

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR  
MOHAMED AMINE THAGHRI

ÉTUDE D'UN DIVISEUR DE PUISSANCE EN TECHNOLOGIE DE GUIDE D'ONDES  
INTEGRÉ AU SUBSTRAT POUR LA MULTI-DETECTION DE GAZ

MAI 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**MAITRISE EN GENIE ELECTRIQUE (M. Sc. A.)**

Programme offert par l'Université du Québec à Trois-Rivières

**ÉTUDE D'UN DIVISEUR DE PUISSANCE EN TECHNOLOGIE DE GUIDE D'ONDES INTEGRÉ AU  
SUBSTRAT POUR LA MULTI-DETECTION DE GAZ**

**PAR**

**MOHAMED AMINE THAGHRI**

---

Frédéric DOMINGUE, directeur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

---

François NOUGAROU, évaluateur

Université du Québec à Trois-Rivières

---

Naïmi BOUBAKEUR, évaluateur

Cégép de Trois-Rivières

## Résumé

Durant ces dernières décennies, la recherche et le développement de systèmes de détection environnementaux comme les capteurs d'humidité, de température, de pression, de contrôle de la qualité de l'air ou encore les capteurs de gaz ont progressé. Avec le développement des véhicules à hydrogène qui requiert la mise en place de multi-capteurs performants capable de détecter et de quantifier les niveaux d'hydrogène et d'humidité relative, le déploiement de nouveaux capteurs est nécessaire.

Ce mémoire propose un multicapteur environnemental à base d'un diviseur de puissance intégré au substrat, SIW (de l'anglais « Substrate Integrated Waveguide »). Le multicapteur est intégré par la fonctionnalisation de ses branches. Le matériau sensible qui réalise cette fonctionnalisation est choisi en fonction de la quantité physique à détecter (gaz, température, humidité, etc.). La structure micro-ondes utilisée est récente et offre une nouvelle solution pour la réalisation de multicapteurs environnementaux sensibles et de fabrication simple, réduisant ainsi le coût de cette dernière. En outre, la solution proposée offre la possibilité d'augmenter le nombre de branches intégrées en un seul dispositif pour la détection de plusieurs gaz ce qui augmente la simplicité de fabrication des capteurs destinés à la multi-détection pour une production à l'échelle industrielle. Ce projet de recherche permettra ainsi la compréhension de la dynamique de la multidétection de gaz par l'utilisation d'un nouveau dispositif basé sur les nouvelles catégories de capteurs intégrés au substrat.

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Frédéric Domingue, Professeur à l'Université du Québec à Trois-Rivières de m'avoir accepté dans son équipe. Je lui exprime mes plus vifs remerciements pour son sérieux, sa disponibilité, sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance. Les conseils qu'il a su me communiquer m'ont permis d'apprendre le métier de chercheur et d'accomplir ma tâche dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier tous les membres du laboratoire Microsystèmes et télécommunication LMST pour l'ambiance qui règne au sein de notre équipe

Finalement, mes remerciements vont aussi à ma famille pour le soutien morale et financier, mes amis qui, d'une manière ou d'une autre ont joué un rôle certain dans l'accomplissement de ce travail.

Merci à ceux que j'ai maladroitement oubliés...

# Tables des matières

Résumé.....	3
Remerciements.....	4
Tables des matières .....	5
Liste des figures .....	8
Liste des tableaux.....	11
Chapitre 1 : Introduction .....	12
1.1.    Problématique.....	13
1.2.    Les objectifs et l'originalité du sujet .....	14
Chapitre 2 : Revue de la littérature .....	15
2.1    Introduction .....	15
2.2    Les guides d'ondes .....	15
2.2.1    Généralités .....	15
2.2.2    Principe de fonctionnement .....	17
2.2.3    Analyse.....	17
2.3    Généralité sur les SIW.....	19
2.4    Transition des lignes microrubans aux guides d'ondes intégrés au substrat :.....	22
2.5    Les diviseurs de puissance .....	25
2.5.1    Présentation.....	25

2.5.2	Théorie des diviseurs de puissance .....	26
2.6	Les diviseurs de puissance intégrés au substrat SIW .....	27
Chapitre 3 - Diviseur intégré au substrat pour la multi-détection de gaz .....		30
3.1	Introduction : .....	30
3.2	Conception : .....	31
3.3	Matériaux.....	32
3.3.1	Matériaux présentés dans la littérature pour la détection de gaz .....	32
3.3.2	Matériaux utilisés.....	34
3.3.2.1	Le dioxyde d'étain : SnO <sub>2</sub> .....	34
3.3.2.2	Nano cellulose .....	36
3.3.2.3	L'alcool polyvinyle : le PVOH .....	38
Chapitre 4 - Résultats et discussion .....		40
4.1.	Résultats de détection de l'hydrogène à 2%et discussion : .....	40
4.2.	Résultats de détection de l'humidité et discussion.....	47
4.2.1.	Nanocellulose.....	47
4.2.2.	PVOH :.....	51
4.3.	Considérations de conception.....	53
4.3.1.	Variation des dimensions de la zone fonctionnalisée en considérant une longueur fixe des branches .....	53

4.3.2. Variation de la longueur des branches en considérant des dimensions fixes de la zone fonctionnalisée .....	57
4.3.3. Variation de la longueur des branches et des dimensions de la zone fonctionnalisée.....	60
4.4. Multicapteur à plusieurs branches.....	64
Chapitre 5 : Conclusion.....	66
Références : .....	68

## Liste des figures

Figure 2. 1 : Collection de composants de guide d'ondes standard. ....	17
Figure 2. 2 : Géométrie d'une structure SIW, avec une épaisseur du substrat : h, largeur physique du guide d'ondes : $W_0$ , espacement des vias: p, et diamètre des vias : d .....	20
Figure 2. 3 : Distribution des courants de surface pour le mode $TE_{10}$ .....	21
Figure 2. 4 : Transition d'un SIW vers un microruban avec ses paramètres [17].....	23
Figure 2. 5 : Diviseur de puissance classique .....	26
Figure 2. 6 : Diviseur de puissance en SIW. [23] .....	29
Figure 3. 1: La structure générale d'un diviseur de puissance intégré au substrat. ....	30
Figure 3. 2 : Le multi capteur intégré au substrat à base d'un diviseur de puissance en SIW .....	31
Figure 3. 3 : Le diviseur de puissance proposé .....	32
Figure 3. 4 : Images TEM des échantillons de dioxyde d'étain : a) la poudre non broyées, b) la poudre broyée en 1 heure [2]. .....	35
Figure 3. 5 : Image de la poudre de $SnO_2$ utilisé .....	36
Figure 3. 6: Structure de la cellulose.....	37
Figure 3. 7 : Gauche : Gel de nanofibre de cellulose produit par broyage Masuko (Source d'image : Tiina Pöhler, et al., VTT (2010) À droite : Microscope électronique à balayage (SEM) image de nanofibrilles de cellulose. Echelle : 100 nm (source d'image: VTT). .	37

Figure 3. 8 : À gauche: molécule du PVOH à droite: microbille de PVOH .....	39
Figure 4. 1 : Le banc de test d'hydrogène .....	42
Figure 4. 2 : Schéma de fonctionnement du banc de test.....	42
Figure 4. 3 : Module $S_{21}$ du capteur SIW proposé. ....	43
Figure 4. 4 : Phase $S_{21}$ du capteur SIW proposé. ....	44
Figure 4. 5 : Module $S_{21}$ mesuré à 0% et 2% de $H_2$ .....	45
Figure 4. 6 : Phase mesuré à 0% et 2% $H_2$ .....	45
Figure 4. 7 : Banc de test.....	48
Figure 4. 8 : Module $S_{31}$ mesuré entre 21% et 60% d'humidité .....	49
Figure 4. 9 : Phase $S_{31}$ mesuré entre 21% et 60% d'humidité .....	49
Figure 4. 10 : Phase $S_{31}$ mesuré entre 30% et 65% RH .....	51
Figure 4. 11 : Caractéristiques de sensibilité de la structure proposée :(à gauche) la phase $S_{31}$ mesurée en fonction de la variation de RH. (Droite) variation de phase .....	52
Figure 4. 12 : Différentes longueurs de la zone fonctionnalisé a) $l = 0.25 l_0$ b) $l = 0.5 l_0$ c) $l = l_0$ .....	53
Figure 4. 13 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = l_0$ .....	54
Figure 4. 14: Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = 0.5 l_0$ .....	55
Figure 4. 15: Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = 0.25 l_0$ .....	55
Figure 4. 16 : Le déphasage pour les différentes longueurs de la région fonctionnalisée entre 0% et 2% d'hydrogène .....	56

Figure 4. 17 : Différentes longueurs de la zone fonctionnalisée a) $l = l_0$ b) $l=1.5 l_0$ c) $l=2 l_0$ .....	57
Figure 4. 18 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = l_0$ .....	58
Figure 4. 19 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = 1.5 l_0$ .....	58
Figure 4. 20 : Phase mesurée entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = 2 l_0$ .....	59
Figure 4. 21 : Le déphasage pour les différentes longueurs des branches entre 0% et 2% d'hydrogène .....	60
Figure 4. 22 : Différentes longueurs de la zone fonctionnalisé et des branches a) $l = l_0$ b) $l=0.5 l_0$ c) $l=1.5 l_0$ .....	61
Figure 4. 23 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = l_0$ .....	62
Figure 4. 24 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = 1.5 l_0$ .....	62
Figure 4. 25 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour $l = 0.5 l_0$ .....	63
Figure 4. 26 : Le déphasage pour les différentes longueurs des branches et les différentes longueurs de la zone fonctionnalisé entre 0% et 2% d'hydrogène. ....	64
Figure 4. 27 : Multicapteur à plusieurs branches .....	65

## **Liste des tableaux**

Tableau 3. 1 : Valeurs des paramètres de conception pour le capteur en mm .....	32
Tableau 3. 2 : Quelques matériaux de détection de gaz [30]. .....	33
Tableau 3. 3 : Quelques matériaux des autres grandeurs physiques.[30] .....	33

# Chapitre 1 : Introduction

L’industrie de l’électronique tente de réduire au maximum les coûts de fabrication des circuits pour satisfaire le consommateur ainsi que pour être plus concurrentielle. Les circuits hautes fréquences, qui sont utilisés dans toutes les sphères des télécommunications, sont parfois lourds et imposants selon les technologies utilisées ce qui n’est pas intéressant pour l’intégration de systèmes portables (cellulaires, lecteurs MP3, etc.). Les guides d’ondes rectangulaires sont un bel exemple de composants ayant de très hautes performances, mais encombrants. Une technologie de remplacement a vu le jour il y a quelques années pour pallier ce problème : le guide d’ondes intégré au substrat (SIW) [4]. En effet, ce guide accomplit les mêmes fonctions que les guides d’ondes conventionnels. Ils ont cependant une bien meilleure densité d’intégration et leurs coûts sont moindres ; ils sont directement intégrés dans le substrat (ou PCB) ce qui les rend beaucoup plus compacts. Ils tentent également d’intégrer les différents composants en utilisant un seul procédé de fabrication, plutôt que de les fabriquer séparément et de les assembler par la suite. Par exemple, les filtres, les déphasateurs et les diviseurs de puissance peuvent tous être fabriqués en SIW ce qui a pour effet de diminuer les dimensions du système total et aussi les coûts de fabrication et d’assemblage.

Comme cette technologie présente un fort potentiel d'application, de nombreux projets de recherches portant sur le développement de composants SIW ont été menés. Ainsi plusieurs filtres, coupleurs et antennes à fentes ont déjà été réalisés dans cette technologie.

### **1.1. Problématique**

Une grande variété de capteurs environnementaux est disponible sur le marché actuel. Ces derniers se basent sur différentes technologies. Les détecteurs de gaz les plus fiables et les plus courants sont de type : électrochimiques (EC), catalytiques (CAT), monoxyde de métal (MOS), semi-conducteurs d'oxyde métallique (MOX) et à conductivité thermique (TCD) [1] [2].

Cependant, la plupart de ces derniers reposent sur des principes de détections complexes qui nécessitent souvent d'utiliser des procédés de fabrication très couteux en comparaison avec les procédés classiques utilisés dans le milieu industriel. Ceci entraîne l'intégration d'étapes supplémentaires dans les procédés de fabrication industrielle, et par conséquent, l'augmentation des coûts de production ce qui entraînera, à son tour, un prix très élevé du capteur complet.

En plus des difficultés liées à l'aspect financier, une autre problématique relevée au sujet des capteurs environnementaux actuels est l'écart relativement important qui peut exister en termes de performances entre les spécifications requises en technologies de capteurs [3] et les produits disponibles sur le marché. Les capteurs actuellement disponibles sur le marché ne satisfont pas toujours les critères de vitesse, de temps de réponse, de stabilité en température, de plage de détection ou encore de robustesse.

La majorité des capteurs microondes utilisent généralement une transduction impédance métrique (capacité, résistance) ou potentiométrique afin de convertir la grandeur mesurée en signal électrique exploitable, ce qui nécessite l'intégration d'une alimentation électrique. Il est aussi souvent nécessaire, pour ce type de technologie, de fournir un apport d'énergie pour faciliter l'adsorption et la désorption du paramètre environnemental. Afin de pallier les difficultés reliées à la limitation de ces capteurs en autonomie énergétique, de nombreux travaux de recherche se sont orientés vers les technologies SIW dont le principe de fonctionnement est principalement basé sur la modification de la propagation d'une onde au travers d'un matériau sensible aux paramètres physiques à détecter.

## **1.2. Les objectifs et l'originalité du sujet**

Le but de ce travail de maîtrise est l'étude d'un capteur micro-ondes environnemental basé sur un diviseur de puissance en technologie des guides d'ondes intégrés au substrat pour la multidétection de gaz.

L'accomplissement du projet demande d'acquérir des notions solides sur les technologies et processus de conception des SIWs. De ce fait, et dans un premier temps, une étude bibliographique sur la technologie des guides d'ondes intégrés au substrat sera effectuée afin de maîtriser les méthodes de conception de cette dernière. Ensuite, une étude théorique ainsi qu'une validation par les outils de simulation seront effectuées. Enfin, des tests expérimentaux pour une preuve de concept seront menés.

Ce projet de recherche permettra la compréhension de la dynamique de la multidétection de gaz par l'utilisation d'un nouveau dispositif basé sur les nouvelles catégories de capteurs intégrés au substrat [5] [6].

# Chapitre 2 : Revue de la littérature

## 2.1 Introduction

L'utilisation de la technologie SIW qui de par sa flexibilité est l'une des technologies les plus employées pour le design et la conception de systèmes et sous-systèmes millimétriques et micro-ondes. En effet, ces derniers sont déployés dans un large domaine d'application, car en plus d'avoir les mêmes avantages qu'un guide d'onde classique, à savoir un facteur de qualité élevé, les composants SIW possèdent une faible consommation d'énergie, sont à bas coût et facilement intégrables avec les circuits planaires. Les SIWs possèdent aussi l'avantage d'être transférables sur plusieurs types de substrats : PCB, LTCC [7-9], couche épaisse, impression sur des substrats flexibles tels que les papiers ou plastiques (PET) [10-13].

A noter également que la technologie de fabrication de capteurs intégrés au substrat est bien établie avec des coûts inférieurs à ceux des technologies de fabrication de capteurs commerciaux.

## 2.2 Les guides d'ondes

### 2.2.1 Généralités

En électromagnétisme et en ingénierie des communications, le terme guide d'onde peut se référer à toute structure linéaire véhiculant des ondes électromagnétiques entre ses

extrémités. Cependant, la signification originale et la plus commune [14] est un tuyau métallique creux utilisé pour transporter des ondes radio. Ce type de guide d'ondes est utilisé comme une ligne de transmission principalement à des fréquences micro-ondes, dans le but de relier des émetteurs et récepteurs hyperfréquences à leurs antennes, dans des équipements tels que les ensembles radar, les communications par satellite et les liaisons radio hyperfréquences.

Un guide d'onde diélectrique utilise une tige diélectrique solide plutôt qu'un tuyau creux. Une fibre optique est un guide diélectrique conçu pour fonctionner à des fréquences optiques. Les lignes de transmission telles que le microruban, le guide d'onde coplanaire, le câble stripline ou le câble coaxial peuvent également être considérées comme des guides d'ondes.

Les ondes électromagnétiques dans un guide d'ondes peuvent être imaginées comme se déplaçant à l'intérieur du guide dans un chemin en zigzag, étant réfléchies de façon répétée entre les parois opposées du guide. Pour le cas particulier du guide d'ondes rectangulaire, il est possible de fonder une analyse exacte sur cette vue. Certaines structures, comme les guides d'ondes diélectriques non radiatifs et la ligne de Goubau [14], utilisent à la fois des parois métalliques et des surfaces diélectriques pour confiner l'onde.

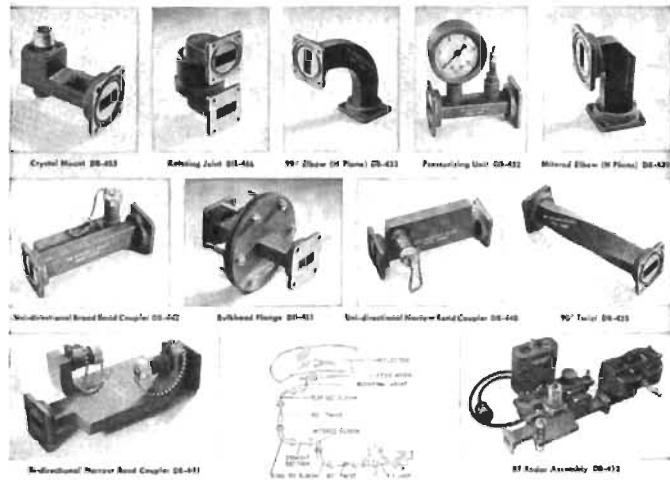


Figure 2. 1 : Collection de composants de guide d'ondes standard.

### 2.2.2 *Principe de fonctionnement*

En fonction de la fréquence, les guides d'onde peuvent être construits à partir de conducteurs ou des matériaux diélectriques. En règle générale, plus la fréquence à transmettre est grande, plus le guide d'ondes est petit et vice versa. Par exemple, le guide d'ondes naturelle de la terre fournies par les dimensions entre l'ionosphère conductrice et le sol, ainsi que la circonférence à l'altitude moyenne de la Terre est résonant à 7,83 Hz. Ceci est connu comme la résonance Schumann [24]. D'autre part, les guides d'ondes utilisées dans les communications à très haute fréquence (EHF) peuvent être d'une largeur de moins d'un millimètre.

### 2.2.3 *Analyse*

Les guides d'ondes électromagnétiques sont analysés en résolvant les équations de Maxwell, ou leur forme réduite, l'équation des ondes électromagnétiques, avec des conditions aux limites déterminées par les propriétés des matériaux et de leurs interfaces. Ces équations ont des multiples solutions ou des modes, qui sont des fonctions propres du système

d'équations. Chacun de ces modes est caractérisé par une fréquence de coupure au-dessous de laquelle le mode ne peut pas exister dans le guide. Les modes de propagation des guides d'ondes dépendent de la commande de longueur d'onde, la polarisation, la forme et la taille du guide. Le mode longitudinal d'un guide d'onde est un motif d'onde stationnaire particulier formé par des ondes confinées dans la cavité. Les modes transversaux sont classés selon différents types :

- Les modes TE (transverse électrique) ne présentent aucun champ électrique dans la direction de propagation.
- Les modes TM (transversal magnétique) ne présentent aucun champ magnétique dans la direction de propagation.
- Les modes TEM (transverse électromagnétique) n'ont aucun champ électrique, ni aucun magnétique dans la direction de propagation.
- Les modes hybrides ont à la fois des composants électriques et magnétiques dans la direction de propagation.

Dans les guides d'ondes creux (conducteur simple), les ondes TEM ne sont pas possibles, puisque les équations de Maxwell ne donneront que le champ électrique qui doit avoir une divergence nulle aux frontières, ce qui entraîne un champ nul (ou, de façon équivalente,  $\nabla^2\Phi = 0$  avec des conditions aux limites garantissant que la solution triviale) Ceci contraste avec les lignes de transmission à deux conducteurs utilisées aux fréquences basses; câble coaxial, ligne de fil parallèle et stripline, dans lesquelles le mode TEM est possible. En outre, les modes de propagation (à savoir TE et TM) à l'intérieur du guide d'ondes peuvent être mathématiquement exprimés par la superposition d'ondes TEM [15].

Le mode avec la fréquence de coupure la plus basse est appelé le mode dominant du guide. Il est fréquent de choisir la taille du guide de manière à ce que seul ce mode puisse exister dans la bande de fréquences d'opération. Dans les guides d'ondes rectangulaires et circulaires (tubes creux), les modes dominants sont respectivement désignés par les modes  $TE_{10}$  et  $TE_{11}$ . [16]

### 2.3 Généralité sur les SIW

Dans la réalisation des circuits micro-ondes et des systèmes millimétriques, les lignes microrubans, servant à la transmission du signal micro-ondes, constituent l'élément central de ces circuits planaires. Les circuits planaires sont connus pour être peu couteux, se combinant aisément avec les circuits intégrés mais également pour leur forte sensibilité aux éventuelles perturbations électromagnétiques des lignes environnantes (diaphonie) et leurs caractéristiques dispersives dans la propagation du signal.

Les guides d'ondes rectangulaires ont longtemps été présentés comme étant l'une des meilleures solutions pour pallier ces difficultés. Cependant, avec la constante augmentation des demandes d'utilisation d'interconnexions large bande et de systèmes électroniques compacts, ces derniers ont vu leur intérêt décroître progressivement, dû à leurs caractères encombrants, très couteux et ne convenant pas à la production de masse.

C'est ainsi, qu'a vu le jour, une alternative dénommée les guides d'ondes intégrés dans un substrat (SIW), considéré comme étant des guides d'ondes, qui peuvent être facilement mis en œuvre en utilisant les méthodes communes de fabrication de circuit imprimé (PCB), capables d'intégrer les futures applications radiofréquence (RF) et ultra - haute fréquence (UHF), présentant de bons facteurs de qualité avec une bonne isolation et résistance aux

perturbations électromagnétiques externes. Depuis l'introduction des SIWs aux systèmes hautement intégrés, de nombreux composants RF ont été remaniés, entre autres des diviseurs de puissance, des coupleurs, diplexeurs, les filtres ou encore cavités résonantes qui auparavant étaient développés en utilisant des microstrips, striplines, etc.

Les guides d'ondes intégrés au substrat sont souvent réalisés à partir des substrats classiques (ROGERS, FR4 ...) et sont formés par deux plans conducteurs, séparés par un substrat diélectrique, avec des parois latérales constituées chacune d'une rangée de cylindres métallisés espacés avec une certaine périodicité. Fig.2.2 montre la géométrie d'une structure SIW. Les cylindres métalliques ou vias des parois latérales sont placés avec un diamètre et une périodicité contrôlée afin de soutenir convenablement la propagation des ondes guidées avec un minimum de pertes par rayonnement. En effet, un espace trop large risque de compromettre la propriété d'isolement de la structure SIW.

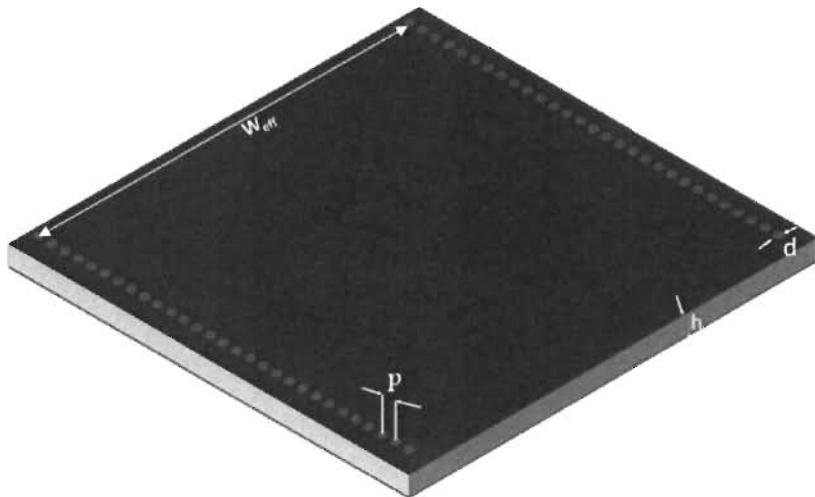


Figure 2. 2 : Géométrie d'une structure SIW, avec une épaisseur du substrat :  $h$ , largeur physique du guide d'ondes :  $W_0$ , espacement des vias:  $p$ , et diamètre des vias :  $d$ .

La largeur de la structure SIW détermine la fréquence de coupure du mode dominant. Les modes TE (transverse électrique) n'ont pas de composantes de champ électrique dans la direction de propagation, tandis que les modes TM (transverse magnétique) n'ont pas de composantes champ magnétique dans la direction de propagation. Les modes transverses magnétiques exigent des courants de surface de paroi latérale longitudinale pour se propager. De même, les modes TEM<sub>n</sub>, où  $n \neq 0$ , exigent des courants de surface de paroi latérale longitudinale de propagation efficace. Comme les parois latérales sont constituées de via métallisés par simplification, nous dirons que les vecteurs de courant de surface sont tirés par le mode dominant TE<sub>10</sub>.

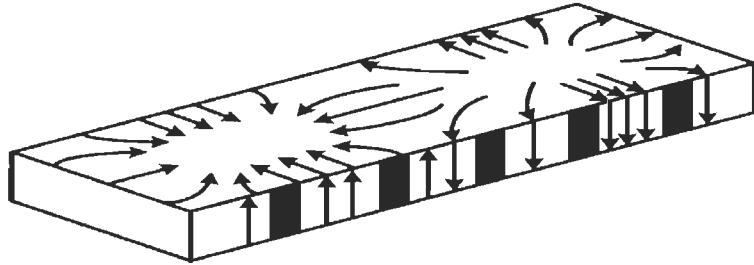


Figure 2. 3 : Distribution des courants de surface pour le mode TE<sub>10</sub>.

La fréquence de coupure d'un guide d'onde rectangulaire classique contenant un diélectrique  $\epsilon_r$  est donnée par (1) [17].

$$f_c = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{W}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2} \quad (2.1)$$

Où W, et L sont la largeur et la longueur du guide d'ondes, respectivement.

Dans [12], il est montré que la structure SIW présente une fréquence de résonance quasi-identique à celle du guide d'ondes classique, en intégrant un facteur de correction qui tient compte du critère de la non-continuité des murs latéraux. Ainsi,  $f$  devient :

$$f_r = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{W_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_{eff}}\right)^2} \quad (2.2)$$

Les dimensions  $L_{eff}$  et  $W_{eff}$  sont déterminées par le diamètre et la période de vias en utilisant l'équation [19] :

$$L_{eff} = L - \frac{d^2}{0.95p}, W_{eff} = W - \frac{d^2}{0.95p} \quad (2.3)$$

Les pertes par radiation sont négligeables par rapport aux autres pertes si  $p = 2*d$ , par rapport aux autres pertes. Pointons que de nombreuses autres combinaisons peuvent très bien marcher. Pour les cas extrêmes, il rapporte que  $0.05*\lambda_c < p < 0.25 \lambda_c$  (où  $\lambda_c = \frac{1}{f_c\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}}$ ) évite premièrement que la structure soit trop perforée et en deuxième lieu d'avoir une bande interdite dans la bande passante. Davantage, on doit continuellement avoir  $p > d$ , sinon les cylindres se chevauchent. Donc, avec ces cas limites, il est possible de trouver un  $p$  et un  $d$  qui conviennent pour le design d'un SIW. [20]

## 2.4 Transition des lignes microrubans aux guides d'ondes intégrés au substrat :

Une transition du SIW vers une ligne microruban a été présentée dans [21]. Pour tester le SIW fabriqué, Il faut nécessairement avoir une transition vers une ligne de transmission qui est reliée à un analyseur de réseau. La ligne microruban est une des lignes de transmission les plus utilisées dans la conception de systèmes RF. Le schéma de la transition entre la structure et la ligne de transmission est donnée à la figure 2-4 :

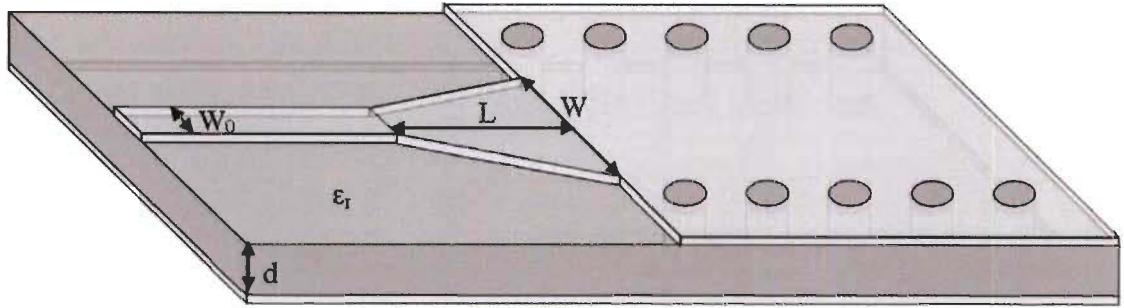


Figure 2. 4 : Transition d'un SIW vers un microruban avec ses paramètres [23].

Cette transition contient trois importants paramètres, la largeur finale  $W$ , la longueur  $L$  de la ligne profilée et la largeur initiale  $W_0$ . La largeur initiale de la ligne microruban  $W_0$  doit être calculée pour obtenir l'impédance caractéristique désirée. Elle est généralement choisie pour obtenir une impédance caractéristique de  $50\Omega$ . D'après [17], on calcule le ratio  $W_0/d$  par la formule suivante :

$$\frac{W_0}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{pour } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.69}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{pour } W/d > 2 \end{cases}$$

Où

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \text{ et } B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.5)$$

De ce fait, comme  $d$  est connu, il devient facile de calculer la valeur de  $W_0$ . Il faut calculer maintenant la valeur des deux autres paramètres de la transition. Le  $W$  doit être calculé selon [21] en égalant les deux parties de droite des équations suivantes et en itérant sur le  $W$  ( $W$  est la largeur d'un guide équivalent qui modélise le microruban) :

$$\frac{1}{W_e} = \frac{\frac{60}{\eta d} \ln \left( 8 \frac{d}{w} + 0.25 \frac{w}{d} \right)}{\frac{120\pi}{\eta d \left[ \frac{w}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{d} + 1.444 \right) \right]}} \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{W_e} = \frac{4.38}{a_e} e^{-0.627 \frac{\varepsilon_r}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{w}}}} \quad (2.7)$$

Pour ce qui est du paramètre L, la longueur optimum peut être obtenue d'après [22], mais une méthode plus simple peut être utilisée. En choisissant la largeur médiane entre la ligne microruban et la fin de la transition, donc en prenant un  $W_{milieu} = (W + W_0) / 2$ , il suffit de calculer la longueur d'onde pour cette largeur et de fixer la longueur à un quart de longueur d'onde. Il faut trouver la constante diélectrique effective pour cette largeur de ligne microruban :

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{d}{W_{milieu}}}} \quad (2.8)$$

Nous calculons par la suite le  $\lambda_c$  avec l'équation suivante :

$$\lambda_c = \frac{1}{f_c \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_e}} \quad (2.9)$$

Définitivement, ce tronçon quart d'onde peut aussi être optimisé avec un logiciel à onde complète (Full Wave) afin de minimiser les pertes de retour [23].

## 2.5 Les diviseurs de puissance

### 2.5.1 Présentation

Les diviseurs de puissance (les combinateurs de puissance lorsqu'ils sont utilisés en inverse) sont des dispositifs passifs utilisés principalement dans le domaine de la technologie radio. Ils couplent une quantité définie de la puissance électromagnétique dans une ligne de transmission à un port permettant au signal d'être utilisé dans un autre circuit. Une caractéristique essentielle est qu'ils n'accouplent que l'écoulement d'énergie dans une direction. L'alimentation entrant dans le port de sortie est couplée au port isolé mais pas au port couplé. Un coupleur directionnel conçu pour diviser la puissance également entre deux ports est appelé coupleur hybride.

Les coupleurs directionnels sont construits le plus souvent à partir de deux lignes de transmission couplées placées suffisamment près l'une de l'autre de sorte que l'énergie passant par l'une est couplée à l'autre. Cette technique est favorisée aux fréquences micro-ondes où les conceptions de lignes de transmission sont couramment utilisées pour mettre en œuvre de nombreux éléments de circuit. Cependant, des dispositifs composites agrégés sont également possibles à des fréquences plus basses, telles que les fréquences audios rencontrées dans la téléphonie. Aussi aux fréquences micro-ondes, en particulier les bandes plus élevées, des conceptions de guides d'ondes peuvent être utilisées. Beaucoup de ces coupleurs à guide d'ondes correspondent à l'une des conceptions de lignes de transmission conductrices, mais il existe également des types qui sont uniques au guide d'onde.



Figure 2. 5 : Diviseur de puissance classique

Les coupleurs directionnels et les diviseurs de puissance ont de nombreuses applications. Ceux-ci comprennent la fourniture d'un échantillon de signal pour la mesure ou la surveillance, la rétroaction, la combinaison d'amenées vers et à partir d'antennes, la formation de faisceaux d'antennes, la fourniture de prises pour des systèmes distribués par câble tels que la télévision par câble et la séparation de signaux transmis et reçus sur des lignes téléphoniques.

#### 2.5.2 *Théorie des diviseurs de puissance*

Les diviseurs de puissance sont des dispositifs microondes passifs. Ils sont généralement constitués de guides d'ondes rectangulaires dans lesquels se propage le mode fondamental  $TE_{10}$ . Il existe principalement deux types en T et en Y, qui sont couramment utilisés pour acheminer des copies d'un signal dans un système. Cette application se concentre sur les diviseurs de puissance à trois ports offrant l'égalité des rapports de division de puissance où la moitié de la puissance (-3dB) d'un signal d'entrée est remis à chacun des deux ports de sortie. Considérons la matrice S pour un réseau à trois ports, comme indiqué dans l'équation :

$$(S) = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix}$$

Comme le dispositif est passif et ne contient pas de matières anisotropes tels que la ferrite, la matrice [S] est symétrique suivant la diagonale impliquant que le dispositif est réciproque. Pour assurer une transmission de puissance maximale, le dispositif doit être sans pertes avec les trois ports adaptés

$$(S) = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{pmatrix}$$

Avec

$$\begin{cases} |S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 = 1 \\ |S_{12}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \\ |S_{13}|^2 + |S_{23}|^2 = 1 \end{cases} \Rightarrow |S_{12}| = |S_{13}| = |S_{23}|$$

$$\begin{cases} S_{13}^* S_{23} = 0 \\ S_{23}^* S_{12} = 0 \\ S_{12}^* S_{13} = 0 \end{cases} \Rightarrow |S_{13}| = |S_{23}| = 0$$

Par conséquent, un diviseur de puissance à trois ports, réciproque, sans pertes ne peut jamais être adapté à ses trois accès. Pour concevoir un diviseur de puissance physiquement réalisable à trois ports, l'une des conditions doit être assouplie [25].

## 2.6 Les diviseurs de puissance intégrés au substrat SIW

Les diviseurs de puissance basés sur la technologie SIW constituent les blocs de plusieurs systèmes et circuits en microondes et ondes millimétriques. Ils sont de deux types : la jonction planaire en T avec un cylindre métallique et une jonction planaire Y telles que les

parois du SIW sont à base de cylindres métallisés et chaque port est relié à une transition microruban conique posée sur le même substrat [25].

La fréquence de coupure du diviseur de puissance SIW proposé dans ce mémoire est à 8,0 GHz et les dimensions initiales peuvent être calculées par la formule empirique (2.10) et la formule (2.11) avec une bonne précision dans les conditions de  $S = D < 3$  et  $W_{SIW} = D > 10$  [20, 21].

$$W = W_{SIW} - 1.08 \frac{D^2}{S} + 0.1 \frac{D^2}{W_{SIW}} \quad (2.10)$$

$$f_c = \frac{1}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.11)$$

Où  $f$  est la fréquence de coupure du guide d'onde rectangulaire métallique, et  $\epsilon_r$  est la permittivité relative du substrat,  $W$  représente la largeur du guide d'ondes rectangulaire métallique correspondant,  $W_{SIW}$  est la largeur du guide d'ondes SIW,  $D$  est le diamètre des vias, et  $S$  est la distance entre deux vias successifs.

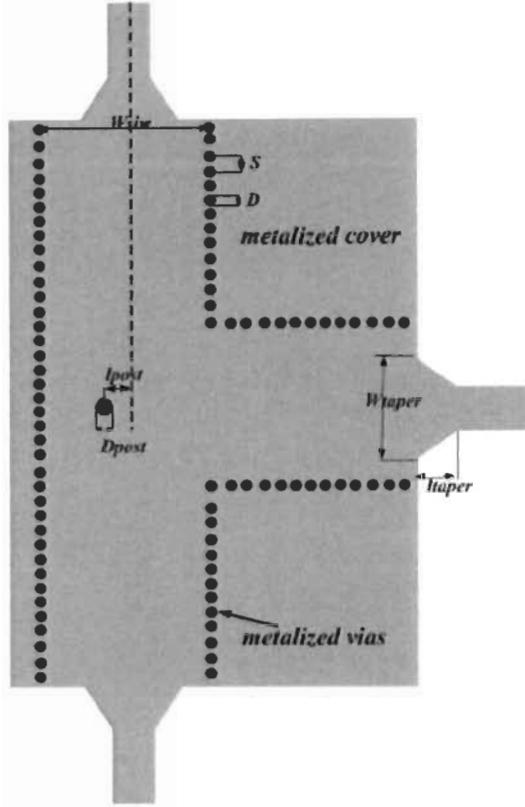


Figure 2. 6 : Diviseur de puissance en SIW. [29]

La fréquence de coupure est presque monotone déterminée par la largeur de la structure SIW de la formule (2.10). Par conséquent, ce qui doit être optimisé pour réaliser la correspondance de port de sortie après la modélisation de structures SIW sont les dimensions des transitions de ligne SIW-microruban, et la taille ainsi que l'emplacement du poteau inductif. Selon la recommandation de [28], le diamètre du via,  $D_{post}$ , est optimisé pour réduire la réflexion avec une valeur initiale de  $1/4$  de la longueur d'onde du guide d'ondes. L'emplacement du trou,  $l_{post}$ , est optimisé pour obtenir une valeur minimale de réflexion. La procédure d'optimisation est déterminée par des outils de simulation électromagnétique (EM).

## **Chapitre 3 - Diviseur intégré au substrat pour la multi-détection de gaz**

### **3.1 Introduction :**

La fonctionnalisation du diviseur SIW présenté dans la figure 3.1 permet à ce dernier de changer de comportement en présence et en fonction de la grandeur physique à détecter. Pour ce faire, des trous vides sont percés à l'intérieur des branches du diviseur de puissance. Ces régions sont ensuite remplies d'un matériau diélectrique sensible à la présence de gaz ou de l'humidité. La figure 3-2 présente le diviseur de puissance intégré proposé avec la région fonctionnalisée.

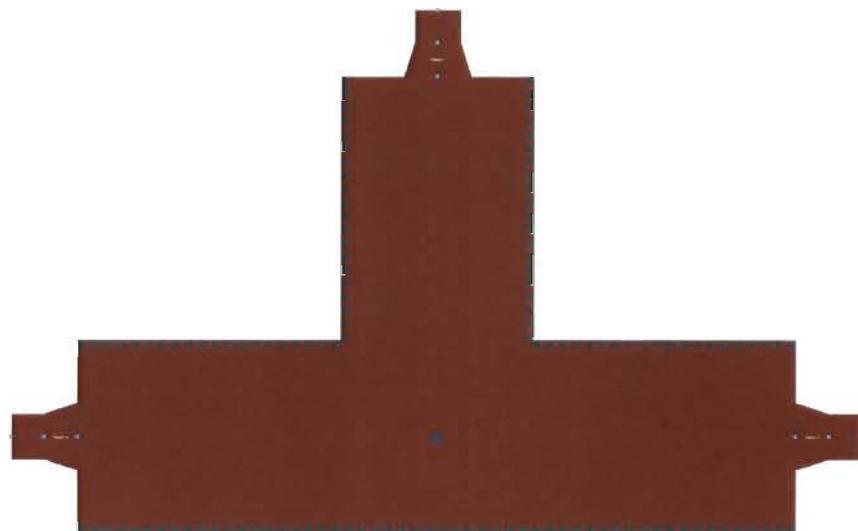


Figure 3. 1: La structure générale d'un diviseur de puissance intégré au substrat.

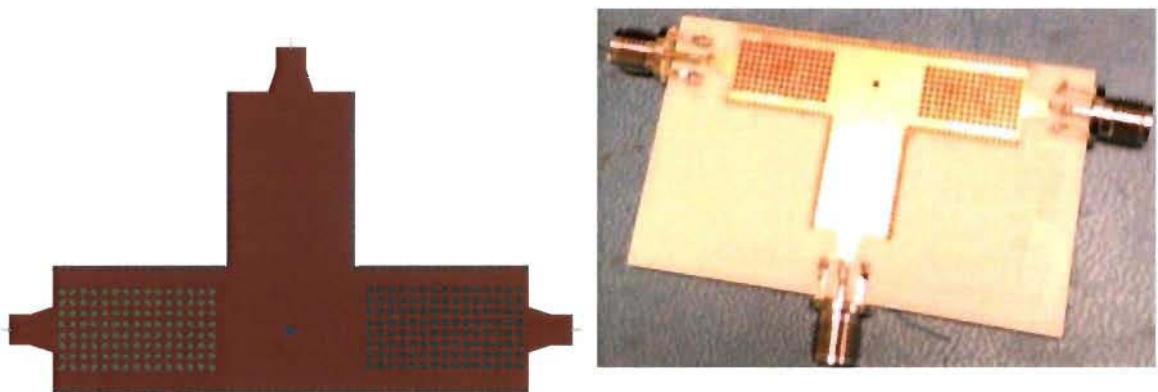


Figure 3.2 : Le multi capteur intégré au substrat à base d'un diviseur de puissance en SIW

### 3.2 Conception :

Dans l'application suivante (figure .3.3), le diviseur de puissance a été conçu dans la bande de fréquence [8.4-8.6] GHz à base de trois guides SIW identiques, disposant des paramètres caractéristiques indiqués dans le tableau 1. Les guides SIW sont connectés de façon à former un T. On ajoute ensuite dans cette jonction, un cylindre métallique inductif de rayon  $r$ , positionné à  $x_p$ , afin de minimiser les pertes par réflexion au niveau du port d'entrée. Pour réaliser cet objectif, une optimisation du rayon  $r$  et de la position  $x_p$  de l'élément perturbateur est nécessaire. Le rayon  $r$  du trou métallisé est fixe ensuite optimisé à l'aide des outils de simulation.

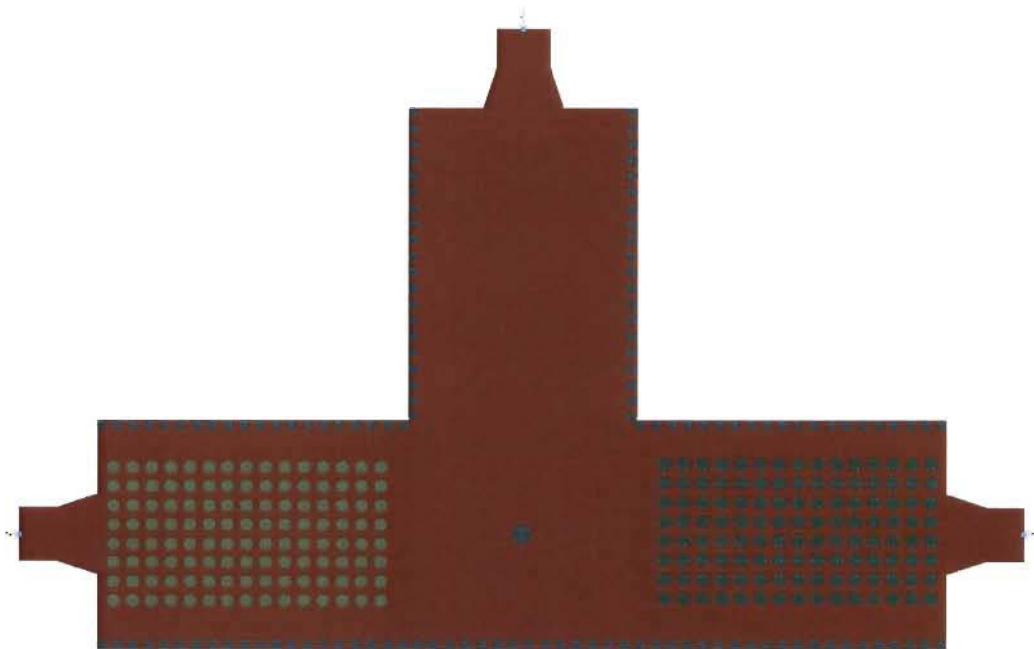


Figure 3. 3 : Le diviseur de puissance proposé

Le tableau ci-dessous résume les valeurs des paramètres de conception pour le multi capteur :

$W_{eff}$	$D_{Métallisé}$	$D_{air}$	$b_{Métallisé}$	$b_{Air}$	$W_{adapt}$	$W_t$	$L_t$
<b>10.725</b>	<b>0.45</b>	<b>0.67</b>	<b>0.75</b>	<b>1</b>	<b>2.53</b>	<b>3.75</b>	<b>3.68</b>

Tableau 3. 1 : Valeurs des paramètres de conception pour le capteur (unité : millimètre)

### 3.3 Matériaux

#### 3.3.1 Matériaux présentés dans la littérature pour la détection de gaz

Les matériaux diélectriques éventuels pour la détection de gaz sont inventoriés dans le tableau ci-dessous :

<i>Matériaux diélectriques sensibles au gaz</i>	<i>Gaz à détecter</i>
<i>SnO<sub>2</sub></i>	O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO, H <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	H <sub>2</sub>
<i>TiO<sub>2</sub></i>	O <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ,
<i>WO<sub>3</sub></i>	CO, O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>
<i>Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>
<i>La<sub>1-x</sub>S<sub>x</sub>FeO<sub>3</sub></i>	Formaldéhydes

Tableau 3. 2 : Quelques matériaux pour la détection de gaz [30].

Le tableau 3.3 inventorie les autres matériaux qui sont sensibles à d'autre types de grandeurs physique comme l'humidité et la température.

<i>Matériaux diélectriques sensible au gaz</i>	<i>Grandeurs physiques à détecter</i>
<i>Nano cellulose</i>	Humidité
<i>PV-OH</i>	Humidité et température
<i>Kapton</i>	Humidité

Tableau 3. 3 : Quelques matériaux des autres grandeurs physiques [30].

Après avoir énumérés les différents matériaux diélectriques sensibles à différentes grandeurs physiques, le choix des matériaux adéquats reste une étape cruciale.

Les critères de choix des matériaux à utiliser avec le dispositif proposé sont :

- Les propriétés du matériau (la perméabilité, la permittivité, les pertes diélectriques, ...)
- Le cout.
- La disponibilité du matériau.
- La forme du matériau (liquide, solide, poudre, ...).
- La sensibilité et la sensibilité croisée

### 3.3.2 Matériaux utilisés

#### 3.3.2.1 Le dioxyde d'étain : $SnO_2$

La micro-poudre d'oxyde d'étain est un bon choix pour les détecteurs de gaz dans divers milieux pour ses caractéristiques avantageuses :

- Une grande sensibilité à divers gaz oxydants et réducteurs.
- Le faible coût.
- Simplicité de fabrication.

La grande majorité des capteurs sont basés sur la variation de la conductivité électrique de l'oxyde d'étain, avant l'adsorption des espèces gazeuses.

Dans ce travail de recherche, nous nous sommes intéressés aux changements de la constante diélectrique de la poudre de  $SnO_2$  en présence d'une faible concentration d'hydrogène ( $\leq 2\%$  dans l'air) à température ambiante. Nous avons reçu la poudre  $SnO_2$  commerciale avec une taille de grain initiale entre 1 et 10  $\mu m$  de diamètre et avec une pureté de 99,9% d'Alfa Aesar (selon les données du fournisseur). Ensuite, la poudre a été broyé à l'aide d'un vibro-mill 8000 M Spex CertiPrep dans l'air, avec un rapport de masse entre la poudre et les billes de fraisage en acier de 1:10, la poudre a été broyée à l'intérieur d'un creuset en acier pendant 60 minutes exactement. Après l'étape de broyage, aucun traitement post-recuit n'a été appliqué à la poudre broyée qui a été utilisée pour les expériences présentées ultérieurement. Une analyse structurale a été effectuée afin de déterminer l'effet du broyage sur les propriétés de la poudre.

Les tests de sensibilité effectué dans [31], ont été menés à la fois avec la poudre non broyée et la poudre broyée durant 1 heure. Contrairement à la poudre commerciale initiale, l'échantillon  $\text{SnO}_2$  traité montre une sensibilité capacitive à la présence d'hydrogène. Concrètement, ce résultat est lié à la différence de propriétés structurelles des deux poudres. La sensibilité de la poudre peut être expliquée par la présence de défauts microstructurales qui agissent comme des sites d'adsorption. De plus, il est largement démontré dans la littérature que la diminution de la taille de cristalline  $\text{SnO}_2$  peut considérablement améliorer la sensibilité du capteur [32]. La figure 3.4 montre deux images MET (microscopie électronique en transmission) de la poudre de l'oxyde d'étain broyé et non broyé.

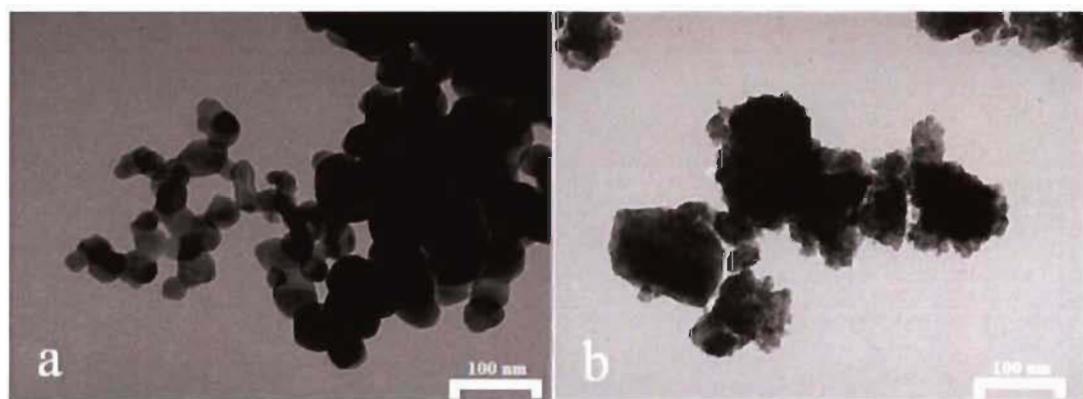


Figure 3. 4 : images TEM des échantillons de dioxyde d'étain : a) la poudre non broyées, b) la poudre broyée en 1 heure [31].

En l'absence d'un gaz, la constante diélectrique de la poudre  $\text{SnO}_2$  broyé avec une densité de  $1,8 \text{ g / cm}^3$  a été estimée dans [32] à  $2,9 \pm 0,2$  à 4 GHz par la méthode de perturbation, en utilisant différents résonateurs SIW et en appliquant la théorie moyenne efficace (EMT) de Bruggeman.. À 2% de la concentration d'hydrogène dans l'air, la permittivité relative estimée de la poudre  $\text{SnO}_2$  sensible est de  $3,5 \pm 0,2$ .

La figure 3.5 présente la micro poudre d'oxyde d'étain utilisé avec le diviseur en guide d'onde intégré au substrat.



Figure 3. 5 : image de la poudre de SnO<sub>2</sub> utilisé

### 3.3.2.2 *Nano cellulose*

La cellulose est un composé organique avec la formule (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), est un composant structural important de la première paroi cellulaire des plantes vertes , de nombreuses formes d'algues et les oomycètes. Certaines espèces de bactéries le sécrètent pour former des biofilms .[33] La cellulose est le plus abondant organique polymère sur la Terre [34]. La teneur en cellulose de la fibre de coton est de 90%, et celle du bois est de 40 à 50% [35], [36].

La cellulose est principalement utilisée pour produire du carton et du papier. De petites quantités sont transformées en une grande variété de produits dérivés tels que cellophane et rayonne. La conversion de cellulose à partir de cultures énergétiques dans les biocarburants , tels que l' éthanol cellulosique est à l'étude en tant que source de combustible. La cellulose à usage industriel est principalement obtenue à partir de la pâte de bois et du coton [34].

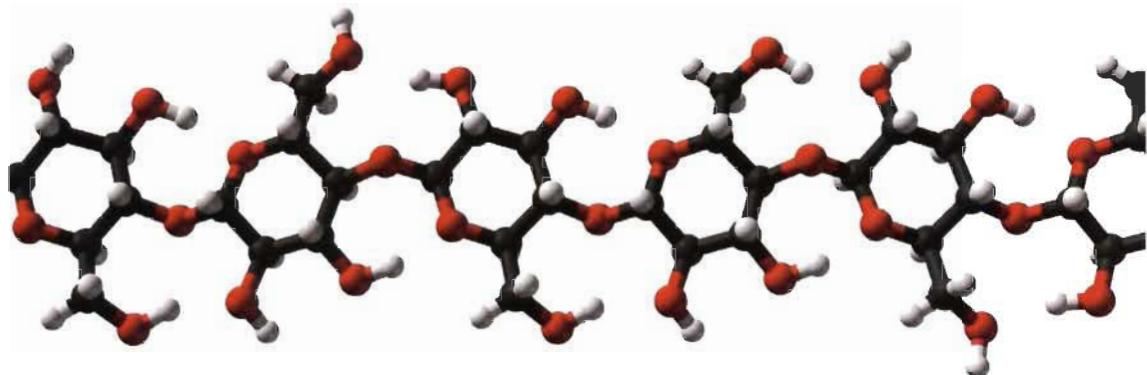


Figure 3. 6: Structure de la cellulose

La nanocellulose est un terme qui se réfère à la cellulose nano-structurée. Il peut s'agir de nanofibres de cellulose (CNF) également appelées cellulose microfibrillée (MFC), cellulose nanocristalline (NCC ou CNC), ou nanocellulose bactérienne, qui se réfère à la cellulose nano-structurée produite par des bactéries [37].

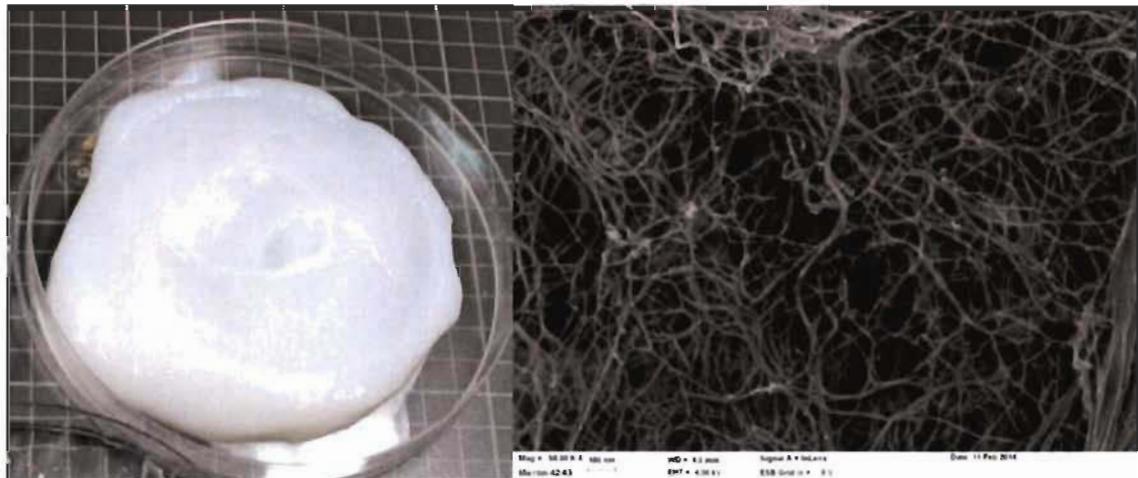


Figure 3. 7 : Gauche : Gel de nanofibre de cellulose produit par broyage Masuko  
 (Source d'image : Tiina Pöhler, et al., VTT (2010) À droite :  
 Microscope électronique à balayage (SEM) image de nanofibrilles de  
 cellulose. Echelle : 100 nm (source d'image: VTT).

Le CNF est un matériau composé de fibrilles de cellulose nanosatées avec un rapport d'aspect élevé (rapport longueur / largeur). Les largeurs typiques de fibrilles sont de 5 à 20

nanomètres avec une large gamme de longueurs, généralement de plusieurs micromètres, ce qui en fait des matériaux appropriés pour les mécanismes de détection micro-ondes. Il est pseudo-plastique et présente une thixotropie, la propriété de certains gels ou fluides épais (visqueux) dans des conditions normales, mais devient moins visqueux lorsqu'il est secoué ou agité. Lorsque les forces de cisaillement sont retirées, le gel retrouve une grande partie de son état d'origine. Les fibrilles sont isolées de toute source contenant de la cellulose, y compris les fibres à base de bois (fibres de pâte) par une homogénéisation, un broyage ou une microfluidisation à haute pression, à haute température et à grande vitesse.

### *3.3.2.3 L'alcool polyvinyle : le PVOH*

Le poly (alcool vinylique) (PVOH, PVA, ou PVAL) est un polymère synthétique soluble dans l'eau. Il répond à la formule idéalisée  $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})]^n$ . Il est utilisé dans la fabrication du papier, du textile, et une variété de revêtements. Il est blanc (incolore) et inodore. Il est parfois fourni sous forme de billes ou de solutions dans l'eau [38].

Le PVOH est un matériau atactique qui présente une cristallinité. En termes de microstructure, il est composé principalement de liaisons 1,3-diol  $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})-]$  mais quelques pour cent de 1,2-diols  $[-\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2-]$ , en fonction des conditions de polymérisation du précurseur d'ester vinylique [38].

L'alcool polyvinyle présente d'excellentes propriétés filmogènes, émulsionnantes et adhésives. Il est également résistant à l'huile, à la graisse et aux solvants. Il présente une résistance à la traction et une flexibilité élevées, ainsi que des propriétés de haute qualité pour l'oxygène et l'arôme. Cependant, ces propriétés dépendent de l'humidité, en d'autres termes, avec une humidité plus élevée, plus d'eau est absorbée. L'eau, qui agit comme plastifiant,

réduira alors sa résistance à la traction, mais augmentera son allongement et sa résistance à la déchirure.

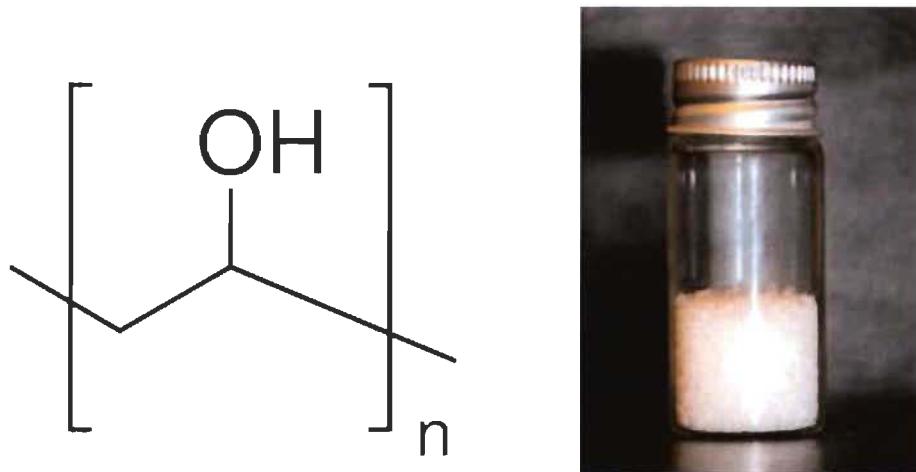


Figure 3.8 : À gauche : molécule du PVOH à droite: microbille de PVOH

Le PVOH a un point de fusion de 230 ° C et 180-190 ° C pour les grades entièrement hydrolysés et partiellement hydrolysés, respectivement. Il se décompose rapidement au-dessus de 200 ° C, car il peut subir une pyrolyse à des températures élevées.

Le PVOH est non toxique. Il se biodégrade lentement, et les solutions contenant jusqu'à 5% de PVOH ne sont pas toxiques pour la biodiversité [38].

## Chapitre 4 - Résultats et discussion

Dans ce chapitre, les résultats de tests et de prototypage sont présentés. Dans cette partie du mémoire les infrastructures utilisées qui ont permis d'obtenir ces résultats selon le type de test effectué seront décrites. Le diviseur de puissance est conçu dans la bande de fréquence à 8.5 GHz pour le mode fondamental  $TE_{10}$ . Les dimensions du multi-capteur SIW peuvent être modifiées pour changer la bande de fréquence utilisée par le capteur. Le prototype a été fabriqué en utilisant une technique de fabrication de PCB standard.

### 4.1. Résultats de détection de l'hydrogène à 2% et discussion :

Cette section présente une preuve de concept pour vérifier la faisabilité du multi-capteur intégré au substrat pour la détection de gaz. La structure a été simulée pour optimiser ses fonctionnalités et pour choisir sa bande d'opération. Le prototype du multi-capteur de gaz a été fabriqué avec deux régions sensibles dans les branches du diviseur de puissance. Le dioxyde d'étain  $SnO_2$  a été choisi pour fonctionnaliser le diviseur de puissance et le rendre sensible à la présence d'hydrogène.

Le multi-capteur SIW a été conçu en utilisant l'outil de simulation ADS [39] pour développer la structure du diviseur de puissance SIW et pour effectuer une analyse de propagation. Cette simulation permet d'estimer les caractéristiques du diviseur SIW telles que la fréquence de fonctionnement, la distribution du champ électrique à l'intérieur et la

phase. L'effet de la forme de la région fonctionnalisée introduite à l'intérieur des branches du capteur SIW a été examiné. Les conditions limites absorbantes ont été appliquées le long des parois entourant la structure du multi capteur SIW. Le substrat utilisé est le Rogers 4003C ( $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\tan \delta = 0,0023$ ,  $h = 1,524$  mm) et une couche de cuivre d'épaisseur 17  $\mu\text{m}$ . Le dioxyde d'étain  $\text{SnO}_2$  a été choisi pour fonctionnaliser le capteur et le rendre sensible à la présence d'hydrogène. L'introduction de la région fonctionnalisée avec le matériau sensible provoque des pertes de réflexion. Ceci n'affecte pas le principe de fonctionnement basé sur la mesure de phase [41].

Le banc de test présenté dans la figure 4.1 a été utilisé pour tester la capacité du capteur à détecter l'hydrogène. En augmentant le pourcentage d'hydrogène de 0% à 2%, le déphasage a été mesuré pour le multi-capteur SIW où la région sensible à l'hydrogène est dans la branche 2 (figure 3.2).

Le banc d'essai peut générer de 0% à 2%  $\text{H}_2$ . Les tests commencent dans le vide avec une pression mesurée à l'intérieur de la chambre d'essai à 0,2 atm. Le débit de gaz d'azote est ensuite porté à 500 sccm pour remplir la chambre d'essai et la pression est stabilisée à 1 atm. Les gaz d'azote et l'hydrogène qui pénètrent dans la boîte de mélange sont ensuite répartis en utilisant deux contrôleurs (MFC1 et MFC2) présenté dans la figure 4.2. La quantité de gaz d'azote dans la boîte de mélange diminue progressivement tandis que la quantité d'hydrogène augmente en conséquence.



Figure 4. 1 : Le banc de test d'hydrogène

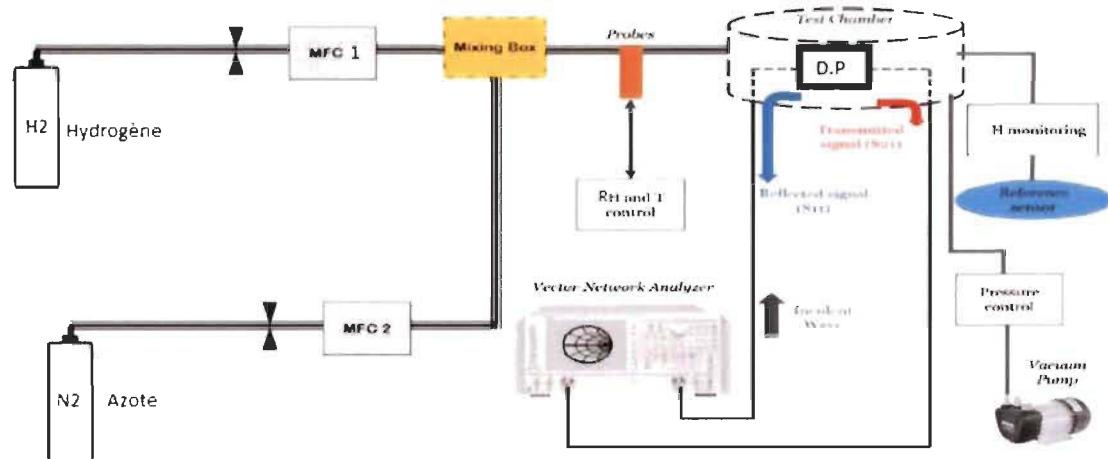


Figure 4. 2 : Schéma de fonctionnement du banc de test

Le gaz mélangé est ensuite envoyé à la chambre d'essai où se trouve le capteur SIW. Pour chaque valeur, un temps d'attente de 15 minutes a été nécessaire pour stabiliser l'hydrogène dans la chambre et assurer son adsorption par l'élément sensible.

Après l'acquisition des données de mesure et de simulation, on a comparé les résultats de simulation et les valeurs expérimentales du module du  $S_{21}$  et de la phase du dispositif, ces résultats sont présentés sur la Figure 4.3 et Figure 4.4. Selon ces figures, les résultats de simulation du  $S_{21}$  correspondent bien aux résultats expérimentaux. La différence entre la valeur expérimentale et la simulation est due à l'incertitude sur les caractéristiques diélectriques estimées du  $\text{SnO}_2$  [40], [41].

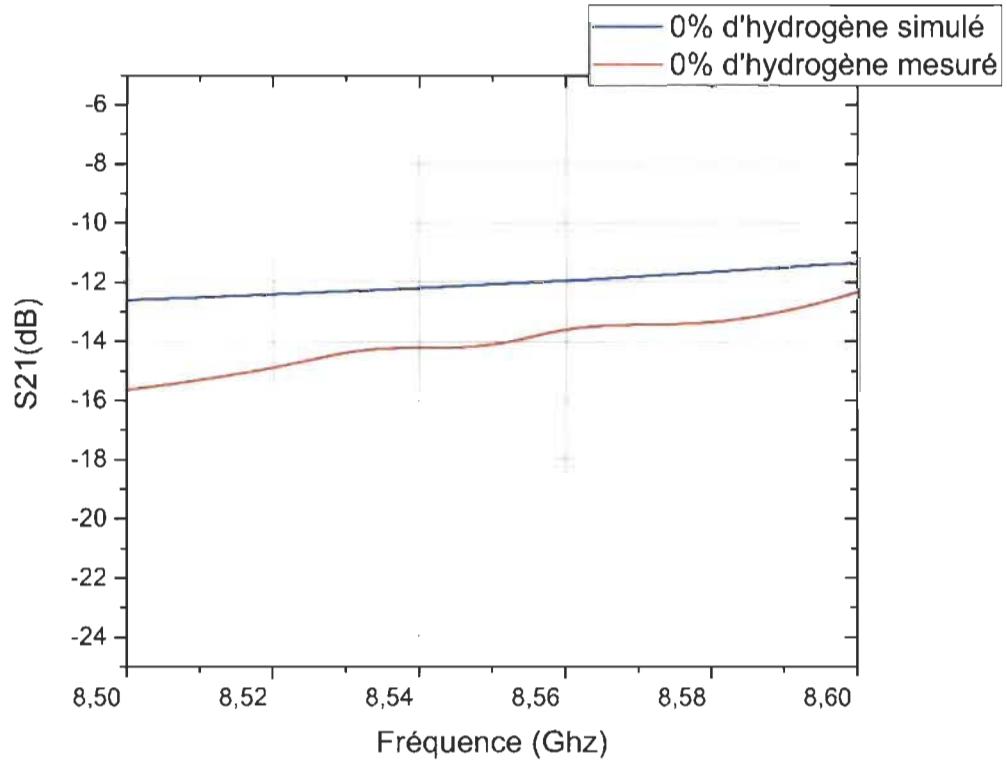


Figure 4.3 : Module  $S_{21}$  du capteur SIW proposé.

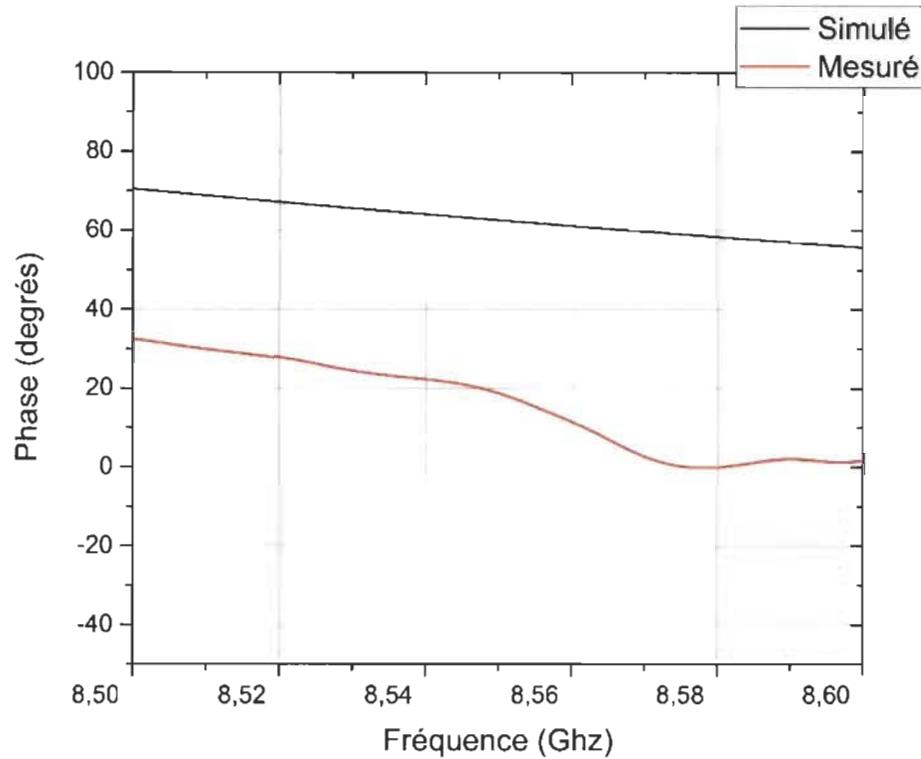


Figure 4. 4 : Phase  $S_{21}$  du capteur SIW proposé.

Les caractéristiques sensibles du diviseur de puissance proposé ont été testées expérimentalement à l'aide du système de caractérisation (le banc de test figure 4.1). Le multicapteur SIW a été placé dans la chambre d'essai du banc où la température et la pression à l'intérieur de la chambre ont été fixées à 30 ° C et 14,7 Psi (1 atm), respectivement, un gaz hydrogène à 2% a été libéré à partir d'une source. La figure 4.5 et la figure 4.6 montrent le module  $S_{21}$  mesuré et la phase aux concentrations de 0% et 2% de H<sub>2</sub> respectivement dans la gamme de fréquences de 8.5 GHz à 8,6 GHz.

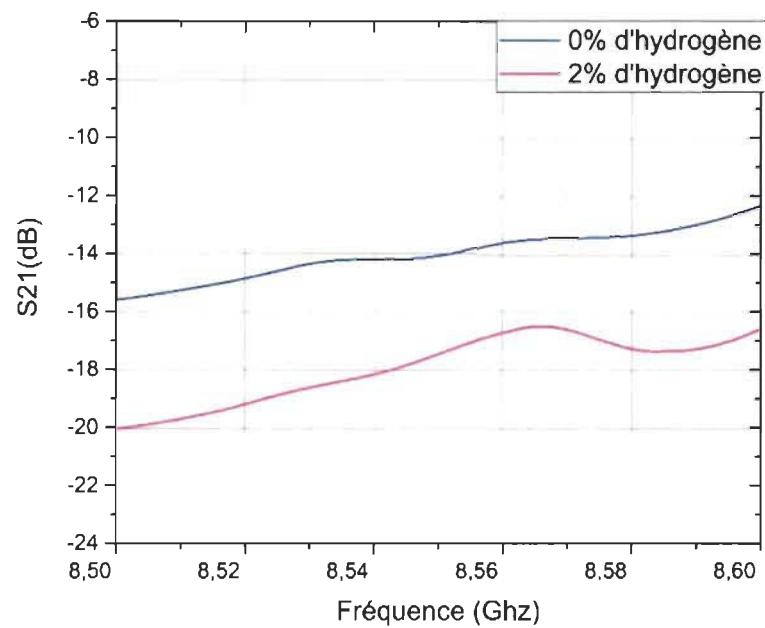


Figure 4. 5 : Module  $S_{21}$  mesuré à 0% et 2% de  $H_2$

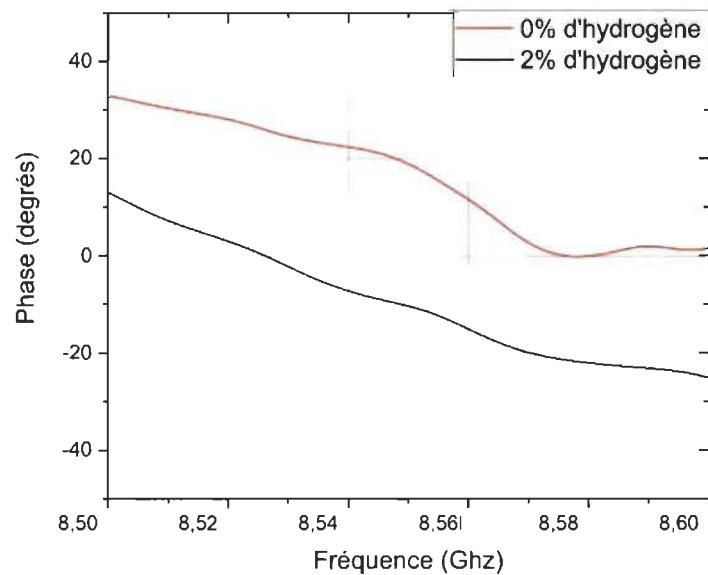


Figure 4. 6 : Phase mesuré à 0% et 2%  $H_2$

Le décalage de la phase du  $S_{21}$  vers une valeur de phase inférieure pour un niveau d'hydrogène plus important démontre la sensibilité du diviseur de puissance à la présence d'hydrogène. Les mesures de phase et du module du  $S_{21}$  ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) toutes les 15 min pour les différentes concentrations d'hydrogène de 0 et de 2% à l'intervalle de fréquence de fonctionnement de 8.5 GHz à 8.6 GHz. La durée considérée pour chaque concentration d'hydrogène permet de stabiliser le niveau de ce gaz. À 8.55 GHz, la variation de phase maximale est de  $30^\circ$ . À 2% d'hydrogène, tous les sites d'adsorption des espèces d'hydrogène dans la micro-poudre d'oxyde d'étain ont été occupés. Par conséquent, le matériau sensible utilisé a atteint son point de saturation.

Le décalage de phase à une fréquence de fonctionnement  $f$  donnée est donné par :

$$\varphi(f) = \beta(f)l \quad (4.1)$$

Où  $\beta(f)$  est la constante de phase et  $l$  est la longueur du guide d'onde. La constante de phase pour le mode  $TE_{10}$ , est donnée par

$$\beta(f) = \sqrt{\left(\frac{2\pi f \sqrt{\varepsilon_{eff}}}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{W_{eff}}\right)^2} \quad (4.2)$$

Où  $\varepsilon_{eff}$  est la constante diélectrique effective de la structure,  $c$  est la vitesse des ondes électromagnétiques sous vide et  $W_{eff}$  est la largeur effective du SIW.

La constante diélectrique relative et la tangente de perte de la poudre du  $SnO_2$  changent en fonction de la concentration d'hydrogène à laquelle elle est exposée [41]. Étant donné que les dimensions du diviseur de puissance ne changent pas, le décalage de phase à une fréquence de fonctionnement  $f$  dépend de la constante de diélectrique effective  $\varepsilon_{eff}$ , estimée par la règle de mélange Maxwell-Garnett [43]

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_r + 3\nu\varepsilon_r \frac{\varepsilon_r(SnO_2) - \varepsilon_r}{\varepsilon_r(SnO_2) + 2\varepsilon_r - \nu(\varepsilon_r(SnO_2) - \varepsilon_r)} \quad (4.3)$$

Où  $\varepsilon_r$  est la constante diélectrique relative du substrat,  $\varepsilon_r(SnO_2)$  est la constante diélectrique relative de la micro-poudre d'oxyde d'étain et  $\nu$  est la fraction volumique de la région de détection. Par conséquent, une variation de la concentration de l'hydrogène introduira une variation de la constante de phase. Ceci entraîne un décalage dans la phase du signal de sortie. Le principe de base du multicapteur proposé est basé sur ce phénomène. Le déphasage est utilisé comme indication du capteur.

## 4.2. Résultats de détection de l'humidité et discussion

### 4.2.1. Nanocellulose

Des tests sous une variation de l'humidité environnante ont été réalisés afin de valider la preuve de concept du capteur d'humidité proposé. Ainsi, une variation couvrant la plage de 20% à 60% d'humidité relative (RH) a été appliquée au multi-capteur.

Le banc de test présenté dans la Figure 4.7 a été mis en place afin d'évaluer la sensibilité du capteur en présence d'humidité.

Comme évoqué précédemment, la constante diélectrique relative et la tangente de perte de la nanocellulose changent en fonction de l'humidité à laquelle elle est exposée. Étant donné que les dimensions du diviseur de puissance ne changent pas, le décalage de phase à une fréquence de fonctionnement  $f$  dépend de la constante diélectrique effective  $\varepsilon_{eff}$ , estimée par la règle de mélange Maxwell-Garnett [43]

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_r + 3\nu\varepsilon_r \frac{\varepsilon_r(CNF) - \varepsilon_r}{\varepsilon_r(CNF) + 2\varepsilon_r - \nu(\varepsilon_r(CNF) - \varepsilon_r)} \quad (4.4)$$

Où  $\epsilon_r$  est la constante diélectrique relative du substrat,  $\epsilon_r(\text{CNF})$  est la constante diélectrique relative du microfilm de nanocellulose et  $v$  est la fraction volumique de la région de détection. Une variation de l'humidité entraîne un déphasage dans le signal de sortie

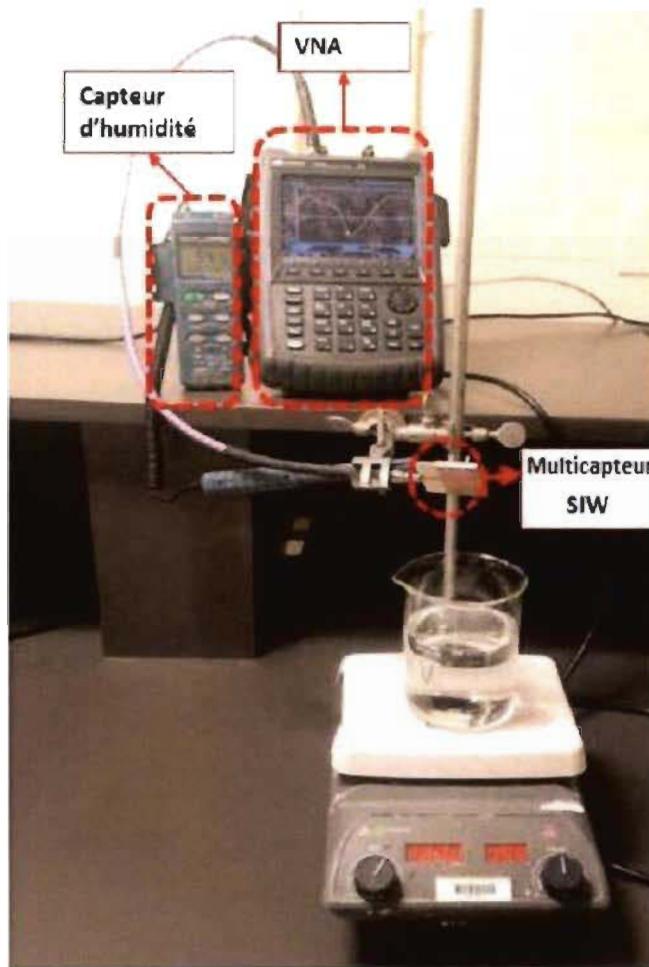


Figure 4. 7 : Banc de test

Des tests sous différentes conditions (utilisation de la nanocellulose) ont également été réalisés dans la gamme de 21 à 60% d'humidité relative. Le décalage de phase obtenu est supérieur à 10°.

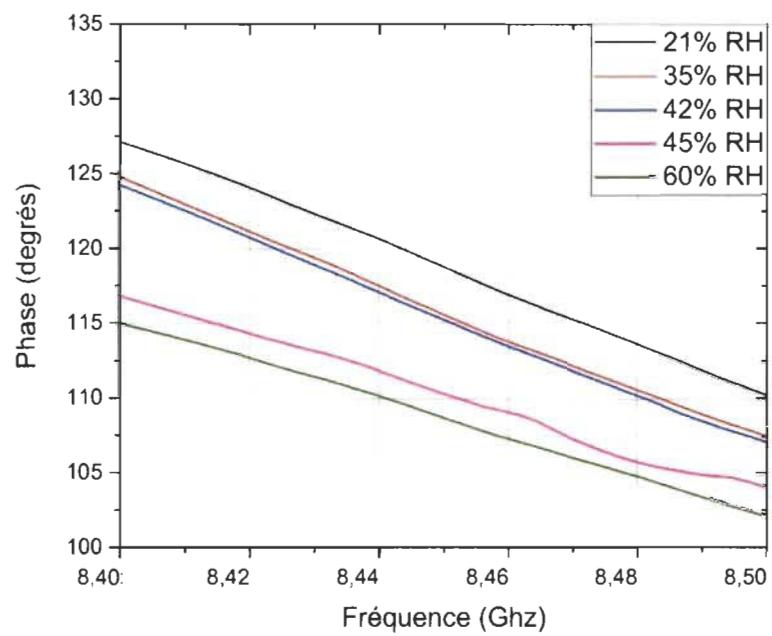


Figure 4. 8 : Phase  $S_{31}$  mesuré entre 21% et 60% d'humidité relative

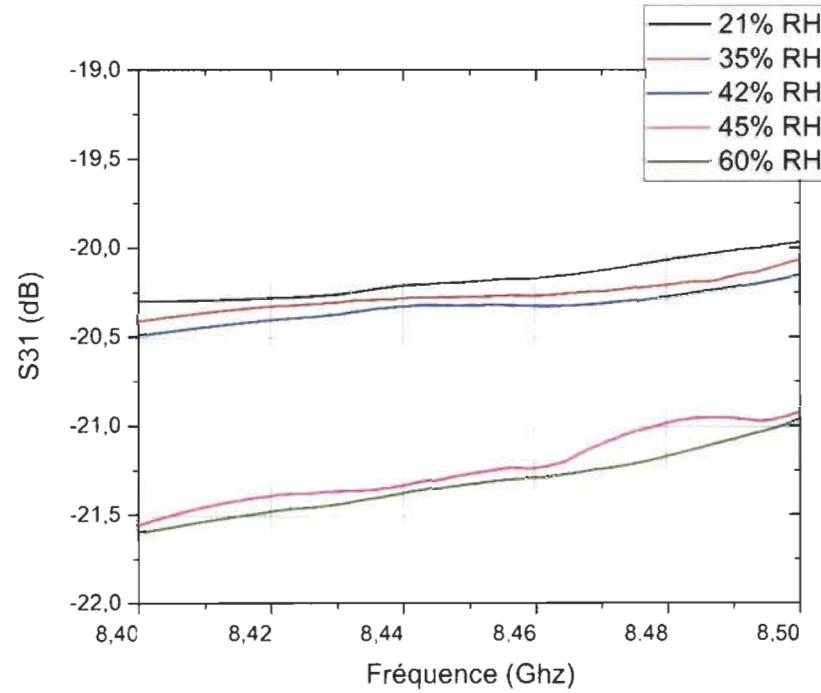


Figure 4. 9 : Module  $S_{31}$  mesuré entre 21% et 60% d'humidité

En augmentant le pourcentage d'humidité relative de 21% à 60%, la courbe d'évolution du décalage de phase par rapport à la concentration d'humidité a été tracée en Figure 4.10.

L'expérience a été répétée dans les mêmes conditions expérimentales durant les quatre jours suivant pour tester la répétabilité des mesures.

Les résultats montrent que la structure présentée est sensible à la présence d'humidité, la phase S31 étant décalée vers une valeur de phase inférieure pour un niveau d'humidité plus élevé. La figure 4.10 montre également l'erreur de mesure du capteur proposé. Une variation de phase maximale de 7.5 degrés a été enregistrée à 60% de HR. La répétabilité a été vérifiée, et les résultats des différentes mesures ont été très bien approuvés.

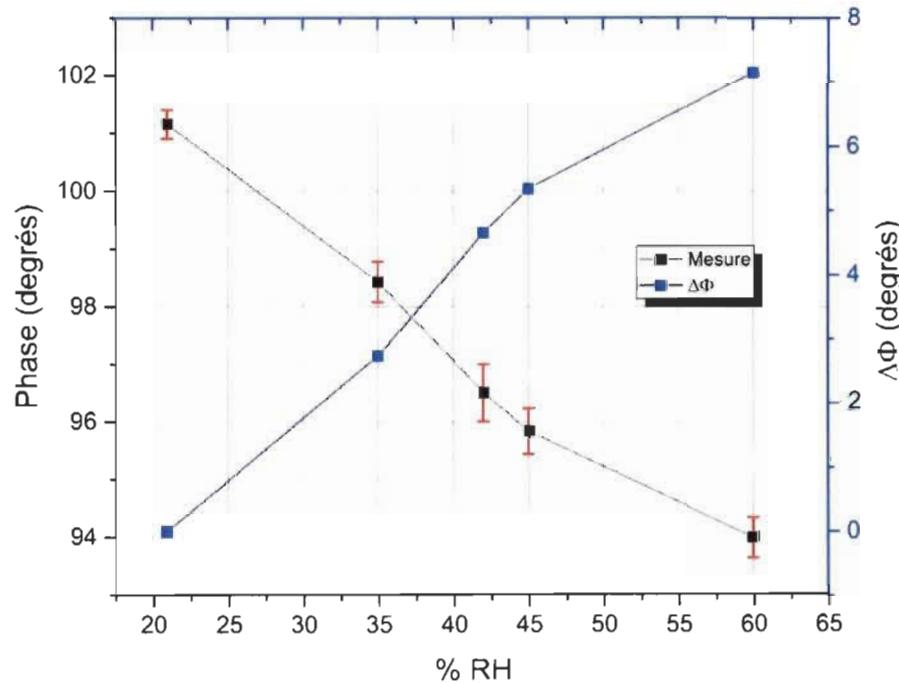


Figure 4. 10 : Caractéristiques de sensibilité de la structure proposée : (à gauche) la phase S31 mesurée en fonction de la variation de l'hydrogène. (à droite) la variation de la phase.

#### 4.2.2. PVOH :

Un autre matériau sensible, le PVOH, a été testé pour la détection de différents niveaux d'humidité. Pour cela, une variation d'humidité la plage de 30% à 65% RH a été appliquée au multi-capteur. Les résultats des mesures sont présentés à la figure 4.11 à l'aide du banc de test présenté dans la figure 4.7.

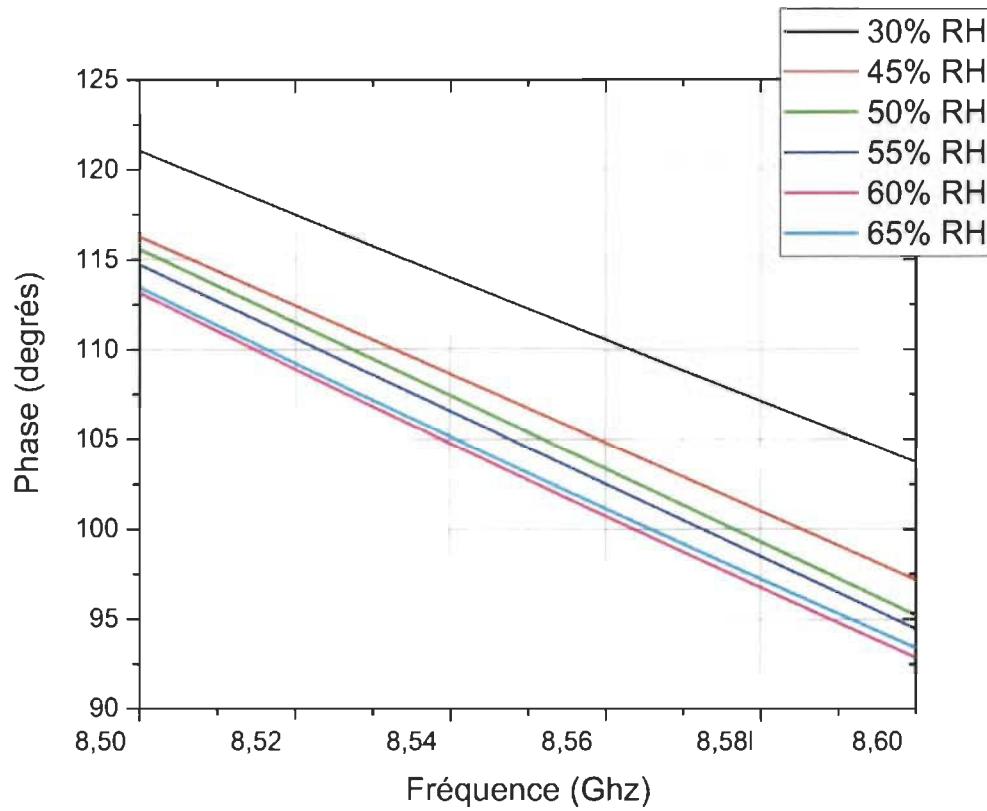


Figure 4. 11 : Phase  $S_{31}$  mesuré entre 30% et 65% RH

En augmentant le pourcentage d'humidité relative de 30% à 65%, la courbe d'évolution du décalage de phase du mode fondamental  $TE_{10}$  par rapport à la concentration d'humidité a été tracée dans la Figure 4.12. Le décalage de phase mesuré est supérieur à 8 degrés.

L'expérience a été répétée dans les mêmes conditions expérimentales cinq fois pour tester la répétabilité des mesures.

Les résultats montrent que la structure présentée est sensible à la présence d'humidité, la phase S31 étant décalée vers une valeur de phase inférieure pour un niveau d'humidité plus élevé. La figure 4.12 montre également l'erreur de mesure du capteur proposé. Une variation de phase maximale de 8 dB a été enregistrée à 65% de HR. La répétabilité a été vérifiée, et les résultats des différentes mesures ont été très bien approuvés.

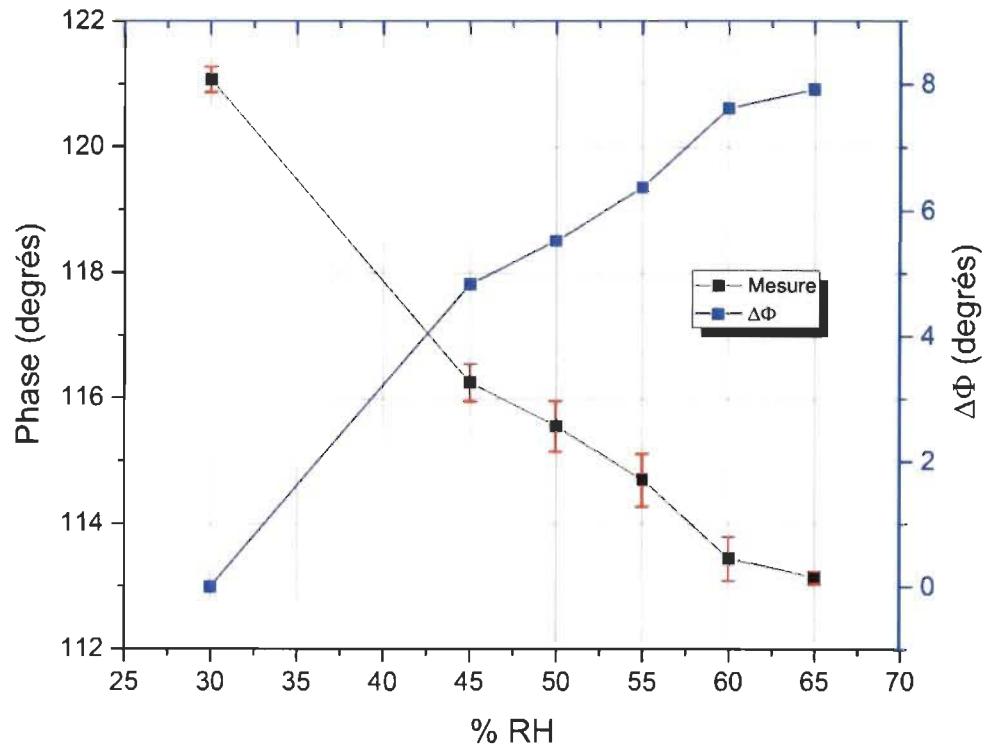


Figure 4. 12 : Caractéristiques de sensibilité de la structure proposée :  
 (à gauche) la phase  $S_{31}$  mesurée en fonction de la variation de RH.  
 (Droite) variation de phase

### 4.3. Considérations de conception

La conception du diviseur de puissance intégré au substrat suit plusieurs considérations dont le choix de la longueur des branches afin d'assurer une amélioration de la sensibilité. Dans ce contexte, et afin d'étudier l'effet des longueurs ainsi que des dimensions de la partie fonctionnalisée, des simulations à l'aide de l'outil de simulation ADS ont été effectuées pour plusieurs cas de figure.

#### 4.3.1. Variation des dimensions de la zone fonctionnalisée en considérant une longueur fixe des branches

Pour ce premier cas, les dimensions de la zone fonctionnalisée ont été variées en réduisant la longueur de cette dernière. Les longueurs considérées correspondent à la moitié et au quart de la longueur initiale. La longueur des deux branches du diviseur de puissance a été gardée fixe comme présenté dans la figure 4.13.

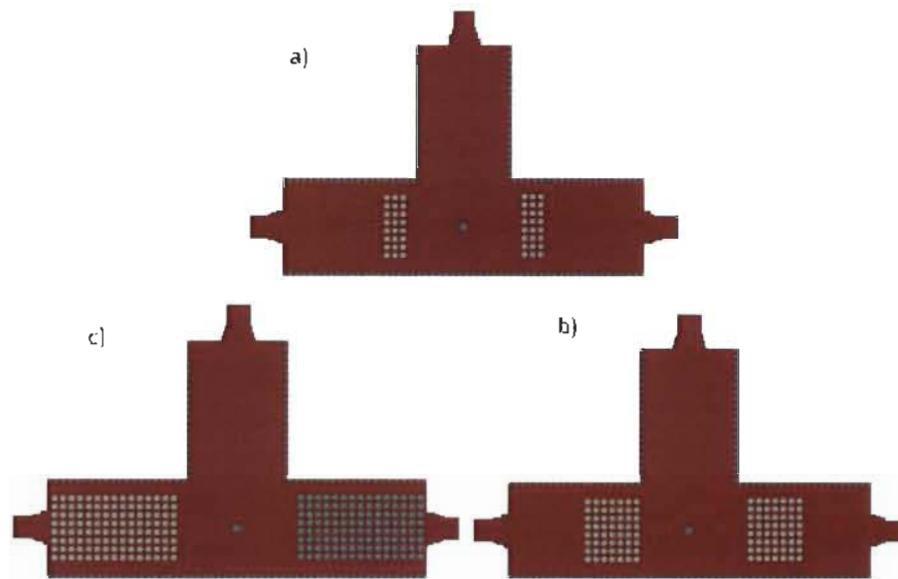


Figure 4.13 : Différentes longueurs de la zone fonctionnalisé a)  $l = 0.25 l_0$  b)  
 l=0.5  $l_0$  c)  $l = l_0$

Où  $l_0$  est la longueur de la zone fonctionnalisée du dispositif fabriqué

Après la conception des différents dispositifs, une analyse de propagation a été effectuée en considérant le dioxyde d'étain comme élément sensible pour la fonctionnalisation des branches des diviseurs de puissance SIW. Les différents résultats de ces simulations sont présentés dans la figure 4.14, la figure 4.15 et la figure 4.16.

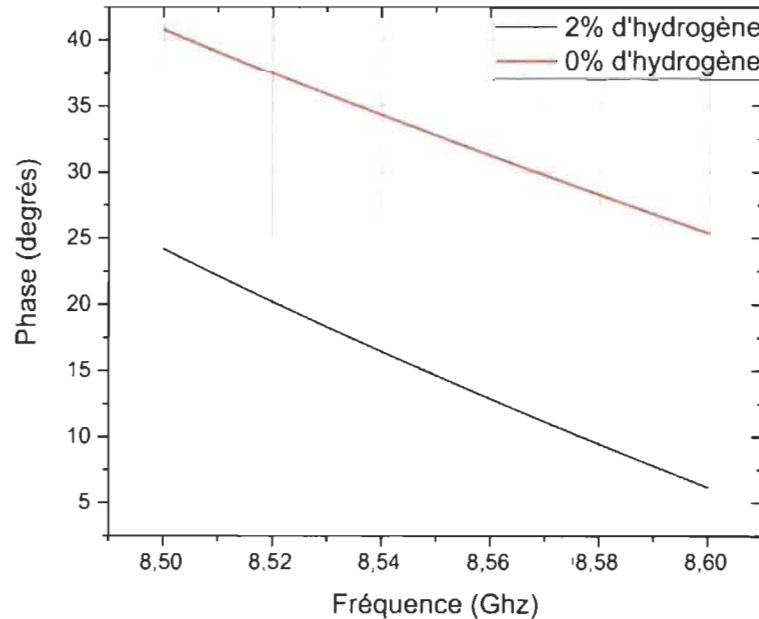


Figure 4. 14 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l=l_0$

La figure 4.14 présente un déphasage de 18 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur de la zone fonctionnalisée égale à  $l_0$ .

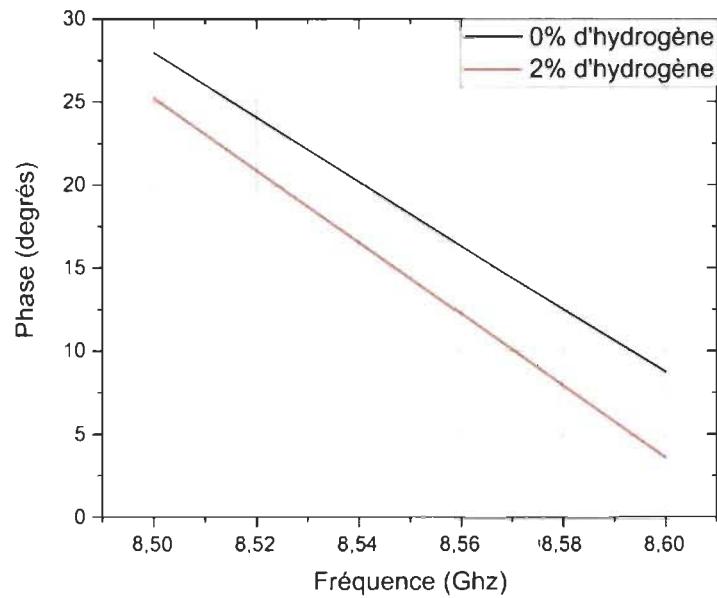


Figure 4. 15: Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l=0.5 l_0$

La figure 4.15 présente un déphasage de 4 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur de la zone fonctionnalisée égale à la moitié de  $l_0$ .

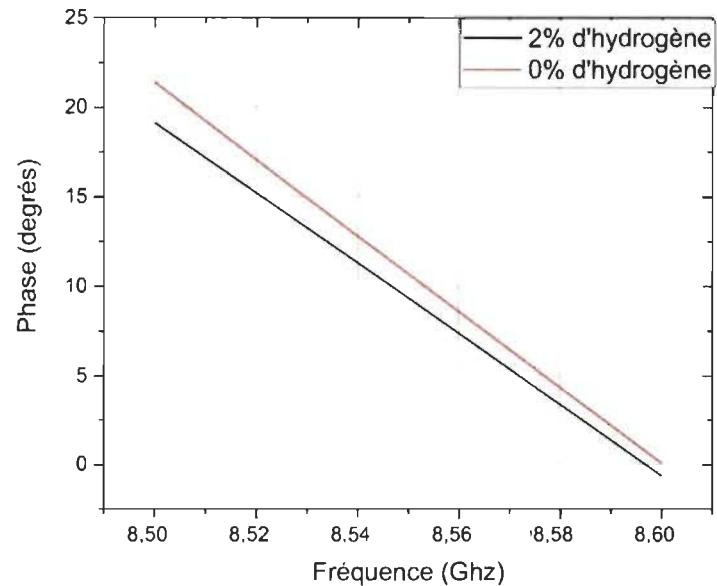


Figure 4. 16: Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l=0.25 l_0$

La figure 4.16 présente un déphasage de 1.6 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur de la zone fonctionnalisée égale au quart de  $l_0$ .

D'après ces résultats, le déphasage entre 0% et 2% d'hydrogène varie pour les différentes longueurs de la zone fonctionnalisée. En effet, la sensibilité de chaque branche dépend des dimensions de la région fonctionnalisée introduite dans cette dernière et augmente pour une longueur de région sensible plus importante. La figure 4.17 suivante présente le déphasage pour chacune des différentes longueurs de la région fonctionnalisé.

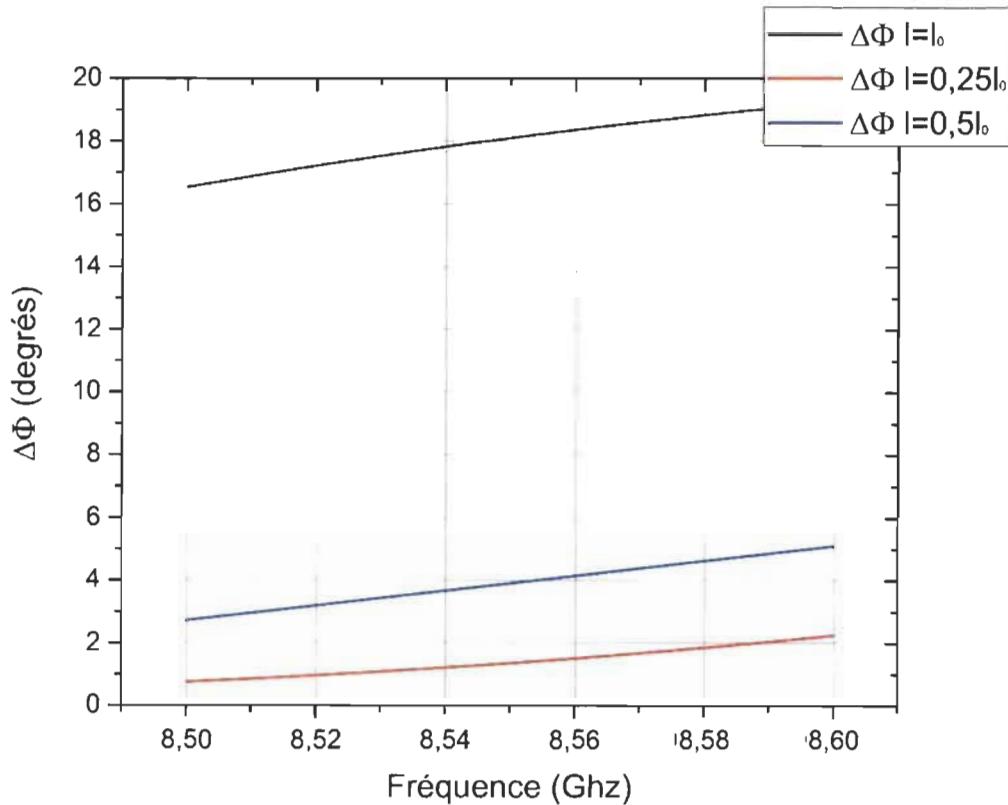


Figure 4. 17 : Le déphasage pour les différentes longueurs de la région fonctionnalisée entre 0% et 2% d'hydrogène

La sensibilité du diviseur de puissance est liée à la longueur de la zone fonctionnalisée choisie du dispositif et peut être améliorée en augmentant  $l$ .

#### 4.3.2. Variation de la longueur des branches en considérant des dimensions fixes de la zone fonctionnalisée

Pour le deuxième cas, la longueur  $l$  des branches du diviseur de puissance SIW a été variée en augmentant la longueur de cette dernière. Les dimensions de la zone fonctionnalisée du diviseur de puissance ont été gardées fixes tel que présenté dans la figure 4.18.

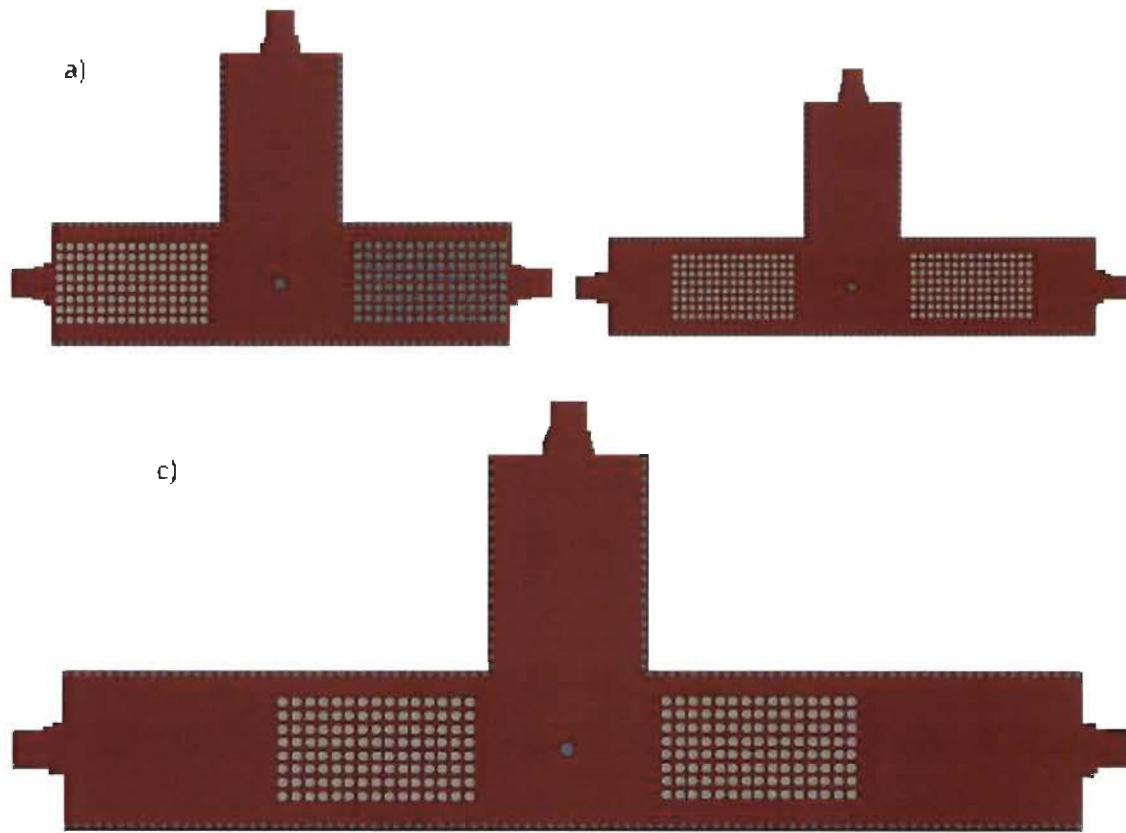


Figure 4. 18 : Différentes longueurs de la zone fonctionnalisée a)  $l = l_0$   
b)  $l = 1.5 l_0$  c)  $l = 2 l_0$

Où  $l_0$  est la longueur des branches du diviseur de puissance intégré au substrat fabriqué.

Après avoir conçu les différents dispositifs avec les différentes longueurs, une simulation pour une analyse de propagation a été effectuée. Les différents résultats entre 0% et 2% d'hydrogène sont présentés dans la figure 4.19, la figure 4.20 et la figure 4.21.

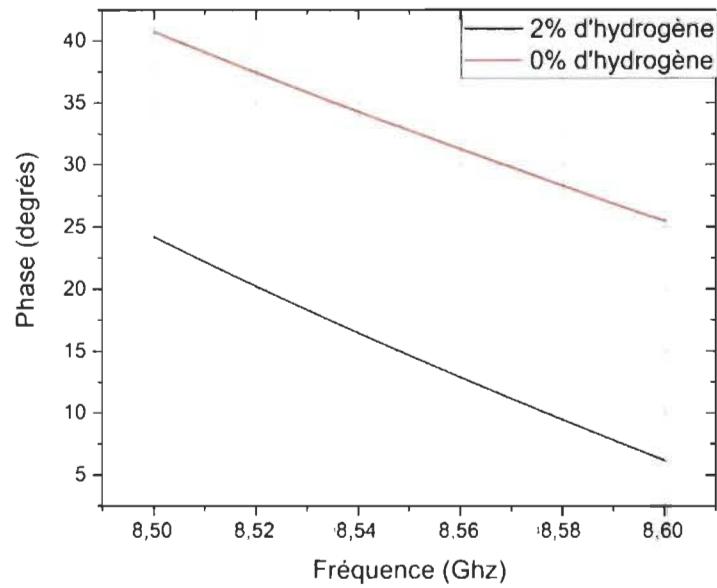


Figure 4. 19 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l = l_0$

La figure 4.19 présente un déphasage de 18 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur des branches du diviseur SIW égale à  $l_0$ .

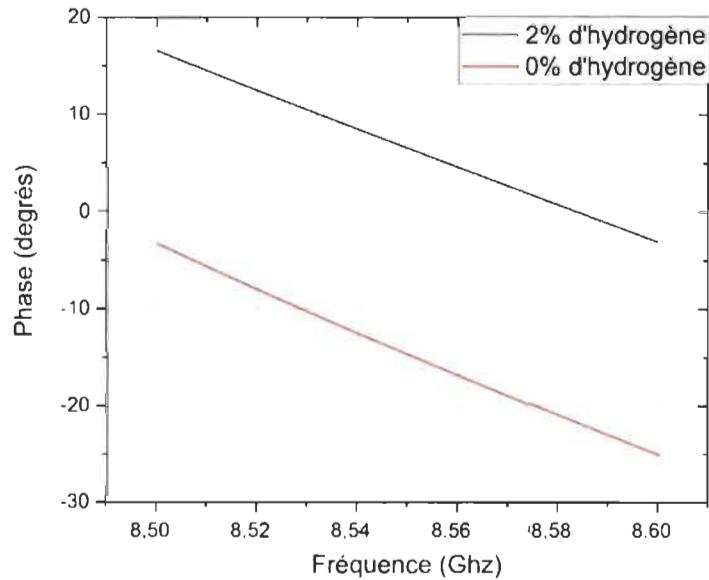


Figure 4. 20 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l = 1.5 l_0$

La figure 4.20 présente un déphasage de 21 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur des branches du diviseur SIW égale à une fois et demi  $l_0$ .

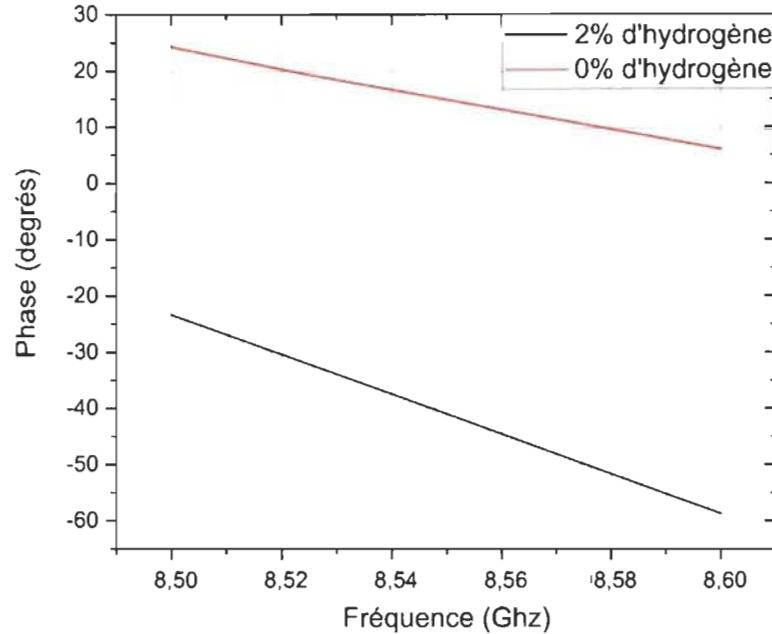


Figure 4. 21 : Phase mesurée entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l = 2 l_0$

La figure 4.21 présente un déphasage de 55 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur des branches du diviseur SIW égale au double de  $l_0$ .

D'après ces résultats, le déphasage entre 0% et 2% d'hydrogène varie pour les différentes longueurs des branches du diviseur SIW. La sensibilité des branches dépend de la longueur de ces dernières et augmente pour des longueurs plus grandes. La figure 4.22 présente le déphasage pour les différentes longueurs choisies.

La sensibilité du diviseur de puissance intégré au substrat peut être améliorée en augmentant  $l$ .

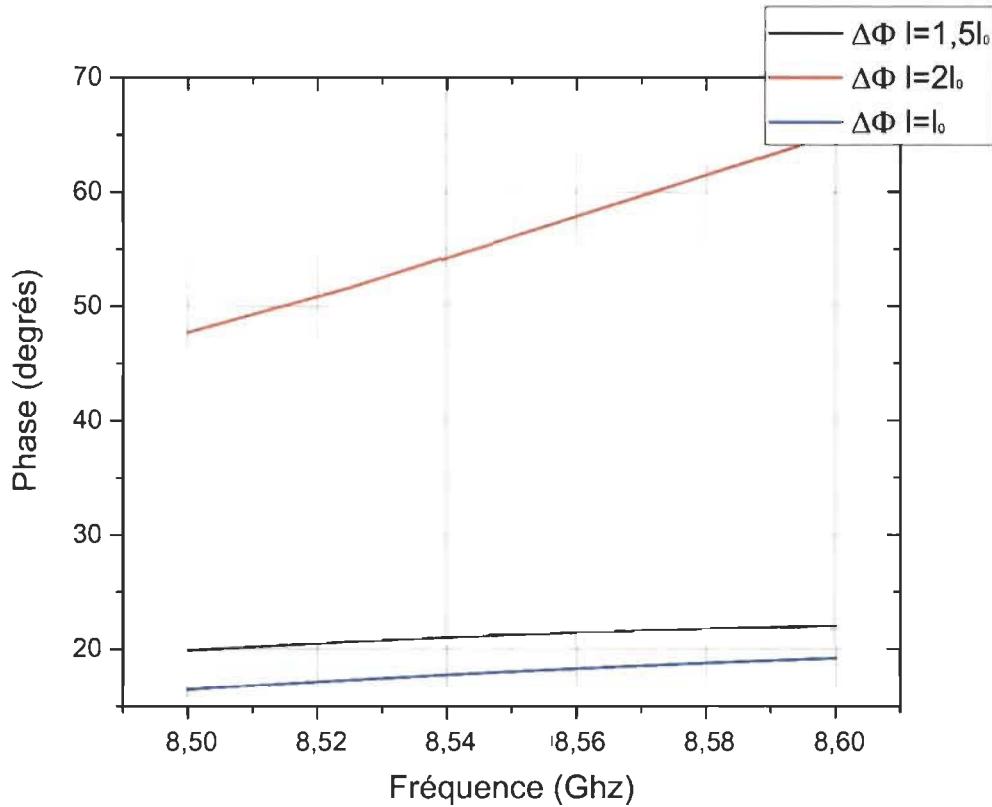


Figure 4.22 : Le déphasage pour les différentes longueurs des branches entre 0% et 2% d'hydrogène

#### 4.3.3. Variation de la longueur des branches et des dimensions de la zone fonctionnalisée

Pour le dernier cas, la longueur  $l$  des branches du diviseur de puissance SIW et les dimensions de la zone fonctionnalisée ont été variée en augmentant et en diminuant les longueurs de ces dernières. Les designs des dispositifs simulés sont présentés dans la figure 4.23.

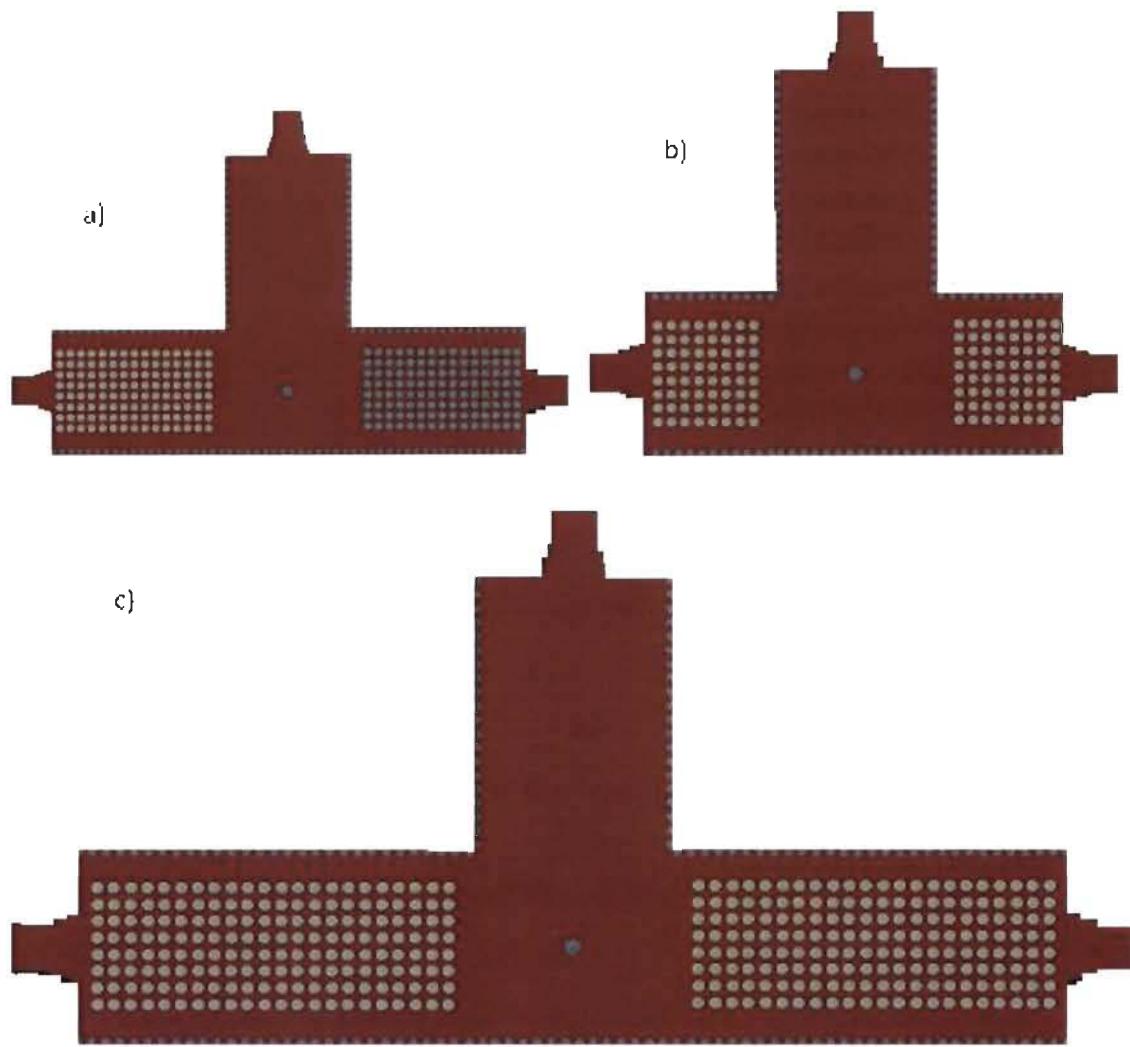


Figure 4. 23 : Différentes longueurs de la zone fonctionnalisé et des branches a)  $l = l_0$  b)  $l = 0.5 l_0$  c)  $l = 1.5 l_0$

Où  $l_0$  est la longueur des branches du diviseur de puissance intégré au substrat fabriqué et de la longueur de la zone fonctionnalisée.

Après la génération des différents prototypes du capteur SIW avec les différentes longueurs des branches et les différentes longueurs de la zone fonctionnalisé, les résultats de simulation entre 0% et 2% d'hydrogène de ces capteurs en technologie de guide d'onde intégrés au substrat ont été extraite. Ces différents résultats sont présentés dans la figure 4.24, la figure 4.25 et la figure 4.26.

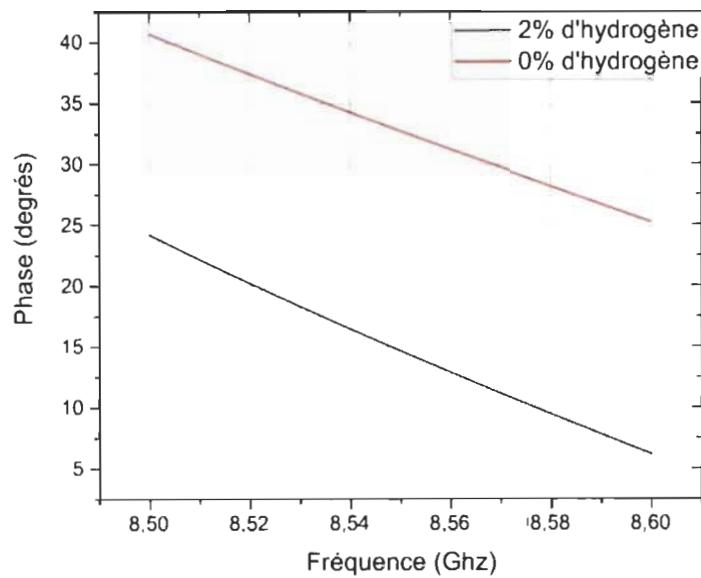


Figure 4. 24 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l = l_0$

La figure 4.24 présente un déphasage de 18 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur des branches du diviseur de puissance intégré au substrat et une longueur de la région fonctionnalisé égale à  $l_0$ .

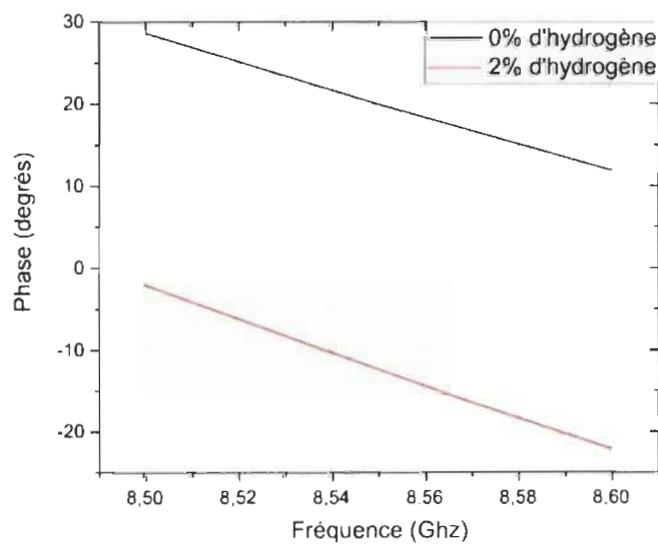


Figure 4. 25 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l = 1.5 l_0$

La figure 4.25 présente un déphasage de 32.5 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur des branches du diviseur de puissance intégré au substrat et une longueur de la région fonctionnalisé égale à une fois et demi  $l_0$ .

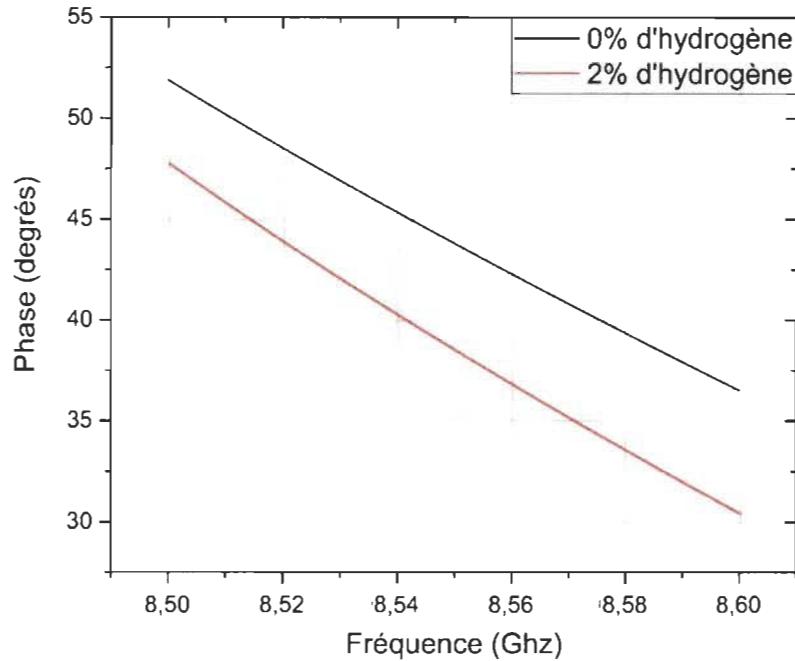


Figure 4. 26 : Phase mesuré entre 0% et 2% d'hydrogène pour  $l=0.5 l_0$

La figure 4.26 présente un déphasage supérieur à 5 degrés à une fréquence de 8.55 GHz entre 0% et 2% d'hydrogène pour une longueur des branches du diviseur de puissance intégré au substrat et une longueur de la région fonctionnalisé égale à la moitié de  $l_0$ .

D'après ces résultats, le déphasage entre 0% et 2% d'hydrogène varie pour les différentes longueurs des branches et les différentes dimensions de la région fonctionnalisée du capteur SIW. La sensibilité du dispositif dépend de la longueur de ces dernières et augmente pour des longueurs plus grandes et diminue pour les plus petites. La figure 4.27 présente le déphasage pour les différentes longueurs choisies.

La sensibilité du diviseur de puissance intégré au substrat est liée à la longueur des branches et de la longueur de la zone fonctionnalisé choisies du dispositif peut être améliorée en augmentant  $l$ .

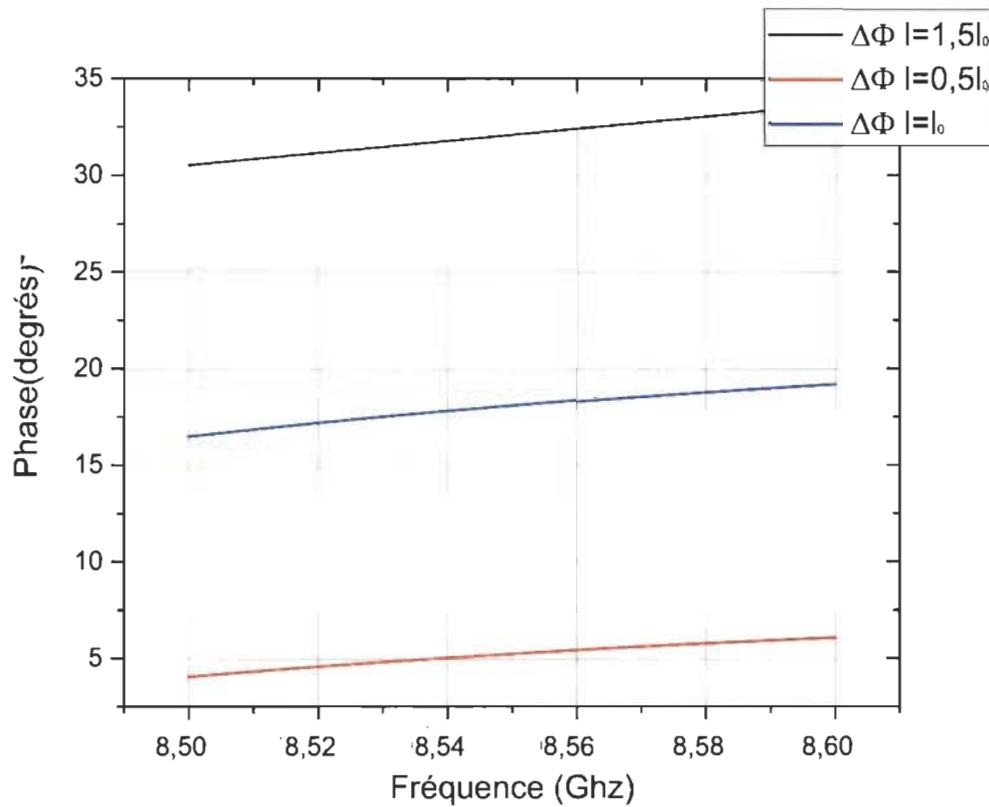


Figure 4. 27 : Le déphasage pour les différentes longueurs des branches et les différentes longueurs de la zone fonctionnalisé entre 0% et 2% d'hydrogène.

#### 4.4. Multicapteur à plusieurs branches

Le multicapteur intégré au substrat présente les avantages d'être passif, compact et peu coûteux. En outre, la structure de base peut être utilisée pour détecter d'autres gaz, ou même des liquides, selon les matériaux sensibles utilisés.

Le multicapteur utilisé dans ces travaux présente deux ports de sortie, mais une fabrication d'un modèle de multicapteurs à plusieurs branches pour détecter plusieurs sortes de gaz est possible et c'est présenté dans la figure 4.28.

En outre, le diviseur de puissance SIW pourrait être utilisé dans un oscillateur à ligne à retard, afin de transformer la mesure de phase en une mesure de fréquence.

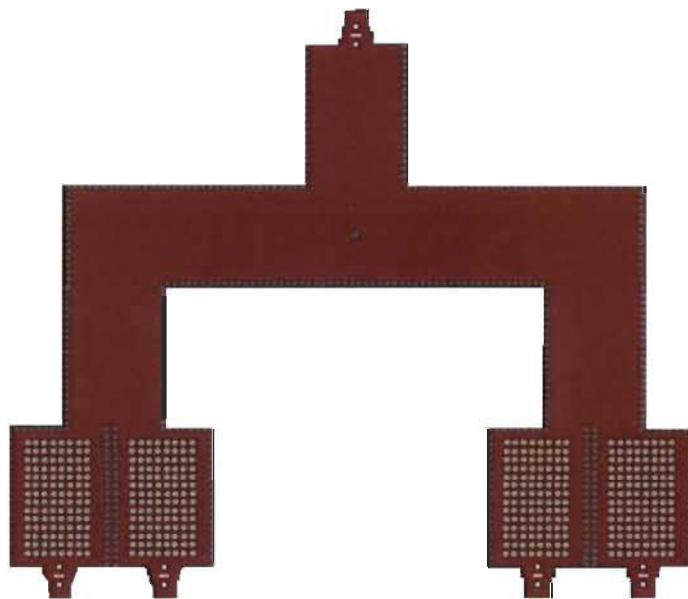


Figure 4. 28 : Multicapteur à plusieurs branches

## Chapitre 5 : Conclusion

Le travail présenté dans ce manuscrit porte sur l'étude, la conception et la réalisation d'un nouveau multi-capteur de gaz passif. L'approche du multi-capteur environnemental à base d'un diviseur de puissance intégré au substrat est innovante et présente un fort potentiel d'application.

L'accomplissement de ce projet de recherche a demandé d'acquérir des notions solides sur les technologies et processus de conception des SIWs. De ce fait, et dans un premier temps, une étude bibliographique sur la technologie des guides d'ondes intégrés au substrat a été effectuée afin de maîtriser les méthodes de conception du SIW. Ensuite, nous avons proposé une solution originale d'un multi-capteur pour la détection de gaz qui est basée sur la fonctionnalisation d'un diviseur de puissance SIW avec des matériaux diélectriques sensibles aux gaz. Le changement de la permittivité et des pertes diélectriques dans la région fonctionnalisée en présence de gaz se traduit par un décalage de la phase.

Ensuite, pour concevoir le multi-capteur à base de diviseur de puissance SIW et déterminer la région fonctionnalisée, un modèle numérique du dispositif a été simulé via l'outil de simulation électromagnétique ADS afin de déterminer la bande de fréquence du diviseur de puissance simulée de ce dernier qui dépend particulièrement des dimensions de la structure.

Une fois le dispositif réalisé, des tests ont été effectués avec deux types de gaz (l'humidité et l'hydrogène). Pour la détection de l'hydrogène et la détection de l'humidité une revue de littérature a été faite sur les matériaux potentiels qui pourraient être intégrés dans le multi capteur SIW en s'intéressant à leurs propriétés diélectriques et les techniques utilisées pour leur élaboration. Le dioxyde d'étain  $\text{SnO}_2$  a été choisi pour fonctionnaliser les trous dans une branche du diviseur de puissance SIW et le rendre sensible à la présence de l'hydrogène, et la nanocellulose et le PVOH ont été choisies pour fonctionnaliser et le rendre sensible à la présence d'humidité.

Des considérations de conception ont été présentées et on a conclu que la sensibilité du diviseur de puissance en technologie de guide d'onde intégré au substrat augmente pour une longueur de la zone fonctionnalisée et une longueur des branches plus élevée.

## Références :

- [1] T. Hübert et al., "Hydrogen sensors—A review," *Sensors Actuators B*, vol. 157, no. 2, pp. 329–352, Oct. 2011.
- [2] H. El Matbouly et al., "Assessment of commercial micro-machined hydrogen sensors performance metrics for safety sensing applications," *Int.J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 9, pp. 4664–4673, Mar. 2014.
- [3] X. lu, et al, "A Survey on Gas Sensing Technology", *Sensors*, 12, 9635-9665, 2012
- [4] K. Wu et al., "The substrate integrated circuits—A new concept for highfrequency electronics and optoelectronics," in Proc. TELSIKS, Serbia and Montenegro, Belgrade, vol. 1, 2003, pp. 3–10.
- [5] H. El Matbouly et al., "Passive microwave substrate integrated cavity resonator for humidity sensing," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 12, pp. 4150–4156, Dec. 2015.
- [6] A. Benleulmi, N. Y. Sama, P. Ferrari and F. Domingue, "Substrate Integrated Waveguide Phase Shifter for Hydrogen Sensing," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 744-746, Sept. 2016.
- [7] R. Moro, S. Kim, M. Bozzi, and M. Tentzeris, "Inkjet-printed paper-based substrate-integrated waveguide (SIW) components and antennas," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 5, pp. 197-204, // 2013.
- [8] R. Moro, M. Bozzi, A. Collado, A. Georgiadis, and S. Via, "Plastic-based Substrate Integrated Waveguide (SIW) components and antennas," *Amsterdam*, 2012, pp. 1007-1010.

- [9] R. Moro, M. Bozzi, S. Kim, and M. Tentzeris, "Novel inkjet-printed substrate integrated waveguide (SIW) structures on low-cost materials for wearable applications," Amsterdam, 2012, pp. 72-75.
- [10] S. Kim, M. Riccardo, M. Bozzi, S. Nikolaou, and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed wearable microwave components for biomedical applications," Gothenburg, 2013, pp. 1926-1929.
- [11] R. Moro, S. Kim, M. Bozzi, and M. Tentzeris, "Inkjet-printed paper-based substrate-integrated waveguide (SIW) components and antennas," International Journal of Microwave and Wireless Technologies, vol. 5, pp. 197-204, // 2013.
- [12] R. Moro, M. Bozzi, A. Collado, A. Georgiadis, and S. Via, "Plastic-based Substrate Integrated Waveguide (SIW) components and antennas," Amsterdam, 2012, pp. 1007-1010.
- [13] R. Moro, M. Bozzi, S. Kim, and M. Tentzeris, "Novel inkjet-printed substrate integrated waveguide (SIW) structures on low-cost materials for wearable applications," Amsterdam, 2012, pp. 72-75.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers, "The IEEE standard dictionary of electrical and electronics terms"; 6th ed. New York, N.Y., Institute of Electrical and Electronics Engineers, c1997. IEEE Std 100-1996. ISBN 1-55937-833-6
- [15] Chakravorty, Pragnan. "Analysis of Rectangular Waveguides – An Intuitive Approach". IETE Journal of Education. 55 (2): 76–80. doi:10.1080/09747338.2014.1002819.
- [16] Y. Modi and C. A. Balanis, "PEC-PMC Baffle Inside Circular Cross Section Waveguide for Reduction of Cut-Off Frequency," in IEEE Microwave and Wireless

Components Letters, vol. 26, no. 3, pp. 171-173, March 2016. doi: 10.1109/LMWC.2016.2524529

- [17] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 3rd Ed. John Wiley & Sons, 2005.
- [18] D. Deslandes, M. Bozzi, P. Arcioni, and K. Wu, "Substrate integrated slab waveguide (SISW) for wideband microwave applications," Philadelphia, PA, 2003, pp. 1103-1106.
- [19] R. Torres-Torres, G. Romo, B. Horine, A. Sánchez, and H. Heck, "Full characterization of substrate integrated waveguides from S-parameter measurements," Scottsdale, AZ, 2006, pp. 277-280.
- [20] D. Deslandes and W. Ke, "Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, pp. 2516-2526, 2006.
- [21] D. Deslandes, "Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions," in 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2010, pp. 704-707.
- [22] L. Ke, "An efficient method for analysis of arbitrary nonuniform transmission lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 45, pp. 9-14, 1997
- [23] I. Boudreau, « Etude d'un déphasageur large bande en technologie de guide d'ondes intégré au substrat » université de Montréal avril 2012.
- [24] MacGorman, W. D. Rust, W. David Rust. (1998). The electrical nature of storms. page 14. ISBN 9780195073379
- [25] D. M. Pozar, "Microwave Engineering," 3rd Ed. John Wiley & Sons, 2005.

- [26] . Deslandes, D. and K. Wu, "Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 51, No. 2, 593{596, Feb. 2003.
- [27] Xu, F. and K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 53, No. 1, 66{73, 2005.
- [28] Hirokawa, J., K. Sakurai, M. Ando, and N. Goto, "An analysis of a waveguide T-junction with an inductive post," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 39, No. 3, 563{566, Mar. 1991.
- [29] Zhaosheng He, Jingye Cai, Zhenhai Shao\*, Xiang Li, and Yongmao Huang, "A NOVEL POWER DIVIDER INTEGRATED WITH SIW AND DGS TECHNOLOGY", *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 139, 289-301, 2013
- [30] . H. Meixner, U. Lampe Metal oxide sensor *Sensors and Actuators B*, (1996), 33, pp. 198-202.
- [31] M. Ndoye et al, Sensitivity evaluation of dielectric perturbed substrate integrated resonators for hydrogen detection, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 251, 1 November 2016, Pages 198-206, ISSN 0924-4247
- [32] T. Miller, S. Bakrania, C. Perez, M. Wooldridge, A new method for direct preparation of tin dioxide nanocomposite materials, *J. Mater. Res.* 20 (June) (2005) 2977–2987
- [33] Crawford, R. L. (1981). Lignin biodegradation and transformation. New York: John Wiley and Sons. ISBN 0-471-05743-6.
- [34] Updegraff DM (1969). "Semimicro determination of cellulose in biological materials". *Analytical Biochemistry*. 32 (3): 420–424. doi:10.1016/S0003-2697(69)80009-6. PMID 5361396.

- [35] Romeo, Tony (2008). *Bacterial biofilms*. Berlin: Springer. pp.258–263. ISBN 978-3-540-75418-3.
- [36] Klemm, Dieter; Heublein, Brigitte; Fink, Hans-Peter; Bohn, Andreas (2005). "Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material". *Angew. Chem. Int. Ed.* 44 (22): 3358–93. doi:10.1002/anie.200460587. PMID 15861454.
- [37] Peng BL, Dhar N, Liu HL, Tam KC (2011). "Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: A nanotechnology perspective." (PDF). *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* 89 (5): 1191–1206. doi:10.1002/cjce.20554.
- [38] Manfred L. Hallensleben "Polyvinyl Compounds, Others" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2000, Wiley-VCH, Weinheim. doi:10.1002/14356007.a21\_743
- [39] ADS. Keysight (Agilent), 2013. [Online]. Available: <http://www.keysight.com/en/pc-1297143/Ads-simulation-software>
- [40] S. O. Nelson, "Density-permittivity relationships for powdered and granular materials," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 54, no. 5, pp. 2033–2040, Oct. 2005.
- [41] Adel Benleulmi, Nossikpendou Yves Sama, Philippe Ferrari, and Frédéric Domingue, "Substrate Integrated Waveguide Phase Shifter for Hydrogen Sensing," *ieee microwave and wireless components letters*, vol. 26, no. 9, September 2016
- [42] K. Wu et al., "The substrate integrated circuits—A new concept for highfrequency electronics and optoelectronics," in *Proc. TELSIKS*, Serbia and Montenegro, Belgrade, vol. 1, 2003, pp. 3–10.

- [43] H. El Matbouly et al., "Passive microwave substrate integrated cavity resonator for humidity sensing," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 12, pp. 4150–4156, Dec. 2015.
- [44] G. Martinelli et al., "A study of the moisture effects on SnO<sub>2</sub> thick films by sensitivity and permittivity measurements," *Sensors Actuators B*, vol. 26, no. 1–3, pp. 53–55, 1995.