. Pour le verre et le pyrex, leurs permittivités sont comprises entre 4 et 5, (31) et nous avons trouvé 4.3 et 3.5 respectivement. D'après (32), la constante diélectrique du 1-butanol est comprise entre 3.43 et 4 et le facteur de pertes entre 0.87 et 1.67 : nous avons trouvé $3.61-j0.78$ ce qui est acceptable. Finalement, pour l'eau pure, d'après (33) la permittivité complexe est $76.9-j9.77$ à la température 25 degrés et à la fréquence 2.61 GHz : cette différence est due à plusieurs facteurs comme par exemple le taux de salinité de l'eau car on procède à sa stérilisation avant de l'utiliser et les techniques ont évolué beaucoup en plus des conditions de l'expérience car ces mesures de référence ont été faites il y a plus de 25 ans avec le fait qu'à une fréquence élevée, l'obtention d'une valeur exacte devient difficile.

La permittivité change avec la fréquence. Par exemple, (34) a indiqué une valeur du plexiglas

de 2.7 à 1 MHz et une autre valeur de 3.6 à 100 Hz.

4.4 CONCLUSION

Nous avons montré dans ce chapitre nos résultats de mesure pour chercher la permittivité complexe. Nous pouvons vérifier ces résultats à partir de la comparaison du facteur de qualité relatif après l'insertion de l'échantillon. Nous avons trouvé une grande ressemblance avec les facteurs trouvés avec l'analyseur de réseaux (0.1 taux d'erreur). De plus, nous avons validé les valeurs trouvées pour la permittivité avec celles dans la littérature et nous avons trouvé pratiquement la même ressemblance (taux d'erreur de 5

Une grande exactitude des valeurs peut être obtenue si on applique le premier algorithme deux fois mais dans ce cas, on perd beaucoup de temps (une minute environ).

De plus, dans la majorité des manuels, on ne trouve pas une valeur exacte mais plutôt une marge de valeurs car plusieurs facteurs peuvent intervenir.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Le système développé est un système actif. Ce système a un avantage majeur comparé aux mesures faites par VNA au niveau du temps d'acquisition des données qui permettent le calcul de la permittivité complexe. Il est d'une utilité essentielle pour toute application en temps réel (déroulement d'une réaction chimique, déformation des parois en cas d'augmentation de la température...). La seule sortie est le fréquencesmètre qui nous fournit les valeurs de fréquence nécessaires au fonctionnement de nos algorithmes. L'oscillation est présente lorsque les conditions de Barkhausen sont vérifiées et l'interface graphique a été développée sous visual basic avec l'intégration de la norme IEEE 488.02 pour communiquer avec le générateur de tension et des bases de données SQL pour enregistrer les mesures faites.

5.1 SYNTHÈSE DES TRAVAUX

Le système développé dans ce mémoire apporte plusieurs améliorations au sujet de calcul de la permittivité complexe. Tout d'abord, nous avons réussi à le construire à partir des composants à prix réduit (ne dépassant pas 2000 dollars) et ce système peut remplacer l'analyseur de réseaux vectoriel en ce qui concerne la détermination de la permittivité complexe : il est aussi plus rapide et plus commode car le VNA nous renseigne juste sur les paramètres S et il faut consulter un personnel qualifié pour avoir la quantité voulue.

De plus, la solution logicielle programmée réduit énormément le temps de réponse des autres systèmes et fournit des résultats plus précis. En effet, elle supprime la partie de calcul statique qui prend plus de temps avant d'avoir le résultat et effectue tous les calculs sur place grâce à l'accès instantané à la base de données.

Finalement, le temps requis pour changer le couplage à chaque fois qu'on change la nature de l'échantillon à mesurer n'existe plus. En fait, notre système s'adapte automatiquement à ce changement en donnant plus de gain à la boucle.

5.2 LIMITATIONS DE LA SOLUTION PROPOSÉE

Toutefois, notre système possède quelques limitations qui sont inévitables en pratique.

Premièrement, la mise en marche du système longtemps influe sur les mesures en faisant beaucoup d'insertions des échantillons après avoir calculé le facteur de qualité absolu : le facteur de qualité peut varier légèrement si le système demeure en marche pour une longue durée et ainsi la fréquence de résonance calculée au début peut subir une déviation. C'est

pourquoi, il est recommandé de faire quelques mesures puis laisser le système en repos pendant une durée allant de 30 à 45 minutes.

Deuxièmement, le système a besoin d'un temps supplémentaire avant de faire le deuxième algorithme qui consiste à chercher le facteur de qualité relatif. En effet, l'ajout d'un gain progressif se fait par 2db en laissant une seconde à chaque étape. Plus le matériau est dispersif, plus le gain ajouté est grand et par conséquent, le temps de recherche du facteur relatif augmente.

Finalement, la précision des mesures reste limitée (6 chiffres après la virgule) et ceci s'explique par la limite des cases mémoires utilisées soit dans le programme principal, soit dans les bases de données.

5.3 AMÉLIORATIONS FUTURES

Tout système pratique est imparfait et il possède des rectifications à faire. Nous allons travailler, dans le futur, à améliorer le temps d'exécution de notre système pour avoir un meilleur temps de réponse.

D'une part, nous allons faire des tests sur d'autres matériaux pour valider de plus l'utilité de notre projet. D'autre part, nous essayerons d'intégrer d'autres cavités résonnantes à d'autres fréquences. Nous avons une cavité qui résonne à 915 MHz et il nous faut des amplificateurs fonctionnant dans une marge contenant cette fréquence. De plus, la solution logicielle développée doit subir quelques changements pour s'adapter avec la nouvelle fréquence.

Finalement, nous allons chercher une solution pour contourner le problème de déviation de la fréquence de résonance après une certaine durée. Nous étudierons la possibilité de garder le système dans une température fixe même après mise en marche ce qui nous permettra de faire des mesures autant que voulu.

RÉFÉRENCES

- [1] C. Li, M. Tofighi, D. Shreurs, and T. Horng, *Principles and application of RF/microwave in healthcare and biosensing*, 2016.
- [2] Z. Eremenko, V. Skresanov, A. Shubnyi, N. Anikina, V. Gerzhikova, and T. Zhilyakova, “Complex permittivity measurement of high loss liquids and its application to wine analysis,” *intech*, 2011.
- [3] M. Zhang, “Permittivity and conductivity imaging in electrical capacitance tomography,” Ph.D. dissertation, University of Bath, December 2015.
- [4] X. Chavanne and J. Frangi, “Presentation of a complex permittivity-meter with applications for sensing the moisture and salinity of a porous media,” *Sensors 2014*, 2014.
- [5] O. Tereshchenko, F. J. K. Buesink, and F. B. J. Leferink. (2011) An overview of the techniques for measuring the dielectric properties of materials. [Online]. Available : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6050287>
- [6] A. I. Mekhannikov, A. V. Myl'nikov, and L. P. Maslennikova, *Calibration of a coaxial antenna-probe for microwave dielectric measurements*, 2007.
- [7] J. B. Bobowski and T. Johnson. (2014) Permittivity measurements of biological samples by an open-ended coaxial line. [Online]. Available : <https://people.ok.ubc.ca/jbbobowsk/LaTeX/LaTeX%20Tutorials/Sample%20report/permittivity%20of%20wastewater.pdf>
- [8] Agilent Technologies. (2006) Agilent 85070e dielectric probe kit 200 mhz to 50 ghz. [Online]. Available : <http://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/research-centres-and-groups/centre-for-bio-inspired-technology/11949699.PDF>
- [9] D. Gruyter, “6 techniques for measuring dielectric properties,” 2012.
- [10] A. Singh, “An improved method for the determination of q of cavity resonators,” *IRE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, pp. 155–160, 1957.
- [11] C. Akyel, “Système hyperfréquentiel de mesure et de calcul de la permittivité complexe en temps réel,” Ph.D. dissertation, Ecole Polytechnique de Montréal, 1980.
- [12] M. Ney and F. Gardiol, “Mesures automatiques des cavités résonnantes en hyperfréquences,” *Bulletin ACE/UCS*, pp. 85–88, 1977.
- [13] V. Komarov, S. Wang, and J. Tang. (2005) Permittivity and measurements. [Online]. Available : <http://public.wsu.edu/~sjwang/dp-rf-mw.pdf>

- [14] P. F. Combes and R. Crampagne. (2002) Circuits passifs hyperfréquences-filtres et cavités. [Online]. Available : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/electronique-photonique-th13/hyperfrequences-circuits-et-emetteurs-de-puissance-42281210/circuits-passifs-hyperfrequences-e1402/cavites-electromagnetiques-e1402niv10002.html>
- [15] G. Cormier. (2010) Guides d'ondes. [Online]. Available : <http://www8.umoncton.ca/umcm-cormiergabriel/Hyperfrequences/GELE5223Chapitre2.pdf>
- [16] J. Byrd. (2009) Resonant cavities. University of New Mexico. [Online]. Available : <http://uspas.fnal.gov/materials/09UNM/ResonantCavities.pdf>
- [17] B. Potelon, J. C. Bohorquez, J. F. Favennec, C. Quendo, E. Rius, and C. Person, "Cavites circulaires enterrees, etude de la flexibilite," *15èmes Journées Nationales Microondes, Toulouse*, 2007.
- [18] J. Redoutey. (2009) Oscillateurs. [Online]. Available : <https://www.robertponge.com/telechargements/ebooks/oscillateurs.pdf>
- [19] R. C. Ajmera, D. Byron Batchelo, D. C. Moody, and H. Lashiksky, "Microwave Measurements with Active Systems," vol. 62, no. 1, 1974, pp. 118–127.
- [20] A. V. Vorst and D. V. Janvier, *Bases de l'ingenierie micro-ondes*, 1996.
- [21] L. Chusseau, *Parametres S - Antennes*, Universite Montpellier, 2005.
- [22] Radio-electronics. Vector Network Analyzer VNA Tutorial. [Online]. Available : <http://www.radio-electronics.com/info/tandm/rf-network-analyzer/vector-analyser-vna-tutorial.php>
- [23] G. Cormier. (2012) Notes de cours GELE5222 : Resonnateurs. Université de Moncton. [Online]. Available : <http://www8.umoncton.ca/umcm-cormiergabriel/HyperfrequencesB/GELE5222Notes4.pdf>
- [24] Orange Labs. (2001) Permittivite - constante dielectrique. [Online]. Available : <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23B/RM23B07a.html>
- [25] K. Blattenberger. (2005) Dielectric constant, strength and loss tangent. [Online]. Available : <http://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectricconstantsstrengths.htm>
- [26] Dortmund Labs, *Dielectric Constant of 2-Propanol*, 2017. [Online]. Available : <http://www.ddbst.com/en/EED/PCP/DECC95.php>
- [27] Rogers corporation. (2017) Rt/duroid 6002. [Online]. Available : <https://www.rogerscorp.com/documents/609/acm/RT-duroid-6002-laminate-data-sheet.pdf>

- [28] ——. (2017) Rt/duroid 6006/6010lm. [Online]. Available : <http://www.rogerscorp.com/documents/612/index.aspx>
- [29] Dortmund Laboratory. (2017) Dielectric constant of methanol. [Online]. Available : <http://www.ddbst.com/en/EED/PCP/DECC110.php>
- [30] A. P. Gregory and R. N. Clarke, “Tables of the complex permittivity of dielectric reference liquids at frequencies up to 5 ghz,” *Reasearch Gate*, vol. 94, no. 2, pp. 1–14, janvier 2012.
- [31] emerson and cuming. (2015) Dielectric chart. [Online]. Available : <http://www.eccosorb.eu/sites/default/files/files/dielectric-chart.pdf>
- [32] F. Buckley and A. Maryott, “Tables of dielectric dispersion data for pure liquids and dilute solutions,” 1958.
- [33] U. Kaatze, “Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature,” *journal of chemical and engineering data*, vol. 34, no. 4, pp. 371–374, 1989.
- [34] Material Data Center. (2017, mai) Datasheet plexiglass. [Online]. Available : <http://www.materialdatacenter.com/ms/fr/tradenames/Plexiglas/Evonik+Industries+AG/PLEXIGLAS%C2%AE+8N/6e68306e/2125>

ANNEXE A CODES MATLAB

Le code suivant sert à afficher l'atténuation en fonction du déphasage. Pour le déphaseur numérique opérant à 2.4 GHz. On lit le fichier contenant les valeurs "dlmread" et le nom de ce fichier se ressemble avec les 15 autres puisqu'on travaille de 0 à 15 volts. La variable c permet d'identifier la fréquence voulue puisqu'on a fait les mesures pour toute une bande de fréquences. On affiche les 16 figures ensemble qui correspondent à la variation du déphasage par rapport à l'atténuation en faisant varier la tension de 0 à 15 volts avec la fonction "subplot". Nous précisons la forme de l'affichage qui est des étoiles en bleu avec le paramètre *b**. Le vecteur o sert comme titre : il indique la fréquence d'opération.

```
for z=0 :15
for j=1 :1
c=190+j;
for i=1 :21
p=[num2str(z),'v',num2str(i-1),'db.s2p']
k=dlmread(p,' ');
t(d,i)=k(c,5);
end
x=[0 :1 :20];
subplot(4,4,z+1)
plot(x,t(d, :),'b*')
xlabel('atténuation en décibel');
ylabel('déphasage en degrés');
o=['fréquence ',num2str(k(c,1)),' GHz, alimentation ',num2str(z) ,'v'];
title(o)
grid on
end
end
```

Le code suivant permet de connaître l'atténuation réelle de l'atténuateur programmable. En fait, on dessine la valeur obtenue suite à l'attribution d'une valeur donnée à l'équipement. Le principe est similaire au code précédent : la lecture avec dlmread puis l'affichage avec subplot.

```
n=0;
for z=0 :20
d=0;
```

```

n=n+1;
c=180;
for i=1 :1
c=c+1;
d=d+1;
p=[num2str(z),'db.s2p']
k=dlmread(p,' ');
t(n,i)=k(c,4);
f(i)=k(c,1)
l=(0 :20);
end
end
for i=1 :1
subplot(1,1,i)
plot(l,t( :i),'b*')
xlabel('atténuation donnée')
ylabel('atténuation obtenue')
o=['fréquence ',num2str(f(i)),' GHz'];
title(o)
grid on
end

```

Cette fois, on s'intéresse au déphaseur analogique. On affiche l'atténuation en fonction du déphasage :

```

d=0;
for c=199 :199
d=d+1;
for i=0 :20
p=['depana',num2str(i),'v.s2p']
k=dlmread(p,' ');
t(i+1,d)=k(c,4);
l(i+1,d)=k(c,5);
end
h(d)=k(c,1);
end for j=1 :1
subplot(1,1,j)
plot(l( :j),t( :j),'b*')

```

```

o=['fréquence ',num2str(h(j)), ' GHz'];
title(o)
xlabel('déphasage en degrés');
ylabel('atténuation en décibel');
grid on
end

```

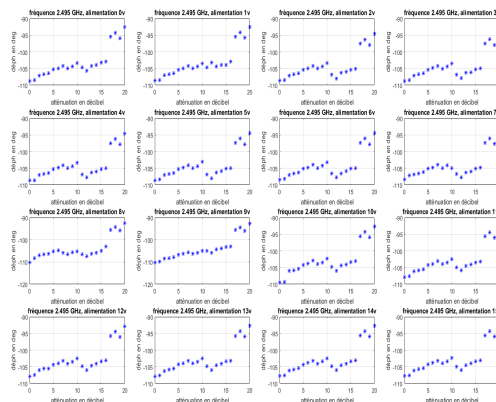


Figure A.1 Atténuation du déphaseur en fonction du déphasage

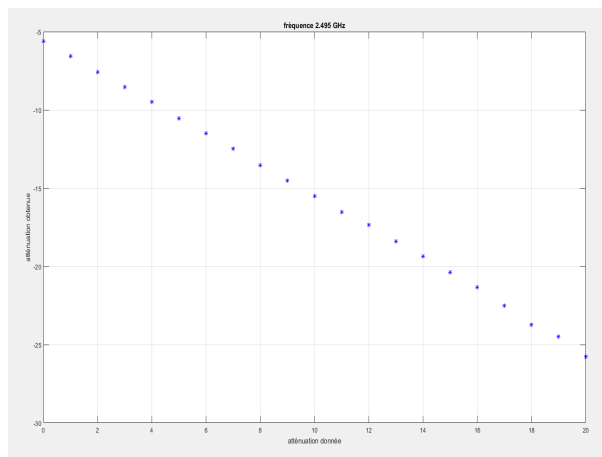


Figure A.2 Atténuation obtenue en fonction de la valeur assignée

ANNEXE B CODES VB.NET

Dans la présente section, on inclut le code de l'application développé sur vb.net avec une explication des différentes fonctions mises en œuvre :

```
Imports System.Threading
Imports MySql.Data.MySqlClient
Imports System.Globalization
```

Nous commençons le code par importer quelques bibliothèques nécessaires pour notre projet. En fait, lors de la création d'un nouveau projet, la plateforme de développement ne charge pas toutes les bibliothèques pour ne pas charger la mémoire inutilement : c'est à nous de les appeler. Ici, on a besoin de mettre le système en pause (thread.sleep), communiquer avec le client Sql et la dernière pour nous fournir le temps de l'opération.

```
Shared array(1000), arr(1000), vector(1000), vect(1000), v1(1000), v2(1000),
    v(1000), c, q, qs, w0, dw0, w0s, dw0s As String
Shared i, f, t, j, h As Integer
Dim myValue As Object
Shared addr As Short = 3
Shared mysqlconn As MySqlConnection
Shared ci As CultureInfo = CultureInfo.InvariantCulture
Shared COMMAND As MySqlCommand
```

On définit ici une liste de variables que nous allons utiliser par la suite et on utilise le mot "Shared" pour qu'elles soient reconnues par tout le programme pas juste une seule fonction. Par exemple, une variable modifiée dans la fonction A est modifiée aussi pour la fonction B.

```
Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    MessageBox.Show("Please follow carefully those steps:" & vbNewLine &
        "-switch on the beige power supply and rise the voltage to 28v" &
        vbNewLine & "-switch on the Agilent power supply and make the output
        on by clicking on the output button" & vbNewLine & "-open the instek
        power supply and put the voltage 5v. ")
    'Me.Size = SystemInformation.PrimaryMonitorSize
    'Me.WindowState = 2
    'Me.Location = New Point(0, 0)
```

```

'Me.TopMost = True
'Me.FormBorderStyle = 0
Timer1.Enabled = True
Dim status As Integer, val As Single

status = MyRudat.Connect
If status = 0 Then
    MsgBox("Rudat not connected")
    Me.Close()
End If

status = MyRudat.Read_ModelName(Model)
status = MyRudat.Read_Att(val)

TextBox1.Text = Format(val, "0.00")
End Sub

```

Cette fonction contient les tâches à exécuter lors de l'ouverture de la fenêtre principale. Au début, il y a affichage d'un message qui guide les nouveaux utilisateurs en leur indiquant quoi faire. Ensuite, on assigne quelques paramètres de l'affichage de cette fenêtre. Finalement, on s'intéresse aux composants électroniques comme le fréquencemètre en activant "Timer1" qui contrôle l'échantillonnage de la fréquence à des moments donnés (la valeur ici est chaque 0.1 seconde).

```

Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles Button1.Click
    Dim status As Integer, val As Single

    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.SendIFC(0)           'pulse IFC

    Call ErrorChecking()                 'Error Checking
    Dim eotmode As Short
    Dim Outstring As String
    Outstring = "INST:SEL OUT1"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend
    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)

```

```

Outstring = "VOLT:RANG P20V"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)

val = 25

Dim pas As Double = 2
status = MyRudat.SetAttenuation(val)
TextBox1.Text = Format(val, "0.00")
System.Diagnostics.Process.Start("D:\FreqCounterExm\Backup
\FreqCounterExm\bin\Debug\FreqCounterExm.exe")
Dim arrProcess() As Process =
    System.Diagnostics.Process.GetProcessesByName("FreqCounterExm")

Dim mysqlconn As MySqlConnection
mysqlconn = New MySqlConnection
mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
Dim READER As MySqlDataReader
While (pas > 0.1 And val >= 0)
    Try
        mysqlconn.Open()

        Dim Query As String
        ,
        Query = "insert into login.attenuation (value,time) values ('" &
            val & "',''" & Date.Now.ToString("hh mm ss.f") & "'"")
        COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

        READER = COMMAND.ExecuteReader

        READER.Close()

        For i As Integer = 1 To 20
            'Dim mysqlconn As MySqlConnection
            mysqlconn = New MySqlConnection

```

```

mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
'Dim READER As MySqlDataReader
mysqlconn.Open()
Try

    'Dim Query As String
    Query = "insert into login.phase (value1,time) values ('" &
        i & "',''" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f", ci)) & "')"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()

Outstring = "APPL " + Convert.ToString(i) + ", 0.01"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(100)

Next
'Thread.Sleep(200)
Outstring = "APPL " + Convert.ToString(0) + ", 0.0"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(100)

mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
mysqlconn.Open()

```

```
Query = "select idfrequency from frequency where (frequency.time
        >= (select max(time) from attenuation) AND
        substr(frequency.value,1,4) between 2000 and 2500)"
```

```
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
```

```
If Convert.ToInt32(COMMAND.ExecuteScalar()) = 0 Then
```

```
    MyRudat.SetAttenuation(val - pas)
```

```
    val = val - pas
```

```
Else
```

```
    MyRudat.SetAttenuation(val + pas / 2)
```

```
    val = val + pas / 2
```

```
    pas = pas / 2
```

```
End If
```

```
READER.Close()
```

```
mysqlconn.Close()
```

```
Catch ex As MySqlException
```

```
    MessageBox.Show(ex.Message)
```

```
Finally
```

```
End Try
```

```
End While
```

```
For Each p As Process In arrProcess
```

```
    p.Kill()
```

```
Next
```

```
MessageBox.Show("peak found")
```

End Sub

La fonction ci-dessus sert à chercher le sommet de la courbe de résonance en amplitudes sans recourir à un balayeur de fréquences, on évalue juste la présence d'oscillation avec un fréquencemètre. On commence par des initialisations des équipements. On initialise le générateur de tension relié aux déphaseurs en utilisant les fonctions prédéfinies dans le fichier Gpib-32.vb qu'on doit inclure dans le dossier de l'application. On continue avec l'initialisation du gain maximal et du pas de déplacement. Ensuite, on lance un programme auxiliaire responsable de collecter les mesures des fréquences. Ces mesures sont enregistrées dans une base de données SQL que nous devons exploiter. Pour ce faire, nous créons des objets de connexion pour faire les requêtes et transporter l'information. On a fait une boucle allant de 1 à 20 pour balayer toute la bande de 360 degrés puis on la ferme avec un test pour la valeur 0. Après le stockage des mesures, on récupère ces informations en envoyant des requêtes SQL. Dans ce cas, on se contente de vérifier l'existence d'au moins une valeur non nulle pour prendre la décision. En fait, l'absence des valeurs non nulles signifie pas d'oscillation et ainsi, on descend avec la valeur d'un pas. Sinon, on monte avec la moitié de ce pas. Finalement, on ferme le programme auxiliaire de recherche des fréquences. Ce processus est répété jusqu'à atteindre la limite de l'atténuateur programmable qui est 0.1db ou arriver à la valeur 0 de cet atténuateur ce qui est très difficile à avoir et à chaque tour, on enregistre la nouvelle valeur de l'atténuation. À la fin, un message qui indique le positionnement au niveau du sommet s'affiche.

```
Private Sub Button2_Click_1(sender As Object, e As EventArgs) Handles
```

```
    Button2.Click
        Dim status As Integer, val As Single
        Timer1.Enabled = True
        'Timer1.Enabled = True
        status = MyCounter.Connect
        If status <= 0 Then
            MsgBox("Freq Counter not connected")
            Me.Close()
        End If
        MyCounter.SetSampleTime(0.1)
        Dim mysqlconn As MySqlConnection

        'Dim mysqlconn As MySqlConnection
        mysqlconn = New MySqlConnection
```

```

mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
'Dim READER As MySqlDataReader
Try
    mysqlconn.Open()

    Dim Query As String

    Query = "select attenuation.value from attenuation where
            idattenuation=(select max(idattenuation) from attenuation)"

    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    TextBox2.Text = COMMAND.ExecuteScalar()
    val = Convert.ToSingle(TextBox2.Text) - 3
    If val Mod 1 >= 0.85 Then
        val = Math.Floor(val) + 1
    ElseIf val Mod 1 >= 0.65 Then
        val = Math.Floor(val) + 0.75
    ElseIf val Mod 1 >= 0.4 Then
        val = Math.Floor(val) + 0.5
    ElseIf val Mod 1 >= 0.15 Then
        val = Math.Floor(val) + 0.25
    Else
        val = Math.Floor(val)
    End If
    Console.WriteLine(val)
    status = MyRudat.SetAttenuation(val)

    mysqlconn.Close()

Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try

```

```

Call Resets()
Call GPIB32Funcs.SendIFC(0)          'pulse IFC
If (GPIB32Funcs.ibsta And GPIB32Funcs.EERR) Then
    'txtResults.Text = "SendIFC Error"

Else

    'txtResults.Text = "Interface Clear sent"
End If
Call ErrorChecking()                'Error Checking
Dim eotmode As Short
Dim Outstring As String
Outstring = "VOLT:RANG P20V"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "APPL " + Convert.ToString(0) + ", 0.0"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "VOLT:STEP 0.4"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
'Thread.Sleep(100)
'sends command string to a specified device
For i As Integer = 1 To 50

    mysqlconn = New MySqlConnection
    mysqlconn.ConnectionString =
        "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
    Dim READER As MySqlDataReader
    mysqlconn.Open()
    Try

        Dim Query As String

```

```

        Query = "insert into login.phase (value1,time) values ('" & i &
            "'','" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f", ci)) & "')"
        COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
        READER = COMMAND.ExecuteReader

    Catch ex As MySqlException
        MessageBox.Show(ex.Message)
    Finally

End Try
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
Outstring = "VOLT UP"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(150)
Try
    mysqlconn.Open()
    status = MyCounter.ReadFreq(Freq)
    'Thread.Sleep(10)

    Dim Query As String
    Query = "insert into login.frequency2 (value,time) values ('" &
        Freq & "'','" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f", ci)) & "')"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
Next
Outstring = "APPL " + Convert.ToString(0) + ", 0.0"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend

```

```

    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)

    MessageBox.Show("-3db points found")
End Sub

```

On récupère la dernière valeur de l'atténuation qui indique la valeur actuelle de l'atténuateur. On fait des approximations pour la valeur obtenue pour avoir un terme divisible par 0.25 : c'est une spécification de l'atténuateur. Ensuite nous réduisons le pas de déplacement de la tension qui était à 1volt pour devenir 0.4 volt. On balaye toute la bande en enregistrant à chaque fois la mesure de fréquence. Finalement, un message indique la fin de cette opération et la détermination des points voulus à -3db.

```

Private Sub Button4_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button4.Click

    Dim mysqlconn As MySqlConnection
    mysqlconn = New MySqlConnection
    mysqlconn.ConnectionString =
        "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
    Dim READER As MySqlDataReader
    Try
        mysqlconn.Open()

        Dim Query As String
        Query = "select frequency2.value from frequency2 where
                frequency2.value between 2000 and 2500 "
        COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

        READER = COMMAND.ExecuteReader

        f = 0
        If READER.HasRows Then
            Do While READER.Read()

                arr(f) = READER.GetString(0)
            Loop
        End If
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show(ex.Message)
    End Try
End Sub

```

```

        Console.WriteLine(arr(f))
        f = f + 1

Loop
Dim s, b, m As Integer
b = 0
For s = 0 To f - 2
    If arr(s + 1) - arr(s) >= 0.01 Then
        vector(b) = arr(s + 1) - arr(s)
        Console.WriteLine(vector(b))
        v(b) = arr(s)
        b = b + 1
    End If
Next
m = 0
For s = 1 To b - 2
    If vector(s) < vector(m) And vector(m) > 0 Then
        m = s
    End If
Next
Dim max, min As String
max = 0
min = 0
For s = 0 To f - 1
    If arr(s) > arr(max) Then
        max = s
    End If
    If arr(s) < arr(min) Then
        min = s
    End If
Next
q = ((vector(m) / 2) + v(m)) / (arr(max) - arr(min))
w0 = (vector(m) / 2) + v(m)
dw0 = vector(m)
TextBox3.Text = q
TextBox4.Text = w0
TextBox5.Text = dw0
j = b

```

```

        h = m
        Console.WriteLine((vector(m) / 2) + v(m))
        Console.WriteLine(arr(0))
        Console.WriteLine(arr(f - 1))
        Console.WriteLine(((vector(m) / 2) + v(m)) / (arr(f - 1) - arr(0)))
    Else
        Console.WriteLine("No rows found.")
    End If
    READER.Close()

Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)

End Try

End Sub

```

Cette fonction permet de déterminer la fréquence de résonance ainsi que le facteur de qualité. On récupère toutes les mesures obtenues dans l'étape précédente après le changement du pas. On place ces valeurs dans un tableau "arr()" et la différence entre deux éléments consécutifs est enregistrée dans une autre variable "vector()". On cherche les différences car on a besoin de les comparer et la différence la plus petite contient la fréquence de résonance. Nous faisons une approximation disant que la fréquence en question est le milieu de la plus petite différence. Le facteur de qualité absolu est déterminé suivant la formule suivante :

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (\text{B.1})$$

et ainsi on obtient les paramètres de la cavité vide.

```

Private Sub Button5_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles Button5.Click
    Timer1.Enabled = True
    status = MyCounter.Connect
    If status <= 0 Then
        MsgBox("Freq Counter not connected")
        Me.Close()
    End If
End Sub

```

```

End If
MyCounter.SetSampleTime(0.1)
Dim c As Integer = 0
Dim val As Single
status = MyRudat.Read_Att(val)
Dim pas As Double = 2

Call Resets()
Call GPIB32Funcs.SendIFC(0)           'pulse IFC
If (GPIB32Funcs.ibsta And GPIB32Funcs.EERR) Then
    'txtResults.Text = "SendIFC Error"

Else

    'txtResults.Text = "Interface Clear sent"
End If
Call ErrorChecking()                 'Error Checking
Dim eotmode As Short
Dim Outstring As String
Outstring = "INST:SEL OUT1"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "VOLT:RANG P20V"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
'myProcess =

'Dim status As Integer, val As Single

'val = CSng(TextBox1.Text)
Dim mysqlconn As MySqlConnection
mysqlconn = New MySqlConnection
mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
Dim READER As MySqlDataReader

```

```

Dim COMMAND As MySqlCommand
Try
    mysqlconn.Open()
    'Thread.Sleep(10)

    Dim Query As String
    Query = "delete from frequency4"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    READER.Close()
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Dispose()
    'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
Try
    mysqlconn.Open()
    'Thread.Sleep(10)

    Dim Query As String
    Query = "delete from frequency3"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    READER.Close()
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Dispose()
    'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
Try
    mysqlconn.Open()
    'Thread.Sleep(10)

```

```

Dim Query As String
Query = "delete from attenuation2"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
READER.Close()
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try

```

Maintenant, on s'intéresse à la détermination du facteur de qualité relatif qui correspond à la cavité après l'insertion de l'échantillon. On initialise les composants électroniques notamment le générateur et le fréquencesmètre. L'initialisation est importante au début de chaque fonction car il se peut qu'on a utilisé le système avec d'autres configurations qui ne marchent pas avec la configuration actuelle. Ensuite, on efface les bases de données transitoires comme "frequency3" par exemple. Cette opération nous permet d'effectuer plusieurs mesures de facteurs relatifs si on a déterminé le facteur absolu au début. Elle nous évite d'avoir des valeurs restantes des expériences précédentes.

```

Dim leave As Boolean = False
While leave = False
    Try
        mysqlconn.Open()

        Dim Query As String
        Query = "insert into login.attenuation2 (value,time) values ('" &
            val & "',''" & Date.Now.ToString("hh mm ss.f") & "')"
        COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

        READER = COMMAND.ExecuteReader

        READER.Close()
        For i As Integer = 1 To 20

```

Try

```

mysqlconn = New MySqlConnection

mysqlconn.Open()
'    Try
Outstring = "APPL " + Convert.ToString(i) + ", 0.01"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(50)

status = MyCounter.ReadFreq(Freq)
Thread.Sleep(10)

'Dim Query As String
Query = "insert into login.frequency4 (value,time) values
        ('" & Freq & "','" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f",
        ci)) & "')"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
Thread.Sleep(10)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try

READER.Close()
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()

```

Next

```

'Thread.Sleep(200)
Outstring = "APPL " + Convert.ToString(0) + ", 0.0"

```

```

eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(10)

'mysqlconn.Close()
'mysqlconn.Dispose()
'Application.Exit()
mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
mysqlconn.Open()

Query = "select idfrequency4 from frequency4 where
        (frequency4.time >= (select max(time) from attenuation2) AND
        substr(frequency4.value,1,4) between 2000 and 2500)"

COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

If Convert.ToInt32(COMMAND.ExecuteScalar()) = 0 Then
    MyRudat.SetAttenuation(val - pas)
    val = val - pas
    c = c + 1
Else

    leave = True

End If
READER.Close()
mysqlconn.Close()

Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally
    '    If pas <= 0.01 Then
    '        System.Windows.Forms.Application.Exit()
    'End If

```

End Try

End While

On continue dans la recherche du facteur de qualité relatif. On commence par un test qui permet au système de s'adapter automatiquement au niveau de pertes du matériau. On balaye toute la bande des phases rapidement jusqu'à retrouver l'oscillation et ainsi on garantit l'obtention des valeurs non nulles pour les paramètres recherchés. La sous fonction responsable de cette tâche se termine avec la variable "leave" rendue à "true". La base de données "attenuation2" permet de stocker les niveaux d'atténuation à chaque niveau lors de la recherche du facteur de qualité relatif. La variable "c" contient le nombre de fois de descente de l'atténuateur c'est à dire 2db de moins dans l'atténuation.

Nous pouvons fixer le niveau d'atténuation à une valeur arbitraire comme le 0 pour tous les échantillons mais puisque le pas de différence de fréquences noté en balayant les phases change d'un échantillon à un autre à cause de la différence des niveaux de pertes, on risque d'avoir des résultats erronés.

```
Dim facteur As Integer = 1.7
```

```
mysqlconn = New MySqlConnection
mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
'Dim READER As MySqlDataReader
Try
    mysqlconn.Open()

    Dim Query As String

    Query = "select attenuation.value from attenuation where
            idattenuation=(select max(idattenuation) from attenuation)"

    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    TextBox2.Text = COMMAND.ExecuteScalar()
    val = Convert.ToSingle(TextBox2.Text) - 3
    Console.WriteLine(val)
    status = MyRudat.SetAttenuation(val)
```

```

        mysqlconn.Close()

Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
status = MyRudat.SetAttenuation(val - 3 - c * 2)

Call Resets()
Call GPIB32Funcs.SendIFC(0)           'pulse IFC
If (GPIB32Funcs.ibsta And GPIB32Funcs.EERR) Then
    'txtResults.Text = "SendIFC Error"

Else

    'txtResults.Text = "Interface Clear sent"
End If
Call ErrorChecking()                 'Error Checking
'Dim eotmode As Short
'Dim Outstring As String
Outstring = "INST:SEL OUT1"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "VOLT:RANG P20V"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(10)
Outstring = "APPL " + Convert.ToString(1) + ".0, 0.01"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()

```

```

Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "INST:SEL OUT2"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "VOLT:RANG P20V"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(10)
Outstring = "APPL 0.1, 0.1"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
    Dim nonarret As Boolean
nonarret = True
Dim compt As Integer
compt = 1
While nonarret And compt < 25
    compt = compt + 1
    Outstring = "INST:SEL OUT1"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend
    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
    Outstring = "VOLT:STEP 0.8"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend
    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
    'Thread.Sleep(100)

    Outstring = "VOLT UP"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend
    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
    Thread.Sleep(300)

```

Try

```
mysqlconn.Open()
```

```

status = MyCounter.ReadFreq(Freq)
'Thread.Sleep(10)

Dim Query As String
Query = "insert into login.frequency3 (value,time) values ('" &
    Freq & "',''" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f", ci)) & "')"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
,

mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
'Dim Query As String
Thread.Sleep(100)
mysqlconn.Open()

Query = "select idfrequency3 from frequency3 where
    frequency3.value between 2000 and 2500"

COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

If Convert.ToInt32(COMMAND.ExecuteScalar()) = 0 Then

Else
    nonarret = False
End If
READER.Close()
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
End While

```

On poursuit avec la recherche. On définit le pas de variation de la tension déterminé dans ce qui précède. En fait, la valeur de 1.7 correspond au changement de 7.378 degrés pour ajuster les deux pas des deux déphaseurs. On récupère la valeur du niveau de sommet une autre fois car comme nous avons dit : on calcule le facteur de qualité absolu une seule fois au début puis on effectue plusieurs mesures après la perturbation donc le niveau d'atténuation change et on doit le rendre au sommet. A partir du sommet, on descend avec l'atténuateur d'une valeur de $-c*2-3$. On a multiplié c par 2 car le pas de descente est défini dès le début à 2db et on a retranché 3db pour être dans le même niveau de calcul de la fréquence de résonance dans la recherche du facteur absolu.

Une fois placé au niveau du sommet, on commence le balayage de toute la bande. Le pas de variation de la tension est défini à 0.8 volts pour aller plus vite car généralement la fréquence de résonance ne se trouve pas sur les bords de la zone d'oscillation. La recherche d'oscillation doit couvrir toute la bande, c'est pourquoi, on définit un compteur ayant une limite de 25 car $0.8*25=20$. La présence d'oscillation arrête ce processus en changeant la variable "nonarret" à false.

```

Dim nostop As Boolean
nostop = True

Dim o, compteur As Integer
o = 0
t = 0
compteur = compt * 2
While nostop And compteur <= 48

    compteur = compteur + 1
    Outstring = "INST:SEL OUT1"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend
    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
    Outstring = "VOLT:STEP 0.4"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend
    Call Resets()
    Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
    Outstring = "VOLT UP"
    eotmode = GPIB32Funcs.NLend

```

```

Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(100)
Outstring = "INST:SEL OUT2"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)

Outstring = "VOLT:STEP " + Convert.ToString(facteur) + ""
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "VOLT UP"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)

Thread.Sleep(300)
Try
    mysqlconn.Open()
    status = MyCounter.ReadFreq(Freq)
    'Thread.Sleep(10)

    Dim Query As String
    Query = "insert into login.frequency3 (value,time) values ('" &
        Freq & "', '" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f", ci)) & "')"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
Outstring = "VOLT:STEP " + Convert.ToString(facteur) + ""

```

```

eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Outstring = "VOLT DOWN"
eotmode = GPIB32Funcs.NLend
Call Resets()
Call GPIB32Funcs.Send(0, addr, Outstring, eotmode)
Thread.Sleep(300)
Try
    mysqlconn.Open()
    status = MyCounter.ReadFreq(Freq)
    'Thread.Sleep(10)

    Dim Query As String
    Query = "insert into login.frequency3 (value,time) values ('" &
        Freq & "',''" & (Date.Now.ToString("hh mm ss.f", ci)) & "')"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    'Thread.Sleep(100)
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

End Try

```

Le pas de variation de la tension change ici pour devenir 0.4. Ce changement vise à avoir une recherche plus minutieuse car maintenant nous sommes dans la zone d'oscillation et la fréquence de résonance est sûrement là-bas. On remarque aussi que le compteur est doublé et la limite aussi à cause de la multiplication du pas par deux. On travaille avec les deux déphaseurs donc les deux sorties du générateur de tension. Le déphaseur analogique permet de changer le niveau de puissance et on fixe ce niveau puis on change la phase une fois vers le haut et une fois vers le bas avec le déphaseur numérique commandé par le générateur de tension avec les deux commandes "VOLT UP" et "VOLT DOWN".

```

mysqlconn.Close()
mysqlconn.Dispose()
Try
    mysqlconn.Open()

```

```

Dim Query As String
Query = "SELECT frequency3.value FROM frequency3 ORDER BY
        idfrequency3 DESC LIMIT 2 "
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

READER = COMMAND.ExecuteReader

't = 0
If READER.HasRows Then
    Dim z As Integer = 0
    Do While READER.Read()

        vect(t) = READER.GetString(0)

        z = z + 1
        Console.WriteLine(vect(t))
        t = t + 1

    Loop
    Dim s, x As Integer
    's = 0
    'm = 0

    If ((vect(t - 2) < 2500) And (2000 < (vect(t - 2)))) And ((2000
        < vect(t - 1)) And (vect(t - 1) < 2500)) And (vect(t - 2) -
        vect(t - 1) > 0.01) And z >= 2) Then
        v1(o) = vect(t - 2) - vect(t - 1)
        v2(o) = vect(t - 1)
        Console.WriteLine(v1(o))
        Console.WriteLine(v2(o))
        o = o + 1
    End If

    x = 0

```

```

If o >= 2 Then
    For s = 1 To o - 1
        If v1(s) < v1(x) And v1(s) <> 0 Then
            x = s
        End If
    Next
End If
If o >= 3 Then
    If (x = o - 3 And v1(o - 1) < v1(o - 2)) Or v1(x) = 0 Then
        v1(x) = 2
    End If
    x = 0
    If o >= 2 Then
        For s = 1 To o - 1
            If v1(s) < v1(x) And v1(s) <> 0 Then
                x = s
            End If
        Next
    End If
End If

'If x <> o - 1 And o = 2 Then
'    go = False
'End If
If o >= 3 Then
    If (v1(o - 3) < v1(o - 2) And (v1(o - 2) < v1(o - 1) Or
        v1(o - 3) < v1(o - 1)) And o >= 10) Then
        nostop = False
    End If
End If
If compteur = 48 Or o >= 6 Then
    nostop = False
End If
If nostop = False Then
    w0s = v2(x) + v1(x) / 2
    dw0s = v1(x)
End If

```

```

        'Console.WriteLine(qs)
        'Console.WriteLine(v2(x) + v1(x) / 2)
    Else
        Console.WriteLine("No rows found.")
    End If
    READER.Close()

    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Dispose()

    Catch ex As MySqlException
        MessageBox.Show(ex.Message)

    End Try

End While
Console.WriteLine(w0s)
Console.WriteLine(dw0s)
TextBox6.Text = Convert.ToString(w0s)
TextBox7.Text = Convert.ToString(dw0s)
Thread.Sleep(100)
'q = ((vector(h) / 2) + arr(h)) / (arr(j - 1) - arr(0))
'w0 = (vector(h) / 2) + arr(h)
'dw0 = vector(h)
TextBox8.Text = (TextBox3.Text * TextBox5.Text * TextBox6.Text) /
    (TextBox7.Text * TextBox4.Text)

End Sub

```

On récupère les valeurs de fréquence acquises lors de l'application de la première partie de l'algorithme de recherche du facteur de qualité relatif et on les place dans un tableau intitulé "vect()". La variable t est incrémentée de 1 à chaque ajout de valeur dans le tableau. La variable z est utilisée pour protéger le tableau. En fait, parfois $t < 2$ et lorsqu'on fait $t-2$, l'application plante. Ainsi, en imposant $z \geq 2$, on contourne ce problème.

Le tableau v1() est utilisé pour enregistrer les différences de fréquences et le tableau v2() contient les bornes supérieures des zones de différence. A chaque pas avancé, on vérifie si

on a dépassé la zone des différences minimale ou pas en faisant un test simple : si la plus petite zone des différences n'est pas la dernière, alors on conclut qu'elle est sûrement avant dernière car les différences diminuent jusqu'au niveau de la fréquence de résonance puis elles augmentent.

On a limité ces tests jusqu'à atteindre la limite de la bande (48 : limite du compteur) et on a limité aussi le nombre de zones trouvés à 10 car au delà de cette valeur, nous avons remarqué que le fréquencemètre prélève des valeurs très proches car il n'arrive plus à suivre davantage la variation de la tension.

Finalement, il ne reste que calculer le facteur de qualité relatif en utilisant la formule suivante :

$$Q_r = Q_l \left(\frac{\Delta\omega_0}{\Delta\omega_r} \right) \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (\text{B.2})$$

```
Dim message1, title1, defaultValue1, matname As String
```

```

' Set prompt.
message1 = "Enter the name of the material"
' Set title.
title1 = "information gathering"
defaultValue1 = "" ' Set default value.

' Display message, title, and default value.
myValue = InputBox(message1, title1, defaultValue1)
' If user has clicked Cancel, set myValue to defaultValue
If myValue Is "" Then myValue = defaultValue1
matname = myValue

Dim message, title, defaultValue As String
' Set prompt.
message = "Enter the volume of the sample in mm^3"
' Set title.
title = "information gathering"
defaultValue = "1" ' Set default value.

' Display message, title, and default value.
myValue = InputBox(message, title, defaultValue)
' If user has clicked Cancel, set myValue to defaultValue
If myValue Is "" Then myValue = defaultValue
'Console.WriteLine(myValue)
```

```

'' Display dialog box at position 100, 100.
myValue = InputBox(message, title, defaultValue, 100, 100)
'' If user has clicked Cancel, set myValue to defaultValue
'If myValue Is "" Then myValue = defaultValue
Dim vc As String = 268714
TextBox9.Text = 1 + 0.539 * (vc / myValue) * ((TextBox4.Text -
    TextBox6.Text) / TextBox6.Text)
TextBox10.Text = System.Math.Abs(0.269 * (vc / myValue) * (1 /
    TextBox8.Text - 1 / TextBox3.Text))
Dim mysqlconn As MySqlConnection
mysqlconn = New MySqlConnection
mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
Dim READER As MySqlDataReader

Try
    mysqlconn.Open()

    Dim Query As String
    '
        Query = "Data Source=MSSQL1;" & _
    ' "Initial Catalog=AdventureWorks;Integrated Security=SSPI;" & _
    ' "MultipleActiveResultSets=True"
    '
        COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

    '
        READER = COMMAND.ExecuteReader
    Query = "insert into login.history
        (name,time,volume,report,impart,Qfactor,resfreq) values ('" &
        matname & "',''" & Date.Now.ToString("MM/dd/yy") & "',''" & myValue
        & "',''" & TextBox9.Text & "',''" & TextBox10.Text & "',''" &
        TextBox8.Text & "',''" & TextBox6.Text & "')"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)

    READER = COMMAND.ExecuteReader

    READER.Close()
Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

```

'End If

End Try

End Sub

On suppose maintenant que les paramètres de la cavité avant et après la perturbation ont été déterminés. Une première fenêtre s'ouvre et demande à l'utilisateur d'indiquer le nom du matériau en question. Une deuxième fenêtre demande le volume de l'échantillon mesuré en mm^3 . Les informations introduites par l'opérateur sont enregistrées dans une base de données nommée "history".

Le volume de la cavité vide est 268714 mm^3 et les deux parties de la permittivité complexe sont calculées en utilisant les deux expressions suivantes :

$$\epsilon'_1 = 1 + 0.539 \left(\frac{V_c}{V_s} \right) \frac{\delta f}{f} \quad (\text{B.3})$$

$$\epsilon'_2 = 0.269 \left(\frac{V_c}{V_s} \right) \delta \left(\frac{1}{Q_l} \right) \quad (\text{B.4})$$

Erase array, arr, vector, vect, v1, v2, v

TextBox3.Text = Nothing

TextBox4.Text = Nothing

TextBox5.Text = Nothing

TextBox6.Text = Nothing

TextBox7.Text = Nothing

TextBox8.Text = Nothing

c = Nothing

q = Nothing

qs = Nothing

w0 = Nothing

dw0 = Nothing

w0s = Nothing

dw0s = Nothing

i = Nothing

f = Nothing

t = Nothing

j = Nothing

h = Nothing

```

myValue = Nothing
Dim mysqlconn As MySqlConnection
mysqlconn = New MySqlConnection
mysqlconn.ConnectionString =
    "server=localhost;userid=root;password=pdf123;database=login"
Dim READER As MySqlDataReader

Try
    mysqlconn.Open()
    Dim Query As String
    Query = "delete from frequency"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Open()
    Query = "delete from attenuation"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Open()
    Query = "delete from attenuation2"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Open()
    Query = "delete from phase"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Open()
    Query = "delete from frequency2"
    COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
    READER = COMMAND.ExecuteReader
    mysqlconn.Close()
    mysqlconn.Open()
    Query = "delete from frequency3"

```

```

COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Open()
Query = "delete from frequency4"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Open()
Query = "ALTER TABLE frequency AUTO_INCREMENT=0"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Open()
Query = "ALTER TABLE frequency2 AUTO_INCREMENT=0"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Open()
Query = "ALTER TABLE frequency3 AUTO_INCREMENT=0"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Open()
Query = "ALTER TABLE attenuation AUTO_INCREMENT=0"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()
mysqlconn.Open()
Query = "ALTER TABLE phase AUTO_INCREMENT=0"
COMMAND = New MySqlCommand(Query, mysqlconn)
READER = COMMAND.ExecuteReader
mysqlconn.Close()

Catch ex As MySqlException
    MessageBox.Show(ex.Message)
Finally

```

```
        mysqlconn.Dispose()  
    End Try  
    System.Windows.Forms.Application.Exit()  
End Sub
```

La dernière étape est de fermer l'application en fermant la fenêtre principale. On doit vider le contenu des variables pour toute utilisation ultérieure. Pour les tableaux, on utilise "Erase" et pour les autres variables comme les entiers, on utilise l'affectation de la valeur "Nothing". De plus, on vide le contenu des bases de données utilisées en cours de route avec la requête SQL commençant par "delete". L'autre requête a pour but de recommencer le comptage des items ajoutés à la base de données à partir de 1 pour améliorer la présentation et faciliter la manipulation.

ANNEXE C CALCUL DES PARAMÈTRES DE LA CAVITÉ À PARTIR DE LA COURBE DE RÉSONANCE

On a extrait les coefficients des courbes de résonance des différents matériaux puis on a fait le traitement avec ADS. Nous incluons un échantillon qui montre l'étape finale de notre procédure.

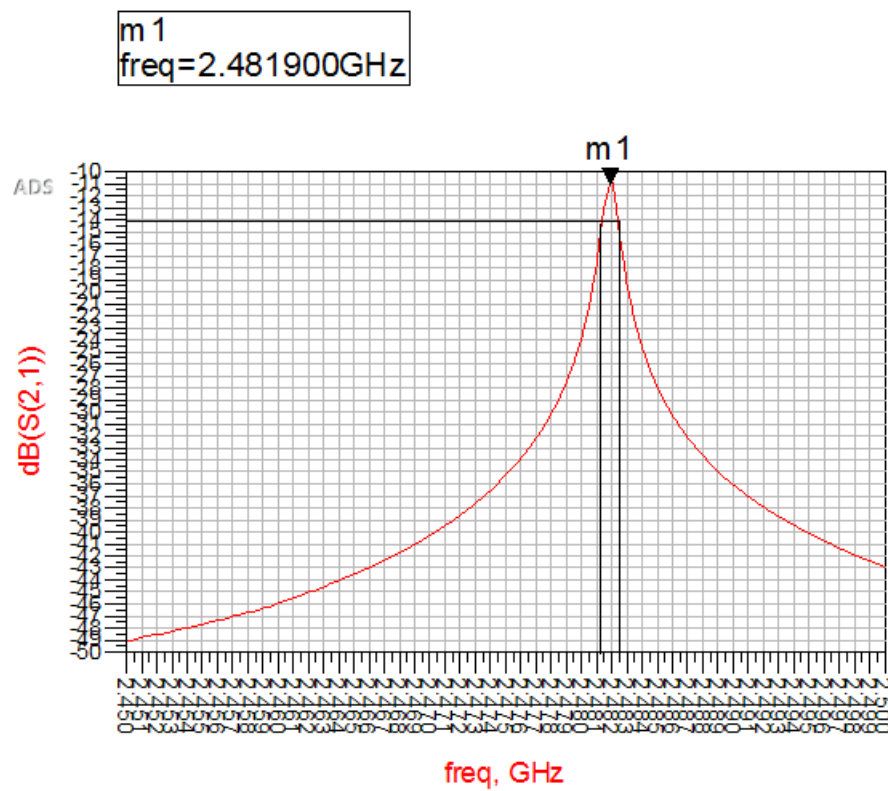


Figure C.1 Courbe du téflon.

ANNEXE D APPLICATION DÉVELOPPÉE

Dans cette section, nous présentons les différentes fenêtres de notre application.



Figure D.1 Étape d'identification.

name	time	volume	input	output
luffon	05-17-17	770	2.965206099967	0.054164024826
luffon	05-29-17	770	2.044813196196	0.02704019491
luffon	06-01-17	770	2.028624796890	0.026028367962
luffon	06-06-17	770	2.051003363735	0.015050500875
luffon	06-06-17	770	2.051658085621	0.959553269731
luffon	06-06-17	770	2.042517584607	0.006064660679
durand 6002	06-06-17	417	2.864369607840	0.032355286088
caoutchouc	06-06-17	452	4.033589496306	0.032069628369
plastique	06-06-17	500	2.627687935737	0.022535014432
durand 6006	06-06-17	596	6.333133014001	0.054496060906
durand 6010	06-06-17	300	12.0299005743	0.075409947017
carbon	06-06-17	110	2.567632199543	1.380227891514
eau pure	06-06-17	25	85.77631603015	6.547629630672
acétone	06-06-17	25	25.54204009024	8.331802909022
2-propanol	06-06-17	25	3.9196320267038	7.525522217277
methanol	06-06-17	25	38.43246055199	4.060092329586
1-butanol	06-06-17	25	3.082792521054	8.604893798748
1-butanol	06-06-17	25	7.5029135811487	3.545836652314
carbon	06-08-17	100	4.002404722053	0.535514109133
verre	06-08-17	680	4.261289641216	0.020812231682
verre	06-08-17	680	4.29657599405	0.00308421787
carbon	06-08-17	110	3.632340190077	1.616018026572
durand 6002	06-08-17	417	2.73210190942	0.021689489803
durand 6006	06-08-17	596	6.360249597189	0.007348130268
durand 6010	06-08-17	300	12.553204760335	0.039548598385

Figure D.2 Fenêtre principale.

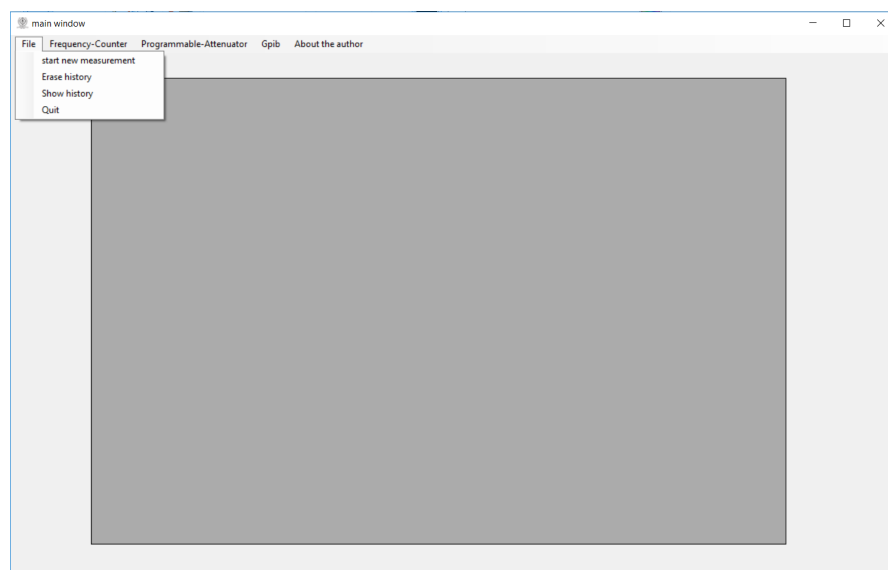


Figure D.3 Sous menu du fichier.

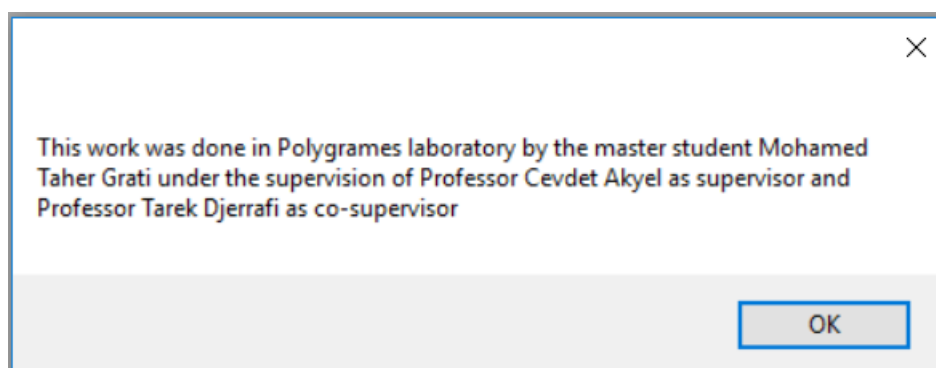


Figure D.4 Détails de l'application.

Form1

Complex permittivity

Attenuation:

attenuation of the peak:

absolute Q factor:

resonant frequency 1 (MHz):

minimum frequency difference 1:

resonant frequency 2 (MHz):

minimum frequency difference 2:

relative Q factor:

complex permittivity: Real part Imaginary part

Guidelines

- 1) Click on 'oscillation' button to start searching the summit of the peak
- 2) Click on '-3db points' button to sweep the whole bandwidth at the level of -3db from the summit
- 3) Click on 'absolute Q' button to calculate Q factor within an empty cavity
- 4) Insert the sample inside the cavity
- 5) Press 'relative Q' button to find out the variation after inserting the sample
- 6) Press 'permittivity' button to calculate the two parts of this quantity

Figure D.5 Module de la recherche de la permittivité.

Please follow carefully those steps:

- switch on the beige power supply and rise the voltage to 28v
- switch on the Agilent power supply and make the output on by clicking on the output button
- open the instek power supply and put the voltage 5v.

Figure D.6 Fenêtre d'initialisation.

Form1

Complex permittivity

Attenuation: 25,00

oscillation (highlighted) -3db points

relative Q absolute Q

permittivity

Quit

attenuation of the peak

absolute Q factor

resonant frequency 1 (MHz)

minimum frequency difference 1

resonant frequency 2 (MHz)

minimum frequency difference 2

relative Q factor

complex permittivity

Real part

Imaginary part

Guidelines

- 1) Click on 'oscillation' button to start searching the summit of the peak
- 2) Click on '-3db points' button to sweep the whole bandwidth at the level of -3db from the summit
- 3) Click on 'absolute Q' button to calculate Q factor within an empty cavity
- 4) Insert the sample inside the cavity
- 5) Press 'relative Q' button to find out the variation after inserting the sample
- 6) Press 'permittivity' button to calculate the two parts of this quantity

peak found

OK

Figure D.7 Recherche du sommet.

Form1

Complex permittivity

Attenuation: 25,00

oscillation -3db points (highlighted)

relative Q absolute Q

permittivity

Quit

attenuation of the peak: 19,375

absolute Q factor

resonant frequency 1 (MHz)

minimum frequency difference 1

resonant frequency 2 (MHz)

minimum frequency difference 2

relative Q factor

complex permittivity

Real part

Imaginary part

Guidelines

- 1) Click on 'oscillation' button to start searching the summit of the peak
- 2) Click on '-3db points' button to sweep the whole bandwidth at the level of -3db from the summit
- 3) Click on 'absolute Q' button to calculate Q factor within an empty cavity
- 4) Insert the sample inside the cavity
- 5) Press 'relative Q' button to find out the variation after inserting the sample
- 6) Press 'permittivity' button to calculate the two parts of this quantity

-3db points found

OK

Figure D.8 Détermination des points limites à -3db

Form1

Complex permittivity

attenuation of the peak: 19,875

absolute Q factor: 1337,24927660491

resonant frequency 1 (MHz): 2495,5746

minimum frequency difference 1: 0,157200000000103

resonant frequency 2 (MHz): 2481,9099

minimum frequency difference 2:

relative Q factor:

complex permittivity: Real part: , Imaginary part:

Guidelines

- 1) Click on 'oscillation' button to start searching the summit of the peak
- 2) Click on '-3db points' button to sweep the whole bandwidth at the level of -3db from the summit
- 3) Click on 'absolute Q' button to calculate Q factor within an empty cavity
- 4) Insert the sample inside the cavity
- 5) Press 'relative Q' button to find out the variation after inserting the sample
- 6) Press 'permittivity' button to calculate the two parts of this quantity

Buttons: Attenuation: 25,00; oscillation; -3db points; relative Q; absolute Q; permittivity; Quit

Dialog Box: information gathering

Enter the name of the material

OK Cancel

Figure D.9 Insertion du nom de l'échantillon.

Form1

Complex permittivity

attenuation of the peak: 19,875

absolute Q factor: 1337,24927660491

resonant frequency 1 (MHz): 2495,5746

minimum frequency difference 1: 0,157200000000103

resonant frequency 2 (MHz):

minimum frequency difference 2:

relative Q factor: 2078,17629790565

complex permittivity: Real part: , Imaginary part:

Guidelines

- 1) Click on 'oscillation' button to start searching the summit of the peak
- 2) Click on '-3db points' button to sweep the whole bandwidth at the level of -3db from the summit
- 3) Click on 'absolute Q' button to calculate Q factor within an empty cavity
- 4) Insert the sample inside the cavity
- 5) Press 'relative Q' button to find out the variation after inserting the sample
- 6) Press 'permittivity' button to calculate the two parts of this quantity

Buttons: Attenuation: 25,00; oscillation; -3db points; relative Q; absolute Q; permittivity; Quit

Dialog Box: information gathering

Enter the volume of the sample in mm³

OK Cancel

Figure D.10 Insertion du volume de l'échantillon.