



**HAL**  
open science

# Étude et conception d'antennes transparentes et discrètes

Abdoulaye Sissoko

► **To cite this version:**

Abdoulaye Sissoko. Étude et conception d'antennes transparentes et discrètes. Sciences de l'ingénieur [physics]. Nantes Université; Université du Mali, 2022. Français. NNT: 2022NANU4038. tel-03890742v2

**HAL Id: tel-03890742**

**<https://theses.hal.science/tel-03890742v2>**

Submitted on 8 Dec 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# THESE DE DOCTORAT DE

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 601

*Mathématiques et Sciences et Technologies*

*de l'Information et de la Communication*

Spécialité : *Electronique*

&

UNIVERSITE DES SCIENCES, DES TECHNIQUES  
ET DES TECHNOLOGIES DE BAMAKO

Par

**Abdoulaye SISSOKO**

**Etude et conception d'antennes transparentes et discrètes**

Thèse présentée et soutenue à NANTES, le 6 octobre 2022

Unité de recherche : IETR UMR CNRS 6164

## Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Lou DUBARD  
Dioba SACKO

Professeur des Universités, Université Côte d'Azur  
Maître de Conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Bamako (Mali)

## Composition du Jury :

|                         |                  |   |
|-------------------------|------------------|---|
| Président :             | Jean-Lou DUBARD  | Professeur des Universités, Université Côte d'Azur  |
| Examineurs :            | Ibrahima KONÉ    | Maître de Conférences, École Normale Supérieure de Bamako (Mali)  |
|                         | Dioba SACKO      | Maître de Conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Bamako (Mali)                                      |
| Directeur de thèse :    | Tchanguiz RAZBAN | Professeur des Universités, Nantes Université   |
| Co-Directeur de thèse : | Badié DIOURTE    | Professeur des Universités, Université des Sciences des Techniques<br>et des Technologie de Bamako (Mali) |
| Co-encadrante :         | Anne CHOUSSEAUD  | Maître de Conférences, Nantes Université  |

*« Ce qui est important, ce n'est, ni d'être optimiste, ni pessimiste,  
mais d'être déterminé. »*

*Jean Monnet*

# Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués au sein de l'Institut d'Électronique et des Technologies du numéRique (IETR) site de Nantes dans l'Équipe STAR (Small and novel anTenna ARchitecture) située à l'École Polytechnique de Nantes Université en cotutelle avec l'Université des Sciences des Techniques et des Technologie de Bamako (USTTB). Ces travaux n'auraient pas été possibles sans toutes ces personnes qui ont partagé avec moi leurs expériences, leurs conseils et leurs soutiens du début de cette thèse jusqu'à son terme. Je voudrais les en remercier ici.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à Jean-François DIOURIS directeur adjoint de l'IETR site de Nantes pour m'avoir accueilli dans son laboratoire.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Tchanguiz RAZBAN, à mon encadrante Madame Anne CHOUSSEAUD, Maître de Conférences, tous de l'École Polytechnique de Nantes Université pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe de recherches ; à mon co-directeur de thèse, le Professeur Badié DIOURTÉ, de l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologie de Bamako (USTTB). Ils m'ont fourni un cadre et un soutien quotidien durant toute la durée de cette thèse. La qualité des travaux effectués est le fruit de la confiance et de la rigueur qu'ils ont su me témoigner.

Je remercie le Professeur Jean-Lou DUBARD Université Côte d'Azur d'avoir été rapporteur de cette thèse et président du jury de soutenance.

Ma reconnaissance à Messieurs Ibrahima KONÉ, Maître de Conférences à l'École Normale Supérieure de Bamako (Mali) et Dioba SACKO, Maître de Conférences, à l'École Nationale d'Ingénieurs de Bamako (Mali) d'avoir accepté d'examiner et de rapporter ce travail respectivement.

Je remercie particulièrement M. Marc BRUNET et M. Stéphane GINESTAR pour leur investissement inlassable dans la réalisation et la mesure des différents prototypes. Ma gratitude pour votre constante disponibilité et vos encouragements.

Un grand merci à Sandrine CHARLIER pour son accueil et sa disponibilité et pour toutes ces correspondances par mail depuis Nantes.

Mes remerciements vont également à tout le personnel de l'IETR qui a participé d'une manière ou d'une autre à cette thèse, Christophe BOURLIER, Yann MAHÉ...

Merci au Programme de Formation des Formateurs (Ministère de l'Enseignement Supérieur du Mali) pour le financement de cette thèse.

Je remercie toute ma famille qui m'a toujours soutenu : ma mère, mes frères et sœurs, mon épouse et mes enfants, pour leur patience durant mon absence.

Je pense enfin à tous mes amis, qui à chaque fois m'ont permis de me changer les idées grâce à leur bonne humeur.

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| <b>Introduction générale</b> .....  | 1  |
| <b>Contexte et motivation</b> .....   | 1  |
| <b>Objectifs et contribution</b> .....  | 1  |
| <b>Organisation du document</b> .....   | 2  |
| <b>Chapitre 1 Etat de l'art sur les matériaux conducteurs et diélectrique à faible impact visuel</b> .....  | 5  |
| <b>1.1. Présentation des principales solutions technologiques permettant de synthétiser des matériaux conducteurs transparents et choix</b> ..... | 5  |
| 1.1.1. Technologie à base d'oxydes transparents conducteurs (OTC).....  | 7  |
| 1.1.2. Technologie à base de film ultramince métallique.....  | 9  |
| 1.1.3. Technologie multicouche OTC/Métal/OTC.....   | 11 |
| 1.1.4. Technologie basée sur le graphène.....   | 14 |
| 1.1.5. Technologie à base de nanofils conducteurs.....  | 16 |
| 1.1.6. Technologie utilisant un grillage métallique.....  | 19 |
| 1.1.7. Technologie de maillage à pas micrométrique.....   | 21 |
| 1.1.8. Technologie de micro maillage métallique.....  | 24 |
| 1.1.9. Conclusion sur les matériaux conducteurs transparents.....   | 24 |
| <b>1.2. Présentation et choix de plusieurs solutions de substrats optiquement transparents</b> .....  | 25 |
| 1.2.1 Verres ou substrats inorganiques.....   | 25 |
| 1.2.1.1. Verre sodocalcique.....  | 25 |
| 1.2.1.2. Substrat monocristallin.....   | 26 |
| 1.2.1.3. Verres électroniques.....  | 26 |
| 1.2.2. Substrats organiques.....  | 27 |
| 1.2.3. Conclusion sur les substrats transparents.....   | 28 |
| <b>1.3. Travaux de référence sur les antennes à faible impact visuel</b> .....  | 28 |
| 1.3.1. Antenne à base de film ultramince métallique.....  | 28 |
| 1.3.2. Antenne en ITO.....  | 30 |
| 1.3.3. Antenne en multicouche.....  | 31 |
| 1.3.4. Antenne en graphène.....   | 34 |
| 1.3.5. Antenne à base de nanofils conducteurs.....  | 37 |
| 1.3.6. Antennes en technologie de métal maillé.....   | 38 |
| 1.3.6.1. Grillage épais.....  | 38 |
| 1.3.6.2. Maillage à pas micrométrique.....  | 41 |

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 1.3.6.3.  | Antenne en technologie micromaillage métallique .....  | 42        |
| 1.3.7.  | Conclusion sur les antennes à faible impact visuel.....  | 43        |
| 1.4.  | Bilan.....   | 43        |
| <b>Chapitre 2 Techniques de caractérisation diélectrique des substrats et caractérisation du substrat utilisé .....</b> |  | <b>45</b> |
| 2.1.  | Techniques de caractérisation diélectrique des substrats .....   | 45        |
| 2.1.1.  | Méthodes non résonantes .....  | 46        |
| 2.1.1.1.  | La méthode par capacité plan métal-isolant-métal (MIM) .....   | 46        |
| En Basse Fréquence (MIM-BF) .....   | 46   |           |
| En Haute fréquence (MIM-HF) .....   | 47   |           |
| 2.1.1.2.  | Méthode de la ligne de transmission / réflexion.....   | 48        |
| 2.1.1.3.  | Méthode par sonde diélectrique (Coaxial probe) .....   | 50        |
| 2.1.1.4.  | Méthode en espace libre .....  | 53        |
| 2.1.2.  | Méthodes résonantes .....  | 56        |
| 2.1.2.1.  | Méthode utilisant une cavité résonante .....   | 56        |
| 2.1.2.2.  | Méthode utilisant une cellule triplaque à base de résonateurs .....  | 59        |
| 2.1.2.3.  | Méthode utilisant un Té résonant .....   | 60        |
| 2.1.3.  | Conclusion et choix.....   | 65        |
| 2.2.  | Caractérisation diélectrique de la technologie microruban sur Borofloat 33 retenue pour la conception d'antenne à faible impact visuel ..... | 65        |
| 2.2.1.  | Caractérisation de la technologie microruban métallisations pleines .....  | 66        |
| 2.2.2.  | Caractérisation de la technologie microruban à métallisations grillagées ..  | 67        |
| 2.3.  | Conclusion .....   | 69        |
| <b>Chapitre 3 Process technologique de réalisation des antennes grillagées a faible impact visuel.....</b>              |  | <b>71</b> |
| 3.1.  | Démarche de réalisation.....   | 71        |
| 3.2.  | Nettoyage des échantillons .....   | 74        |
| 3.3.  | Processus de dépôt de couche mince conductrice.....  | 75        |
| 3.3.1.  | Procédé physique de pulvérisation cathodique .....   | 78        |
| 3.3.1.1.  | Généralités.....   | 78        |
| 3.3.1.2.  | Les différents types de pulvérisations cathodiques .....   | 80        |
| 3.3.1.3.  | Les différents types de sources d'alimentation de pulvérisation cathodique ..  | 81        |
| Conclusion et choix.....  |  | 85        |
| 3.3.1.4.  | Dépôt de couches minces de cuivre/titane par pulvérisation cathodique magnétron  | 85        |
| 3.4.  | Procédé chimique d'épaississement de la couche métallique par électrodéposition .....  | 89        |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 3.4.1.1.  | Principe.....  | 89         |
| 3.4.1.2.  | Montage et cellule expérimentale.....  | 90         |
| 3.5.  | Mise en forme des antennes grillagées : Réalisation du maillage par photolithographie et gravure chimique par voie humide..... | 91         |
| 3.5.1.  | La photolithographie.....  | 91         |
| 3.5.1.1.  | Principe et grandes étapes.....  | 91         |
| 3.5.1.2.  | Étapes pratiques de réalisation des antennes .....   | 95         |
| 3.5.2.  | Gravure chimique .....   | 99         |
| 3.5.2.1.  | Généralités.....   | 99         |
| 3.5.2.2.  | Étapes pratiques.....  | 100        |
| 3.6.  | Mesures d'épaisseur de la couche de cuivre par profilométrie.....  | 101        |
| 3.7.  | Soudure des connecteurs sur le patch.....  | 103        |
| 3.8.  | Conclusion .....   | 104        |
| <b>Chapitre 4 Mesure et modélisation de prototypes d'antennes patch</b> |  |            |
| <b>..... 105</b>  |  |            |
| 4.1.  | Description et dimensionnement des antennes .....  | 105        |
| 4.1.1.  | Caractéristiques de réalisation de l'antenne opaque .....  | 105        |
| 4.1.2.  | Les antennes à faible impact visuel.....   | 106        |
| 4.2.  | Simulation d'antenne grillagée à partir d'antenne pleine sur HFSS.....   | 108        |
| 4.3.  | Méthodes et moyens de mesure des échantillons réalisés.....  | 117        |
| 4.3.1.  | Méthode de mesure de la résistivité et de la résistance par carré.....   | 117        |
| 4.3.2.  | Transparence optique ou transmittance.....   | 119        |
| 4.3.3.  | Mesure des paramètres S .....  | 120        |
| 4.3.4.  | Mesure du diagramme de rayonnement.....  | 121        |
| 4.4.  | Performances électriques et optiques des antennes.....   | 122        |
| 4.4.1.  | Mesure de la transparence optique des antennes grillagées .....  | 122        |
| 4.4.2.  | Resistance par carré .....   | 125        |
| 4.4.3.  | Mesure du coefficient de réflexion des antennes .....  | 125        |
| 4.4.4.  | Mesure du rayonnement des antennes (Gain et diagramme de rayonnement) .....  | 128        |
| 4.5.  | Conclusion .....   | 132        |
| <b>Conclusion Générale et Perspectives.....</b>                         |  | <b>133</b> |

# Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <i>Figure 1-1 : Ligne résistive</i> .....  | 6  |
| <i>Figure 1-2 : Schéma de principe du spectromètre UV-visible monofaisceau [7]</i> .....   | 6  |
| <i>Figure 1-3 L'oxyde d'indium-étain [11]</i> .....  | 8  |
| <i>Figure 1-4 : Evolution de la transmittance optique d'un film d'ITO en fonction de la longueur d'onde mise en jeu et de son épaisseur <math>e_{ITO\_11}=252\text{nm}</math> et <math>e_{ITO\_2}=748\text{nm}</math> [12].</i>  | 9  |
| <i>Figure 1-5: Comparaison des performances optiques de l'UTMF de Nickel et de l'ITO, a) Transparence des couches UTMF de Nickel et d'ITO recuit dans la bande UV-VIS (Ultra Violet-Visible), b) Transparence optique dans la bande VIS-NIR (Visible-Near Infra Rouge) [8].</i> .....  | 10 |
| <i>Figure 1-6 : Représentation des valeurs de transmittance et de résistance de feuille obtenues pour les revêtements Ag et Cu filtrés en fonction de l'épaisseur du film [18].</i> .....  | 11 |
| <i>Figure 1-7 : Schéma d'un a) simple multicouche ITO, (b) double multicouche</i> .....  | 12 |
| <i>Figure 1-8: Relation entre la figure de mérite des électrodes ITO / métal / ITO et l'épaisseur de couche métallique correspondante (<math>t_{Me}</math>), pour les films métalliques Ag ou Cu. [28]</i>   | 13 |
| <i>Figure 1-9 : Variation de la transmittance des structures AZO/Au suivant différentes épaisseurs de la couche ultramince d'or, selon (0–1,5 nm). [31].</i> .....   | 14 |
| <i>Figure 1-10 : Graphène [36].</i> .....  | 14 |
| <i>Figure 1-11 : Croissance linéaire expérimentale et théorique de la conductivité du graphène en fonction du nombre de couches avant et après dopage [38].</i> .....  | 15 |
| <i>Figure 1-12: Spectres de transmittance de régions monocouches et bicouches de l'échantillon</i> .....   | 15 |
| <i>Figure 1-13 : Images microscopie électronique à balayage MEB de nanofils d'argent [48].</i> .....   | 16 |
| <i>Figure 1-14 : Schéma conceptuel des systèmes de distribution de nanotubes de carbone à paroi simple (SWNT) (A) et de nanotubes de carbone à parois multiples (MWNT) (B) montrant les dimensions typiques de la longueur, de la largeur et de la distance de séparation entre les couches de graphène dans les MWNT. [60].</i> ..... | 17 |
| <i>Figure 1-15 : Résistance par carré en fonction de la transmittance optique à <math>\lambda = 520\text{ nm}</math> pour des feuilles de nanotubes de carbone de différentes épaisseurs. [65].</i> .....  | 18 |
| <i>Figure 1-16: Transmittance (550 nm) tracée en fonction de la résistance par carré pour les films minces [66]</i> .....  | 18 |
| <i>Figure 1-17 : Transparence optique des électrodes AgNW et SWCNT, et électrodes hybrides [68]</i> .....  | 19 |
| <i>Figure 1-18: Antenne Patch grillagée a) Rectangulaire b) Circulaire [69]</i> .....  | 20 |
| <i>Figure 1-19 : Schéma de principe de la discrimination de deux objets observés à l'œil nu (a), géométrie de la maille (b).</i> .....   | 21 |
| <i>Figure 1-20: Ouverture maximale <math>G_{max}</math> de la maille à respecter pour assurer la discrétion d'une maille, en fonction de la distance d'observation <math>L</math>, selon (1-13).</i> .....   | 22 |
| <i>Figure 1-21: Modèles de maille.</i> .....   | 22 |
| <i>Figure 1-22 : Largeur maximale <math>W_{max}</math> des conducteurs à respecter pour assurer la transparence <math>T</math> d'une maille, en fonction de la distance d'observation <math>D</math> [72].</i> .....   | 24 |
| <i>Figure 1-23 : Film conducteur transparent en Micro Métaux d'argent [74].</i> .....  | 24 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure 1-24 : Exemple de transparence optique d'un substrat de verre sodocalcique nu [75].</i>   | 26 |
| <i>Figure 1-25 : Caractéristiques optiques du TPX (Mitsui chemicals) [83]</i>   | 27 |
| <i>Figure 1-26 : Déformation d'un substrat TPX sous l'effet de la chaleur après un dépôt par pulvérisation [84].</i>  | 28 |
| <i>Figure 1-27: Couches de cuivre déposées sur verre Corning 1737 a) Film de cuivre de 1 <math>\mu\text{m}</math> d'épaisseur b) Film de cuivre de 10 nm d'épaisseur</i>                | 29 |
| <i>Figure 1-28: Antenne monopole</i>  | 29 |
| <i>Figure 1-29 : comparaison des valeurs théoriques et mesurées de 500 à 1300 MHz a) Film de cuivre de 1<math>\mu\text{m}</math> d'épaisseur b) Film de cuivre de 10 nm d'épaisseur</i> | 30 |
| <i>Figure 1-30 : Antenne transparente en ITO a) structure b) réalisation</i>  | 31 |
| <i>Figure 1-31 : a) Géométrie de l'antenne b) Coefficient de réflexion</i>  | 32 |
| <i>Figure 1-32 : Distribution du courant de surface à 2,2 GHz sur des antennes coplanaire en : (a) cuivre, (b) film AgHT-4, (c) film AgHT-4 avec la méthode proposée</i>                | 33 |
| <i>Figure 1-33 : Structure et dimensions de l'antenne (a) Vue de face. (b) Vue arrière. (c) Structure du film et du substrat d'électrode multicouche IZTO/Ag/IZTO</i>                   | 34 |
| <i>Figure 1-34 : Antenne ultra large bande en multicouche IZTO/Ag/IZTO [91]</i>   | 34 |
| <i>Figure 1-35 : a) Antenne patch maillée b) Variation du gain en fonction de la fréquence</i>  | 35 |
| <i>Figure 1-36 : Antenne patch microruban optiquement transparente à base de graphène</i>   | 35 |
| <i>Figure 1-37 : Vue en coupe transversale d'une antenne patch microruban transparente à base de graphène chargée MWCNT</i>   | 36 |
| <i>Figure 1-38 : Coefficient de réflexion (<math>S_{11}</math>) pour les antennes transparentes à base de graphène avec et sans MWCNT</i>   | 36 |
| <i>Figure 1-39 : Gain (dB) des antennes transparentes à base de graphène avec et sans MWCNT</i>   | 36 |
| <i>Figure 1-40 : a) Antenne hybride argent-CNT b) Diagramme de rayonnement de l'antenne transparente et de l'antenne de référence en Cuivre [94]</i>                                    | 37 |
| <i>Figure 1-41 : Antenne transparente flexible en AgNWs</i>   | 38 |
| <i>Figure 1-42 : Géométrie d'un patch maillé [97]</i>   | 38 |
| <i>Figure 1-43 : Effet de la transparence sur a) le gain, b) la fréquence de résonance, c) la bande passante, d) l'efficacité [97]</i>  | 39 |
| <i>Figure 1-44 : Effet de la largeur de grille de métallisation sur a) le gain, b) la fréquence de résonance, c) la bande passante, d) l'efficacité [97]</i>                            | 40 |
| <i>Figure 1-45 : Structure de l'antenne patch a) Vue de dessus b) Vue latérale</i>  | 40 |
| <i>Figure 1-47: Photos du maillage de 6 <math>\mu\text{m}</math> d'épaisseur d'argent</i>   | 41 |
| <i>Figure 1-48 : Photographies a) <math>l = 224\mu\text{m}</math> et <math>w = 30\mu\text{m}</math> maillage métallique b) Antenne transparente</i>                                     | 42 |
| <i>Figure 1-49 : Processus de modification de micro maillage. a) Maille b) Cellule unitaire d'un maillage régulier</i>  | 42 |
| <i>Figure 1-50 : Photographies a) micro maillage métallique b) Antenne transparente</i>   | 43 |
| <i>Figure 2-1 : a) Montages de mesure et b) Schéma électrique équivalent d'une capacité métal-isolant-métal (MIM)</i>   | 47 |
| <i>Figure 2-2 : a) Exemple de schéma en 3D de structure MIM b) Schéma électrique équivalent</i>   | 48 |
| <i>Figure 2-3 : Extraction des paramètres diélectriques d'un échantillon diélectrique dans une ligne de transmission coaxiale, à partir de la mesure des paramètres S [10]</i>          | 49 |
| <i>Figure 2-4 : Méthode de la ligne de transmission (guide d'ondes) [9] [2]</i>   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figure 2-5 : Méthode de la sonde coaxiale [4]</i> .....   | 51 |
| <i>Figure 2-6 : Exemple de configuration expérimentale pour la mesure par sonde coaxiale [13]</i><br>.....   | 51 |
| <i>Figure 2-7 : a ) Schéma d'une sonde diélectrique à extrémité ouverte appliquée à un diélectrique solide, b) Circuit équivalent d'une sonde diélectrique [14]</i> .....  | 52 |
| <i>Figure 2-8 : Représentation schématique de la méthode FSM).....</i>   | 53 |
| <i>Figure 2-9 : a) Configuration schématique b) et photographie du système de mesure de l'espace libre [18].....</i>   | 55 |
| <i>Figure 2-10 : Schéma du dispositif de mesure en cavité résonante [20].....</i>  | 57 |
| <i>Figure 2-11: Cavité rectangulaire totalement remplie du matériau sous test [12].....</i>  | 57 |
| <i>Figure 2-12 : Exemples de configurations de résonateurs pour la caractérisation de la technologie stripline (a) Résonateur stripline (vue de dessus). (b) Résonateur à accès couplés dans des plans différents (vue de côté). c) Résonateur couplés en fourche (vue de dessus). [21].....</i> | 59 |
| <i>Figure 2-13 : Configuration des mesures haute fréquence (a) Vue de dessus (b) Vue latérale [21]. .....</i>  | 60 |
| <i>Figure 2-14 : Schéma vu de dessus d'un Té résonant (stub) .....</i>   | 60 |
| <i>Figure 2-15 : Exemple de disposition d'un résonateur en T coplanaire (CPW) [24].....</i>  | 62 |
| <i>Figure 2-16 : Lignes de cuivre sur du verre Borofloat 33.....</i>   | 66 |
| <i>Figure 2-17 : a) Configuration de la mesure sur VNA b) Modèle ADS.....</i>  | 66 |
| <i>Figure 2-18 : Comparaison des réponses en fréquences issues de la modélisation ADS (rouge) et de la mesure sur VNA (bleue) .....</i>  | 67 |
| <i>Figure 2-19 : Lignes de cuivre grillagée sur du verre Borofloat 33.....</i>   | 67 |
| <i>Figure 2-20 : Configuration de la mesure sur VNA .....</i>  | 68 |
| <i>Figure 2-21 : Comparaison des réponses en fréquence issues de la modélisation ASD (Rouge) et de la mesure sur VNA (Bleue).....</i>  | 68 |
| <i>Figure 2-22 : Réponses en fréquence après modification de la tangente de perte a) <math>\tan\delta = 0.002</math> b)<math>\tan\delta = 0.009</math> c) <math>\tan\delta = 0.03</math> d) <math>\tan\delta = 0.05</math>.....</i>  | 69 |
| <i>Figure 3-1: Schéma de l'antenne opaque a) vue de dessus, b) vue de profil .....</i>   | 71 |
| <i>Figure 3-2 : Schéma de l'antenne grillagée .....</i>  | 72 |
| <i>Figure 3-3: Etapes de réalisation de l'antenne grillagée.....</i>   | 74 |
| <i>Figure 3-4 : Production naturelle de l'ozone [1].....</i>   | 75 |
| <i>Figure 3-5 : UV / Ozone cleaner Ossila utilisé pour le traitement de surface des substrats [2]</i><br>.....   | 75 |
| <i>Figure 3-6: Présentation des principaux procédés de dépôt de couches minces.....</i>  | 76 |
| <i>Figure 3-7 : Le procédé du dépôt des couches minces.....</i>  | 77 |
| <i>Figure 3-8 : Méthodes de dépôt de couche mince retenus .....</i>  | 78 |
| <i>Figure 3-9 : Schéma du processus de pulvérisation cathodique [7] .....</i>  | 79 |
| <i>Figure 3-10 : Schéma de principe fonctionnel d'un dépôt par pulvérisation cathodique magnétron .....</i>  | 80 |
| <i>Figure 3-11 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique magnétron DC et RF [16]</i><br>.....  | 82 |
| <i>Figure 3-12: Schéma de principe de la pulvérisation cathodique magnétron RF [20].....</i>   | 83 |
| <i>Figure 3-13 : Bâti de pulvérisation cathodique magnétron AC450 de la société Alliance Concept.....</i>  | 89 |
| <i>Figure 3-14 : Station d'électrodéposition de cuivre.....</i>  | 90 |

|  |            |
|--|------------|
| <i>Figure 3-15 : Echantillon : (a) Observation de la couche de cuivre déposé par pulvérisation cathodique magnétron avant électrodéposition, et (b) Observation de la couche de cuivre déposé par pulvérisation cathodique magnétron après électrodéposition .....</i> | <i>91</i>  |
| <i>Figure 3-16 : Lithographie a) par contact b) par projection.....</i>  | <i>92</i>  |
| <i>Figure 3-17 : Comportement des résines positives et négatives lors d'une lithographie.....</i>  | <i>93</i>  |
| <i>Figure 3-18 : Réaction dans une résine positive après exposition UV.....</i>  | <i>93</i>  |
| <i>Figure 3-19 : Schéma simplifié du procédé d'enduction centrifuge [34].....</i>  | <i>94</i>  |
| <i>Figure 3-20 : Spin-coater pour enduction de la résine .....</i>   | <i>95</i>  |
| <i>Figure 3-21 : Rotation par seconde du spin-coater en fonction du temps .....</i>  | <i>96</i>  |
| <i>Figure 3-22: Variation de l'épaisseur de la résine S1818G2 en fonction de la vitesse de rotation du spin coater – mesure profilométrique de la résine (épaisseur de 2,9µm à 2000tr/min).....</i>  | <i>97</i>  |
| <i>Figure 3-23 : Recuit de la résine sur plaque chauffante à 100°C après son enduction.....</i>  | <i>97</i>  |
| <i>Figure 3-24 : Aligneur de masque MJB3 Karl Suss pour insolation UV des résines photosensibles non masquées .....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>Figure 3-25 : L'échantillon a) dans la solution développeur MF351 b) à la sortie de la solution développeur, dissolution de la résine, motif visible .....</i>  | <i>98</i>  |
| <i>Figure 3-26: Différence entre la gravure isotrope et la gravure anisotrope [35].....</i>  | <i>99</i>  |
| <i>Figure 3-27 : L'échantillon a) dans la solution de perchlorure de fer b) à la sortie de la solution de perchlorure de fer, gravure du cuivre de face 1, motif visible .....</i>   | <i>100</i> |
| <i>Figure 3-28 : Étapes de gravure de la couche mince de titane à base d'acide fluorhydrique .....</i>   | <i>101</i> |
| <i>Figure 3-29 : L'échantillon a) dans la solution d'acétone pour enlever la résine b) rincer dans la solution d'éthanol, c) échantillon final, faces 1 et 2 réalisées.....</i>  | <i>101</i> |
| <i>Figure 3-30 : Profilomètre DEKTAK 8 BRUKER a) Vue de la platine porte-échantillon b) Vue de la tête de mesure .....</i>   | <i>102</i> |
| <i>Figure 3-31 : Zone de mesure de l'épaisseur de métallisation.....</i>   | <i>102</i> |
| <i>Figure 3-32 : Relevé de mesures de l'épaisseur du cuivre par profilométrie .....</i>  | <i>103</i> |
| <i>Figure 3-33 : Photo des antennes réalisées : a) Antenne opaque b) Antenne grillagée 1 et c) Antenne grillagée 2.....</i>  | <i>103</i> |
| <i>Figure 4-1 : Antenne patch microruban.....</i>  | <i>105</i> |
| <i>Figure 4-2 : Face supérieure de l'antenne opaque réalisée sur substrat Borofloat 33.....</i>  | <i>106</i> |
| <i>Figure 4-3 : Photographie des antennes grillagées : a) Antenne 2 b) Antenne 3 .....</i>   | <i>107</i> |
| <i>Figure 4-4 : Réponses en fréquence d'antenne grillagée (p=1000µm/s=100µm) d'épaisseur 6µm et l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 545nm a) Même εr = 4.5 b) εr_modifié = 5.07.....</i>   | <i>111</i> |
| <i>Figure 4-5 : S<sub>11</sub> antenne grillagée (2000µm/100µm) d'épaisseur 6µm et l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 285nm a) εr = 4.5 b) εr_modifié = 5.08.....</i>   | <i>112</i> |
| <i>Figure 4-6 : S<sub>11</sub> antenne grillagée 1000µm_100µm_GND_2000µm_100µm d'épaisseur 6µm et l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 545nm_285nm a) εr = 4.5 b) εr_modifié = 5.05.....</i>  | <i>113</i> |
| <i>Figure 4-7: Diagrammes de rayonnement simulés sous HFSS de l'antenne grillagée (p=1000µm/s=100µm), d'épaisseur 6µm et de l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 545nm à 5.45GHz.....</i>   | <i>114</i> |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Figure 4-8 : : Diagrammes de rayonnement simulés sous HFSS de l'antenne grillagée (2000<math>\mu</math>m/100<math>\mu</math>m), d'épaisseur 6<math>\mu</math>m et de l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 285nm à 5.42GHz.....</i>  | <i>115</i> |
| <i>Figure 4-9 : Diagrammes de rayonnement simulés sous HFSS de l'antenne grillagée (métallisation supérieure : 1000<math>\mu</math>m/100<math>\mu</math>m et plan de masse_2000<math>\mu</math>m/100<math>\mu</math>m), d'épaisseur 6<math>\mu</math>m et de l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 545nm_GND_285nm à 5.42GHz.....</i> | <i>116</i> |
| <i>Figure 4-10 : Représentation schématique de la méthode de mesure par sonde à 4 pointes alignées [41] .....</i>   | <i>118</i> |
| <i>Figure 4-11 : Spectrophotomètre Perkin Elmer lambda 1050 [43].....</i>   | <i>119</i> |
| <i>Figure 4-12 : Exemples de trois positions géométriques différentes des motifs maillés a) Rotation d'un motif maillé ; b) Translation d'un motif maillé c) Alignement parfait des motifs maillés [45] .....</i>   | <i>120</i> |
| <i>Figure 4-13 : Mesures sur analyseur de réseau vectoriel .....</i>  | <i>121</i> |
| <i>Figure 4-14: Principe de mesure en chambre anéchoïque .....</i>  | <i>121</i> |
| <i>Figure 4-15 : Définition des plans E et H.....</i>   | <i>122</i> |
| <i>Figure 4-16 : Mesure de transparence du plan de masse de l'antenne 2.....</i>  | <i>123</i> |
| <i>Figure 4-17 : Mesure de transparence de l'élément rayonnant et du plan de masse superposés sur l'antenne 2.....</i>  | <i>123</i> |
| <i>Figure 4-18 : Mesure de transparence du plan de masse de l'antenne 3.....</i>  | <i>124</i> |
| <i>Figure 4-19 : Mesure de transparence de l'élément rayonnant et du plan de masse superposés de l'antenne 3.....</i>   | <i>125</i> |
| <i>Figure 4-20 : Comparaison simulation/mesure du coefficient de réflexion des différentes antennes .....</i>   | <i>127</i> |
| <i>Figure 4-21: Comparaison fréquences de résonance a) simulation b) mesure des antennes .....</i>  | <i>128</i> |
| <i>Figure 4-23 : Diagrammes de rayonnement des antennes.....</i>  | <i>131</i> |

# Liste des tableaux

|   |     |
|---|-----|
| <i>Tableau 1-1 : Epaisseur du film, Résistance par carré et transparence optique des films dans le visible</i> .....  | 10  |
| <i>Tableau 1-2 : Les valeurs (<math>\epsilon</math>, <math>R_s</math> et <math>T</math>) de quelques multicouches</i> .....   | 12  |
| <i>Tableau 1-3: Résistance par carré et transparence optique de quelques types de graphènes</i> .....   | 16  |
| <i>Tableau 1-4 : Résistance par carré et transmittance des nanofils</i> .....   | 19  |
| <i>Tableau 1-5 : Comparaison entre des films transparents conducteurs de géométries de mailles différentes</i> .....  | 20  |
| <i>Tableau 1-6 : Récapitulatif des paramètres de quelques verres électroniques</i> .....  | 27  |
| <i>Tableau 1-7 : Valeur des caractéristiques de l'antenne [85]</i> .....  | 30  |
| <i>Tableau 1-8 : Gain et transparence mesurés</i> .....   | 31  |
| <i>Tableau 1-9 : Performances de quelques antennes monopoles à 800 MHz [16]</i> .....   | 32  |
| <i>Tableau 1-10 : Caractéristiques des antennes</i> .....   | 32  |
| <i>Tableau 1-11 : Comparaison films ITO et AgHT</i> .....   | 33  |
| <i>Tableau 1-12 : Géométrie et informations sur les matériaux</i> .....   | 37  |
| <i>Tableau 1-13 : Résultats de mesure des antennes WMM fabriquées</i> .....   | 40  |
| <i>Tableau 1-14 : Résultat de mesure des antennes</i> .....   | 43  |
| <i>Tableau 2-1 : Comparaison des techniques de caractérisation diélectrique les plus utilisées</i> .....  | 64  |
| <i>Tableau 3-1 : Dimensions des antennes</i> .....  | 72  |
| <i>Tableau 3-2 : Dimensions des grillages des antennes à faible impact visuel</i> .....   | 72  |
| <i>Tableau 3-3 : Paramètres de dépôt d'une couche de cuivre par pulvérisation cathodique</i> ..   | 88  |
| <i>Tableau 3-4 : Composition du bain électrochimique</i> .....  | 90  |
| <i>Tableau 3-5 : Étapes d'enduction de la résine photosensible positive (Shipley S1828G2)</i> ..  | 96  |
| <i>Tableau 3-6 : Comparaison des propriétés des gravures humide et plasma [159]</i> .....   | 99  |
| <i>Tableau 4-1 : Dimensions de l'antenne</i> .....  | 106 |
| <i>Tableau 4-2 . Paramètres de maillage et caractéristiques théoriques des antennes (<math>p_x</math> et <math>p_y</math> sont les dimensions du pas rectangulaire suivant les directions <math>ox</math> et <math>oy</math>)</i> ..... | 107 |
| <i>Tableau 4-3 : Valeurs de la fréquence de résonance et du gain obtenues par simulation des antennes grillagées et pleines correspondantes effectuées sur HFSS</i> .....   | 110 |
| <i>Tableau 4-4 : Comparaison mesure/simulation sur le mode fondamental de la réponse en fréquence des antennes</i> .....  | 128 |
| <i>Tableau 4-5 : Valeur du Gain (simulation et mesure)</i> .....  | 132 |

# Glossaire :

|      |   |
|------|---|
| AgNW | Silver Nanowires                        |
| AZO  | Oxyde de Zinc dopé à l'Aluminium        |
| CuNW | Copper Nanowires                        |
| FoM  | Facteur de Mérite                       |
| GSM  | Global System for Mobile Communications |
| HFSS | High Frequency Structure Simulator      |
| ITO  | Indium doped Tin Oxide                  |
| LCD  | Liquid Crystal Display                  |
| LTE  | Long Term Evolution                     |
| MCT  | Matériau Conducteur Transparent         |
| MEB  | Microscopie Électronique à Balayage     |
| MIM  | Métal-Isolant-Métal                     |
| MM   | Micro Métaux                            |
| MUT  | Material Under Test                     |
| MWNT | Multi-walled carbon nanotubes           |
| NIR  | Near Infra-Red                          |
| OLED | Organic Light-Emitting Diode            |
| OPV  | Organic Photovoltaic                    |
| OTC  | Oxyde Transparent Conducteur            |
| PBS  | Polarized Beam Splitter                 |
| PMT  | Photo Multiplier Tube                   |
| SWNT | Single-Walled Carbon Nanotubes          |
| TCF  | Transparent Conductor Film              |
| TEM  | Transverse Electro-Magnetic             |
| UTMF | Ultrathin Metal Film,                   |
| UV   | Ultra-Violet                            |
| VIS  | Visible                                 |
| VNA  | Vector Network Analyzer                 |
| WLAN | Wireless Local Area Network             |
| WMM  | Wi-Fi Multimedia                        |



# Introduction générale

## Contexte et motivation

Le développement des communications mobiles (du GSM au LTE 4G) et la multiplication des objets connectés ont connu un grand essor ces dernières années. Ce phénomène a obligé les opérateurs et les industriels à multiplier les équipements hyperfréquences pour ces systèmes communicants, notamment le nombre des antennes. Celles-ci permettent le transfert de l'information du dispositif vers l'extérieur, et inversement, en assurant un compromis entre l'efficacité la plus élevée possible, le coût, les dimensions et une consommation énergétique faible. Elles se sont donc multipliées d'où leur présence de plus en plus quotidienne. Par conséquent, l'implantation de ces antennes entraîne un certain nombre de défis à relever. Parmi ces défis, deux sont actuellement parmi les plus importants :

- défi technologique : l'intégration des antennes dans des dispositifs de communication qui tendent à devenir de plus en plus compacts ;
- défi esthétique : la diminution de l'impact visuel des antennes.

Dans ce contexte le développement d'antennes optiquement transparentes devient pertinent, leur implémentation doit pouvoir se faire sur des surfaces alternatives, telles que les vitres des bâtiments, les vitrages des voitures, ou même des smartphones[1] ce qui améliore aussi leur acceptabilité par le grand public grâce à leur faible impact visuel. En raison de la transparence, les éléments rayonnants peuvent être intégrés au verre et ainsi les antennes peuvent coexister avec d'autres unités telles que les fenêtres, les cellules solaires [2]. Des initiatives d'intégration ont été réalisées en plaçant des antennes relais sur les cheminés, les parois d'immeubles ou notamment sur les arbres. Mais ces solutions ne sont pas réalisables sur tous les sites surtout en milieu urbain, les sites historiques ainsi que dans les centres commerciaux pour lesquels les contraintes visuelles sont fortes. Des antennes à faibles impact visuel pourront donc être une alternative à ces antennes. Ceci permet de ne pas dégrader l'esthétisme du milieu urbain. Une autre application de ces antennes est qu'elles peuvent être directement positionnées sur la surface des écrans d'affichage pour des applications dans les montres intelligentes, les tablettes et les téléviseurs intelligents. Cette approche de conception évite d'avoir à intégrer des antennes dans le corps des dispositifs électroniques et offre l'avantage de la discrétion dans les appareils de communication sans fil à faible encombrement. Elles permettront aussi la discrétion dans les applications militaires à savoir les systèmes de communication tels que les postes portatifs de radiocommunication [2].

## Objectifs et contribution

Ces travaux s'inscrivent dans le contexte de la conception d'antennes discrètes optiquement transparentes. Par conséquent cela implique le développement de solutions optiquement transparentes qui offrent des performances micro-ondes similaires aux antennes conventionnelles. A ce titre, pour limiter les pertes ohmiques pour les applications micro-ondes, la solution retenue pour servir de conducteur doit présenter une valeur de résistance par carré la plus faible possible tout en conservant un niveau élevé de transparence optique sur l'ensemble

du spectre de la lumière visible. Les paramètres majeurs à prendre en considération lors de la conception sont alors :

- Les paramètres diélectriques (la constante diélectrique et la tangente de pertes) du substrat à utiliser pour favoriser le rayonnement de l'antenne.
- La conductivité électrique et la transparence optique de la couche conductrice ;
- La transparence optique globale des antennes dans le spectre de la lumière visible.
- La maîtrise du coût de réalisation des antennes.

Des solutions pour remplacer les métallisations opaques ont été proposées avec des matériaux à faible impact visuel tels que les oxydes transparents conducteurs, les solutions multicouches, les couches ultraminces, les solutions grillagées... Ces technologies présentent des performances plus ou moins élevées du point de vue hyperfréquences ou de la transmittance optique.

Cette étude a pour objectif :

- De concevoir, réaliser et mesurer des prototypes d'antennes à coût maîtrisé et présentant une bonne transparence optique dans le visible (70% au moins).
- De mettre en place une filière de réalisation d'antennes.

L'idée de base est d'utiliser un substrat transparent recouvert d'un matériau transparent conducteur. Des substrats transparents existent, certains sont déjà caractérisés en hautes fréquences mais le problème réside surtout pour les métallisations qui s'appuient sur des métaux, donc opaques. La transmittance optique est intimement liée au choix du substrat et à la qualité du métal utilisé. La résistance par carré dépendra non seulement du métal mais aussi de la technologie utilisée.

## Organisation du document

Ce mémoire s'articule en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, un état de l'art des solutions conductrices et des substrats transparents est présenté. Différents conducteurs transparents sont identifiés et décrits : les films métalliques ultraminces, les oxydes transparents conducteurs, des structures multicouches, le graphène, les nanofils conducteurs, le grillage métallique, le maillage à pas micrométrique et le micromaillage métallique. La comparaison des performances électriques et optiques de ces différents matériaux est effectuée afin de sélectionner les matériaux les plus performants pour des applications antennaires à faible impact visuel. Le même état de l'art a été fait pour les substrats diélectriques. Différentes familles de substrats transparents sont présentées : les verres électroniques, les substrats monocristallins ainsi que les substrats organiques. Une comparaison des performances des paramètres diélectriques et optiques de ces différents substrats a été effectuée afin de sélectionner le plus adapté. Cette partie se termine par un état de l'art d'antennes à faible impact visuel déjà existantes dans la littérature.

Le chapitre 2 présente différentes techniques de caractérisation diélectrique. L'extraction des paramètres diélectriques du substrat choisi a ensuite été effectuée sur une large bande de fréquence (de 100MHz à 8GHz) afin de faciliter le dimensionnement des antennes à réaliser. Une étude a été menée sur les pertes en transmission sur une ligne grillagée.

Le chapitre 3 est consacré à la présentation de la technologie de réalisation choisie et appliquée à la réalisation d'antennes patches opaques et grillagées à faible impact visuel.

Dans le chapitre 4, différents résultats de mesures sont discutés : La transparence optique dans le spectre de la lumière visible, et les performances électromagnétiques de ces échantillons sont comparées aux résultats obtenus en simulation. Les performances hyperfréquences du matériau maillé sont évaluées et comparées à celles de l'antenne de référence réalisée à partir de couches métalliques opaques. Par ailleurs, une méthode de simulation des antennes maillées à partir d'antennes à métallisations en couches pleines a été démarrée.



# Chapitre 1

## Etat de l'art sur les matériaux conducteurs et diélectriques à faible impact visuel

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'état de l'art des technologies utilisables pour la conception d'antennes optiquement discrètes. Il s'agit d'identifier des solutions qui ont à la fois des caractéristiques permettant d'assurer une part de discrétion optique (transparence) mais aussi des propriétés radiofréquences et de rayonnement électromagnétique. Les matériaux doivent également pouvoir être utilisés dans une filière de réalisation à coût maîtrisé. Pour les utiliser dans la réalisation d'une antenne transparente, la technologie planaire est la plus recommandée à cause de sa facilité d'intégration, son faible poids, son faible encombrement, la possibilité d'être placée au plus près des systèmes. Actuellement, il existe de nombreux travaux sur ces matériaux du fait de leurs multiples applications [3]. Nous allons décrire dans un premier temps les conducteurs à faible impact visuel identifiés puis une étude sur les substrats optiquement transparents existant dans la littérature sera ensuite menée. Les avantages et les inconvénients de chacun seront présentés et discutés. Nous allons alors dégager un choix sur ces matériaux et substrats pour la réalisation d'antennes à faible impact visuel. Enfin, nous présenterons une revue bibliographique des différentes antennes à faible impact visuel existantes dans la littérature. Leurs performances optiques et électromagnétiques seront présentées, ce qui nous servira de référence pour la suite de ce travail.

### 1.1. Présentation des principales solutions technologiques permettant de synthétiser des matériaux conducteurs transparents et choix

Une antenne met en œuvre deux types de matériaux, des matériaux conducteurs et des matériaux diélectriques. Pour réaliser une antenne transparente, il faut nécessairement utiliser des matériaux conducteurs et transparents (MCT), ou matériaux à faible impact visuel, ayant à la fois une conductivité électrique élevée ( $\geq 36 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ ) [4-5] et une bonne transparence optique ( $\geq 70\%$ ) [6] dans le domaine du visible (longueurs d'onde de l'ordre de 400 nm à 800 nm). Ce sont des solides qui n'absorbent pas la lumière visible ( $\text{gap} \geq 3 \text{ eV}$ ) [4]. Parmi les MCT, on peut distinguer les familles que sont : les oxydes transparents conducteurs (OTC), les multicouches, les nanofils, le graphène, les films ultra minces métalliques et les réseaux métalliques. Ils sont caractérisés par deux grandeurs principales : la résistance par carré, notée  $R_s$  et la transmittance optique, notée  $T$ . Une troisième grandeur appelée facteur de mérite  $F_oM$ , calculée à partir des deux premières, caractérise les performances d'un dispositif. Ces trois paramètres essentiels qui nous permettront de catégoriser ces matériaux sont présentés ci-dessous :

#### - Résistance par carré

La résistance par carré  $R_s$ , exprimée en  $\Omega/\text{carré}$ , est la résistance ohmique d'un matériau d'épaisseur  $t$  déposé sur une surface carrée. C'est le rapport entre la résistivité  $\rho$  du matériau (en  $\Omega \cdot \text{m}$ ) et l'épaisseur  $t$  de la couche mince (en m).

$$R_s = \frac{\rho}{t} \quad (1-1)$$

Ainsi, la résistance ohmique  $R$  d'une ligne de forme rectangulaire (Figure 1-1), de longueur  $L$  et de largeur  $l$ , peut s'écrire :

$$R = R_s \frac{L}{l} = \rho \frac{L}{l.t} \quad (1-2)$$

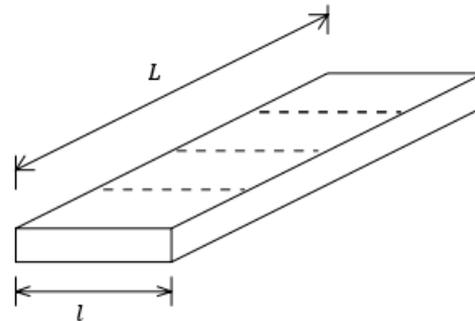


Figure 1-1 : Ligne résistive

### - Transparence optique ou transmittance

La transparence optique ou transmittance, exprimée généralement en pourcentage, est définie comme le rapport entre l'intensité lumineuse sortante du matériau  $I$  et l'intensité lumineuse incidente  $I_0$ . Elle correspond au taux de transparence du matériau et dépend de la longueur d'onde de la lumière incidente :

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1-3)$$

Ce concept constitue le fondement de la spectrophotométrie, dont le principe est illustré en figure 1-2.

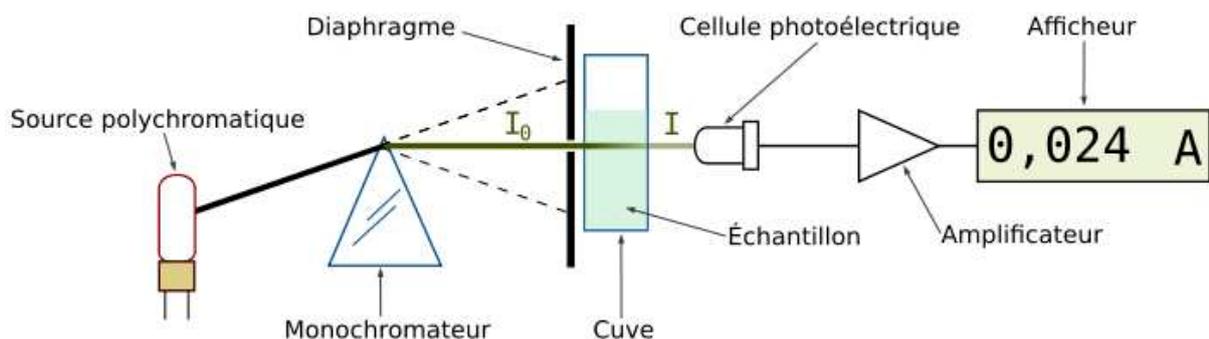


Figure 1-2 : Schéma de principe du spectromètre UV-visible monofaisceau [7]

De manière générale, le spectrophotomètre mesure l'absorbance d'une solution à une longueur d'onde donnée. Un dispositif monochromateur génère, à partir d'une source de lumière visible ou ultra violette, une lumière monochromatique dont la longueur d'onde est choisie par l'utilisateur. La lumière monochromatique incidente d'intensité  $I_0$  traverse alors une cuve contenant la solution étudiée, et l'appareil mesure l'intensité  $I$  de la lumière transmise.

## - Facteur de mérite

Pour caractériser les performances d'un dispositif, une autre grandeur intervient, c'est le facteur de mérite, que nous pouvons exprimer dans le cas des matériaux conducteurs transparents par :

$$F_0M = \frac{\sigma_{\acute{e}l}}{\sigma_{op}} = \frac{Z_0}{2R_s} \times \frac{\sqrt{T}}{1-\sqrt{T}} \quad (1-4)$$

Où  $Z_0 = 377 \Omega$  est l'impédance du vide,  $\sigma_{\acute{e}l}$  la conductivité électrique en régime continu et  $\sigma_{op}$  la conductivité optique.

La résistance par carré doit donc être la plus faible possible pour favoriser le rayonnement de l'antenne. A l'inverse, la transparence optique doit être la plus élevée possible pour diminuer l'impact visuel de l'antenne.

Au regard de ces éléments de caractérisation électrique et optique, les principales technologies utilisées pour réaliser des matériaux conducteurs à faible impact visuel proposées dans la littérature sont présentées à partir de la section suivante.

### 1.1.1. Technologie à base d'oxydes transparents conducteurs (OTC)

Des électrodes à la fois optiquement transparentes et électriquement conductrices ont été longtemps réclamées par l'industrie optoélectronique [8]. Les semi-conducteurs à large bande interdite avec dopage en métaux lourds ont été aussi largement étudiés. Ils sont connus sous le nom d'Oxydes Transparents Conducteurs (OTC) et fabriqués dans des environnements très contrôlés, généralement sous vide, et/ou en salle blanche. La première réalisation d'un matériau oxyde transparent conducteur a eu lieu il y a un siècle quand un mince film de cadmium métallique déposé par pulvérisation a subi une oxydation thermique incomplète lors du chauffage post-dépôt dans l'air [9]. En effet, les films minces de cadmium deviennent transparents après oxydation tout en conservant une certaine conductivité électrique.

Le bon compromis entre la faible résistivité électrique et la transmittance optique élevée dans le spectre visible pouvant être obtenu avec les OTC a conduit à leur utilisation dans de nombreux dispositifs électro-optiques tels que les cellules solaires, les photodétecteurs et les diodes électroluminescentes organiques (OLEDs). Cependant, les films OTC hautement performants nécessitent un contrôle précis des conditions de croissance, telles que la concentration de dopage, la pression en oxygène ou la température du substrat, ainsi que des traitements de recuit post-dépôt effectués pour améliorer leurs propriétés électriques mais qui sont généralement considérés comme un inconvénient potentiel pour l'introduction d'électrodes transparentes dans un flux industriel. De plus, les températures élevées requises pour améliorer les propriétés électriques des films OTC peuvent ne pas être supportées par les substrats ou matériaux polymères, ce qui constitue une barrière au développement de dispositifs souples [8].

Parmi les OTC, le plus largement utilisé est l'oxyde d'indium dopé à l'étain, plus connu sous le nom d'ITO (Indium doped Tin Oxide,  $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ ). L'ITO est un solide (figure 1-3) qui présente non seulement d'excellentes propriétés électriques avec une résistance de feuille de  $10\Omega/\text{carré}$  et une transparence optique d'environ 90% [10], mais il a également une stabilité thermique (sa température de fusion se situe entre  $1537^\circ\text{C}$  et  $1926^\circ\text{C}$ ) [11] et une compatibilité remarquables avec les processus à la fois humides et secs. Par contre, la demande croissante en ITO due au développement des cellules solaires peut entraîner sa raréfaction et donc une augmentation substantielle de son coût. En outre, l'ITO souffre d'une faible flexibilité

mécanique, ce qui l'empêche d'être utilisé dans de nouvelles applications électroniques flexibles, extensibles et portables. Enfin, l'indium est toxique.

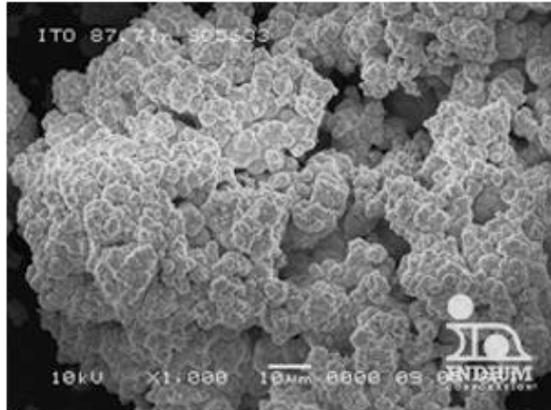


Figure 1-3 L'oxyde d'indium-étain [11]

Les oxydes métalliques alternatifs à l'ITO peuvent être des matériaux de différentes caractéristiques tels que  $\text{SnO}_2$ : F,  $\text{CuO}_2$ : Al et  $\text{ZnO}$ : Al. Semblable à l'ITO, la fabrication de ces oxydes nécessite un processus sous vide et/ou à haute température pour atteindre une transmittance importante et une faible résistance de la feuille [10].

La transmission de la lumière à travers un oxyde conducteur transparent est bien approximée par [12] :

$$T \cong e^{\frac{-2t}{\delta}} \quad (1-5)$$

où  $t$  est l'épaisseur du film et  $\delta$  l'épaisseur de peau.

Il est à noter cependant que la transparence optique des OTC n'est pas constante dans le domaine du visible, elle oscille entre des maxima et des minima et le nombre d'oscillations est fonction de l'épaisseur de la couche (figure 1-4). Ceci est lié à un phénomène d'interférences régi par la relation :

$$2n_{\lambda}e = k\lambda \quad (1-6)$$

Avec  $n_{\lambda}$  l'indice de réfraction du film d'ITO,  $e$  l'épaisseur du film d'ITO,  $\lambda$  la longueur d'onde du maximum ou du minimum d'ordre  $k$ , et  $k$  est tel que  $2k$  est pair pour les maxima et impair pour les minima ( $k=0.5, 1.5, 2.5\dots$ ). Ainsi lorsque l'épaisseur de la couche augmente, l'intervalle entre 2 maxima (ou 2 minima) successifs se réduit et le nombre d'oscillations dans le domaine du visible (400nm-800nm) augmente.

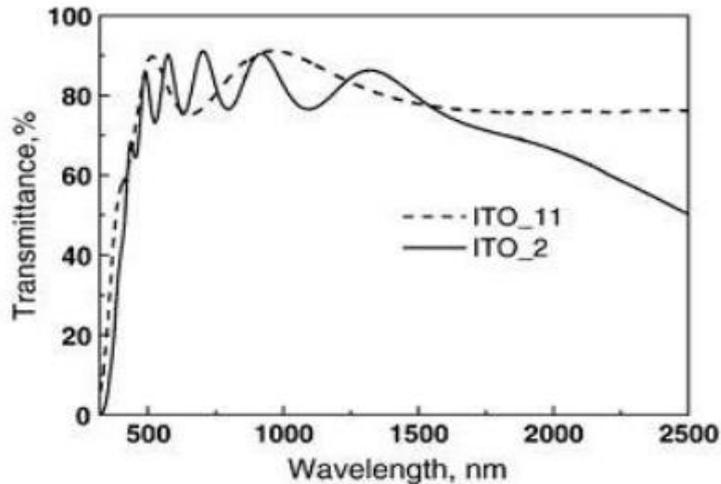


Figure 1-4 : Evolution de la transmittance optique d'un film d'ITO en fonction de la longueur d'onde mise en jeu et de son épaisseur  $e_{ITO\_11} = 252\text{nm}$  et  $e_{ITO\_2} = 748\text{nm}$  [13]

Lors de l'utilisation d'oxydes conducteurs transparents, un dépôt de couche mince de l'ordre de 100 nm à 2  $\mu\text{m}$  (maximum) est nécessaire pour maintenir une transparence élevée. Cependant, lorsque les dépôts sont plus minces que l'épaisseur de peau, la résistance par carré change drastiquement en fonction de l'épaisseur de dépôt [12].

Pour conclure, à titre d'exemple, une transparence optique de l'ordre de 85% avec une résistance par carré de 2  $\Omega/\text{sq}$  pour une épaisseur de 1100 nm a été obtenue avec l'oxyde d'étain et de fluor ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ) [14] tandis que pour une épaisseur de 1000nm d'ITO, la transmittance est de l'ordre de 69% à 86% avec une résistance par carré de 8,6 $\Omega/\text{sq}$  [14-1]. Les OTC ont alors un facteur de mérite ( $F_0M$ ) d'environ 1000.

D'autres solutions ont aussi émergé ces dernières décennies. Elles ont pu voir le jour grâce à la maturation de certains process technologiques. Il s'agit en particulier de la réalisation des films métalliques ultraminces.

### 1.1.2. Technologie à base de film ultramine métallique

Les métaux conducteurs sont naturellement opaques, ce qui constitue leur principal inconvénient dans les applications nécessitant une transparence optique. Or, il s'avère qu'une couche suffisamment fine (quelques nm à quelques dizaines de nm) de métal pur peut devenir optiquement transparente (figure 1-5) [8] tout en conservant d'excellentes propriétés électriques (à condition que l'épaisseur soit au moins égale à l'épaisseur de peau). On les appelle films ultraminces métalliques (UltraThin Metal Film, UTMF), il s'agit alors des matériaux transparents et conducteurs les plus simples à réaliser parmi les couches minces.

Les couches ultraminces métalliques possèdent une transparence optique et une conductivité satisfaisante pour des applications telles que les électrodes transparentes [15] qui constituent leur principale application dans la mesure où elles sont très peu utilisées seules comme MTC (Matériau Transparent Conducteur). En effet, elles s'oxydent facilement, ce qui détériore rapidement ces couches ultrafines qui deviennent alors très résistives et mécaniquement fragiles. Les couches ultraminces métalliques vont donc être associées à d'autres matériaux transparents conducteurs afin de les solidifier. Malgré tout, les films ultraminces métalliques ont une résistivité élevée (tableau 1-1).

| Film | Epaisseur (nm) | Résistance par carré ( $\Omega/\text{sq}$ ) | Transmittance dans le visible (%) | Facteur de mérite | Réf    |
|------|----------------|---|-----------------------------------|-------------------|--------|
| Ni   | 10             | 286   | 80                                | 5,6               | [8]    |
| ITO  | 1000           | 8.6   | 69 – 86                           | 107-280           | [1]    |
| Cu   | 10             | 8.3   | 45- 64                            | 46-91             | [1-16] |
| Cu   | 1000           | 0.01  | 0                                 | 0                 | [16]   |

Tableau 1-1 : Epaisseur du film, Résistance par carré et transparence optique des films dans le visible

Les UTMF se sont néanmoins révélés être une alternative envisageable aux OTC. Comparés à l'ITO, les films de Nickel par exemple présentent une transmittance optique similaire dans le domaine visible pour une épaisseur de l'ordre de 1 à 3nm, (figure 1-5) [8-16].

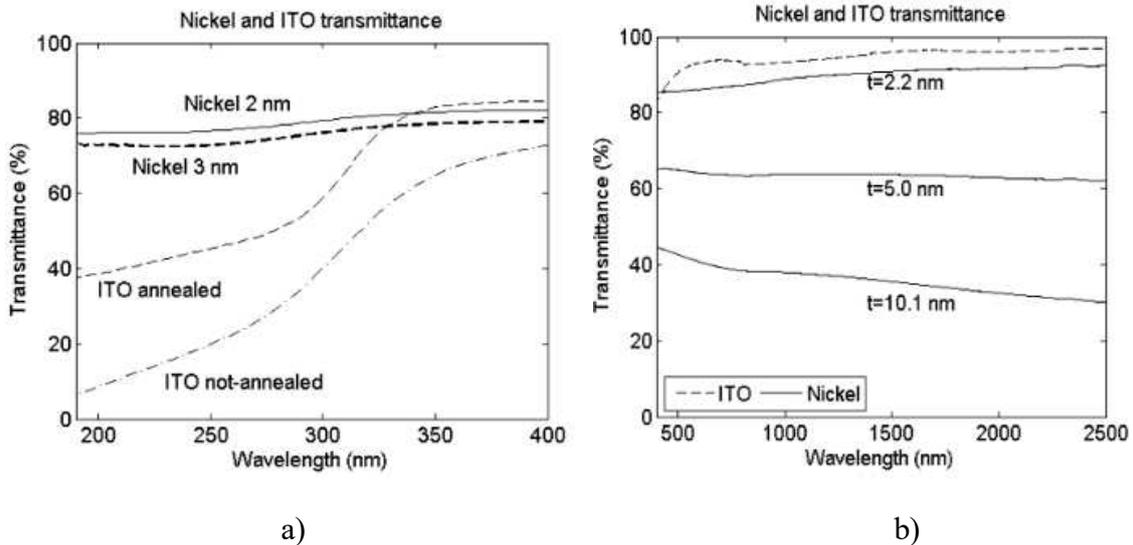


Figure 1-5: Comparaison des performances optiques de l'UTMF de Nickel et de l'ITO, a) Transparence des couches UTMF de Nickel et d'ITO recuit dans la bande UV-VIS (Ultra-Violet-Visible), b) Transparence optique dans la bande VIS-NIR (Visible-Near Infra Rouge) [8].

Les films ultraminces métalliques ont donc un facteur de mérite très faible. Ils sont peu adaptés pour les applications hyperfréquences, bien que ce soit une solution facile pour combiner conduction et transparence, à cause de l'effet de peau. La profondeur de peau  $\delta$  est donnée par la formule [17] :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (1-7)$$

Avec  $f$  la fréquence d'utilisation,  $\sigma$  la conductivité du matériau et  $\mu_0$ , la perméabilité du vide.

La figure 1-6 montre les valeurs minimales et maximales de transmittance et de résistance par carré pour des couches d'argent et de cuivre en fonction de l'épaisseur de ces films.

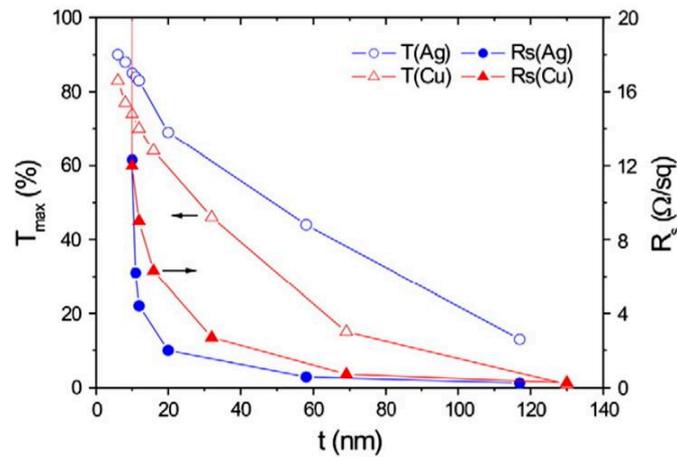


Figure 1-6 : Représentation des valeurs de transmittance et de résistance de feuille obtenues pour les revêtements Ag et Cu filtrés en fonction de l'épaisseur du film [18]

Cette figure montre qu'une augmentation de l'épaisseur de la couche ultramince entraîne une diminution de la transparence et de la résistance par carré.

La combinaison des OTC avec les films minces est aussi possible. Il s'avère que ces solutions permettent d'améliorer les performances électriques sans compromettre les performances optiques. Cette solution porte le nom de multicouche OTC/Métal/OTC, et est présentée ci-après.

### 1.1.3. Technologie multicouche OTC/Métal/OTC

Une attention croissante est accordée à l'amélioration des performances des électrodes conductrices transparentes pour les applications dans des dispositifs et affichages photovoltaïques de grandes surfaces. À ce jour, les oxydes transparents et conducteurs à base d' $In_2O_3$ ,  $ZnO$  ou  $SnO_2$  sont couramment utilisés, mais des résistivités toujours plus faibles sont recherchées avec des propriétés optiques supérieures à celles de la génération actuelle.

Les structures multicouches OTC/métal/OTC sont apparues comme une alternative intéressante car elles offrent des caractéristiques optiques et électriques globalement supérieures à celles atteignables avec un OTC monocouche et peuvent être déposées à basse température sur des substrats plastiques bon marché [1]. Elles ont une résistance par carré inférieure à celle des OTC. A titre d'exemple, une multicouche ITO/Cu/ITO présente une résistance ohmique de  $4,7\Omega/sq$  [1-7] qui reste inférieure à celle d'une couche ITO ( $R_s=8.6\Omega/sq$ ).

La résistance par carré  $R_s$  d'une multicouche est considérée comme la résistance équivalente des résistances des couches individuelles mises en parallèle, elle est donc calculée comme suit [1] :

$$\frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_{sOTC}} + \frac{1}{R_{sMétal}} + \frac{1}{R_{sOTC}} \quad (1-8)$$

Les couches métalliques intermédiaires généralement en Argent, Or, Cuivre ou Aluminium... permettent d'améliorer la flexibilité de l'ensemble. La transmittance obtenue est approximativement égale à celle de l'ITO monocouche à la température ambiante avec un facteur de mérite allant de 220 à 1500.

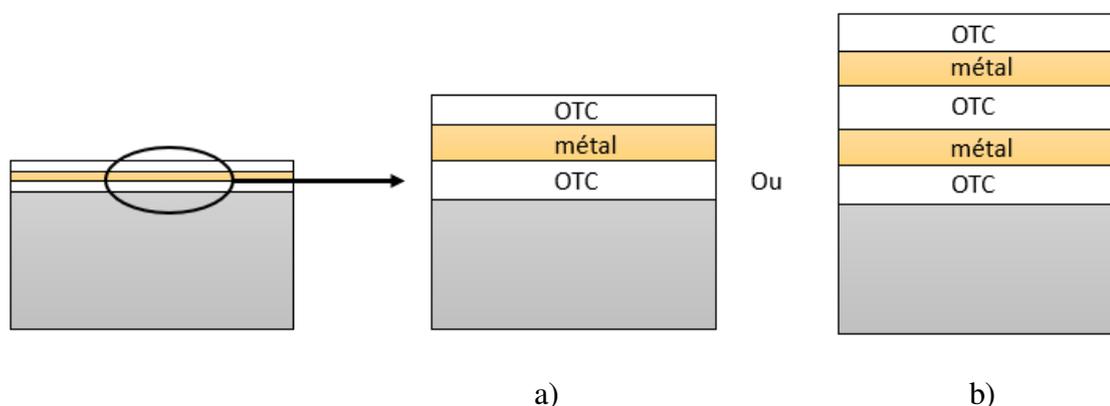


Figure 1-7 : Schéma d'un a) simple multicouche ITO, b) double multicouche

Les électrodes OTC/métal/OTC, sont principalement appliquées aux écrans luminescents organiques (OLED) [17-18] et aux dispositifs photovoltaïques organiques (OPV) [19-20] mais également dans les écrans à cristaux liquides inorganiques (LCD) [23], les mémoires à accès aléatoire flexibles [24], les condensateurs [25], les capteurs de gaz [26] et les cellules solaires à colorant [27]. Le tableau 1.2 résume les valeurs de résistances par carré et de transmittance de quelques multicouches.

| Film              | Epaisseur (e) (nm) | Résistance par carré ( $\Omega/\text{sq}$ ) | Transmittance dans le visible (%) | Facteur de mérite | Réf   |
|-------------------|--------------------|---|-----------------------------------|-------------------|-------|
| ITO/Cu/ITO        | 85/13/85           | 4,7   | 28 < T < 61                       | 40-143            | [1-7] |
| ZnO / Ag / ZnO    | 30/10 /30          | 6   | 90                                | 581               | [18]  |
| ITO/Ag/ITO        | 57/9/40            | 7   | 95                                | 1036              | [18]  |
| GZO/Ag/GZO        | 30/10/30           | 7   | 90,7                              | 538               | [18]  |
| ITO/Au/ITO        | 50/10/50           | 4,4   | 75                                | 277               | [28]  |
| ICO/Ag/ICO/Ag/ICO |                    | 1,2   | 82                                | 1500              | [1]   |

Tableau 1-2 : Les valeurs (e, Rs et T) de quelques multicouches

On remarque également dans ce tableau qu'une double multicouche ICO/Ag/ICO/Ag/ICO présente une résistance ohmique inférieure à celle d'une simple multicouche. Son facteur de mérite de l'ordre de 1500 est plus élevé par rapport à celui d'un simple multicouche. L'Argent est le meilleur candidat, comme couche intermédiaire (Figure 1-8).

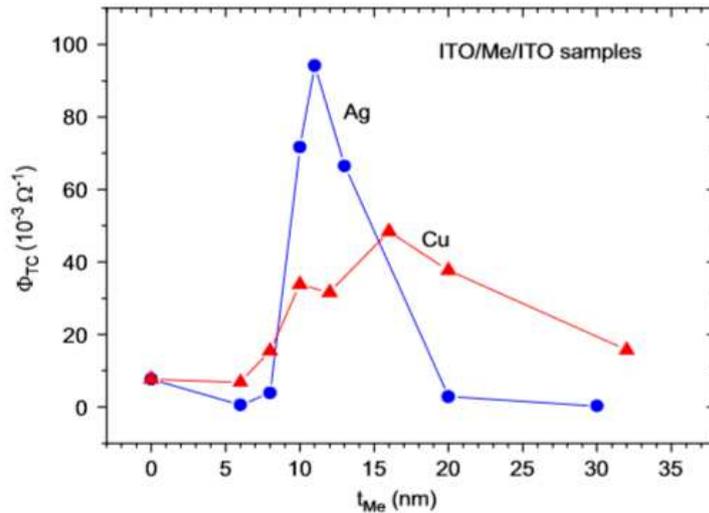


Figure 1-8: Relation entre la figure de mérite des électrodes ITO / métal / ITO et l'épaisseur de couche métallique correspondante ( $t_{Me}$ ), pour les films métalliques Ag ou Cu [29]

Un autre type de multicouche présente des performances acceptables : le film de polyester enduit d'argent ou d'oxyde d'étain dopé à l'argent AgHT [30]. C'est une multicouche contenant une couche mince d'argent et d'ITO déposé sur un substrat polymère souple, ce qui facilite sa découpe et sa mise en œuvre. Il est décliné en deux produits : AgHT-4 qui a une résistance par carré de  $4 \Omega/\text{sq}$  et une transparence optique de 75% et AgHT-8 ayant une résistance par carré de  $8 \Omega/\text{sq}$  et une transparence optique de 82%. Ces deux multicouches ont des facteurs de mérite de 304 et 226.

Cependant ces structures multicouches présentent des limites intrinsèques. Si l'épaisseur de la couche ultramince de métal augmente, sa résistance par carré diminue et par conséquent la résistance par carré globale du multicouche ainsi que la transmittance globale diminuent. A titre d'exemple, la figure 1-9 présente la comparaison de l'évolution de la transmittance présentée par plusieurs solutions de multicouches trois couches du type AZO/Au (couche d'oxyde de zinc dopé à l'aluminium recouvert de couche d'or) et une couche d'AZO seul. Ces trois multicouches diffèrent au niveau des épaisseurs de la couche métallique d'or : 5 nanomètres, 10 nanomètres et 15 nanomètres. Comme pour les solutions d'OTC monocouches, la transparence optique des multicouches n'est pas constante en fonction de la longueur d'onde dans le domaine du visible et diminue lorsque l'épaisseur de la couche intermédiaire d'or augmente. Il faut alors trouver un compromis entre la transparence optique et la résistance par carré [31].

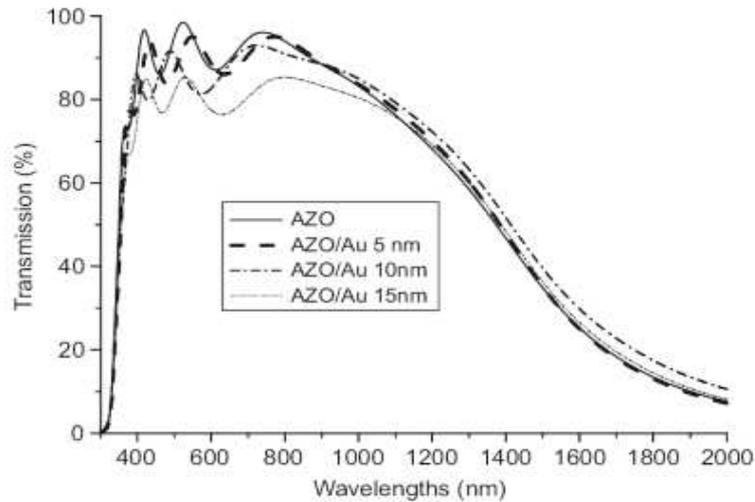


Figure 1-9 : Variation de la transmittance des structures AZO/Au suivant différentes épaisseurs de la couche ultramince d'or, selon (0-1,5 nm) [31]

Une alternative pour relever les défis liés à ces matériaux est une autre technologie, utilisant le graphène, détaillée ci-après.

#### 1.1.4. Technologie basée sur le graphène

Le graphène est la forme bidimensionnelle du carbone : c'est un maillage de cycles (cellules hexagonales) de 6 atomes de carbone (figure I-10). Il a été largement étudié en raison de sa conductivité électronique exceptionnelle (la mobilité électrique du graphène monocouche peut atteindre  $250\,000\text{ cm}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ) [32], sa transparence optique, voire sa conductivité thermique, sa résistance mécanique (léger et rigide), etc [33] et a suscité l'intérêt pour de nombreuses applications potentielles (résonateurs à base de graphène, applications de détection, optoélectronique...) [32]. En raison de ses très bonnes propriétés électriques et optiques, au moins en théorie, cela peut donc être un matériau idéal pour la réalisation de films transparents conducteurs (TCF). Cependant, les propriétés électriques dépendent fortement de la qualité du graphène [34-35].

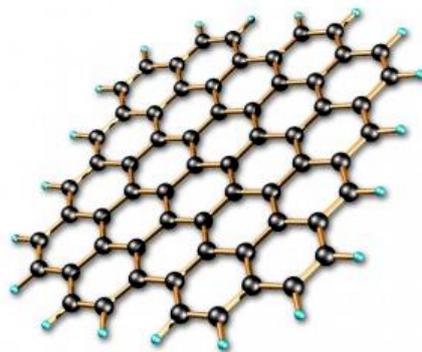


Figure 1-10 : Graphène [36]

Une seule couche de graphène a une transmission élevée ( $> 88\%$ ), mais n'utiliser qu'une couche de graphène peut s'avérer difficile en ce qui concerne la connexion électrique car elle est très fine et la résistivité de la feuille est d'environ  $230\ \Omega$  [37]. Les données expérimentales

montrent une augmentation linéaire de la conductivité avec le nombre de couches de graphène (figure 1-11) [38].

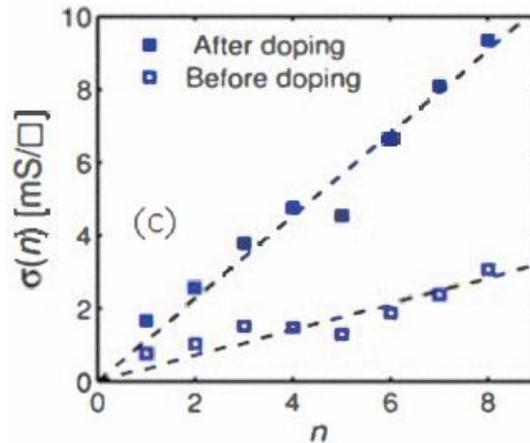


Figure 1-11 : Croissance linéaire expérimentale et théorique de la conductivité du graphène en fonction du nombre de couches avant et après dopage [38]

La transmittance, la résistance par carré et le facteur de mérite dépendent du nombre  $n$  de monocouches atomiques et sont donnés par [38]:

$$T(\%) = 100 - 2,3 \cdot n \quad (1-9)$$

$$R_s = \frac{62,4}{n} \quad (1-10)$$

$$F_0 M = \frac{z_0 n}{128,4} \times \frac{\sqrt{1-0,023 \cdot n}}{1-\sqrt{1-0,023 \cdot n}} \quad (1-11)$$

A titre d'exemple, une transparence optique de 97% et une résistance par carré de  $60 \Omega/\text{sq}$  ont été mesurées sur une solution monocouche (figure 1-10) [39].

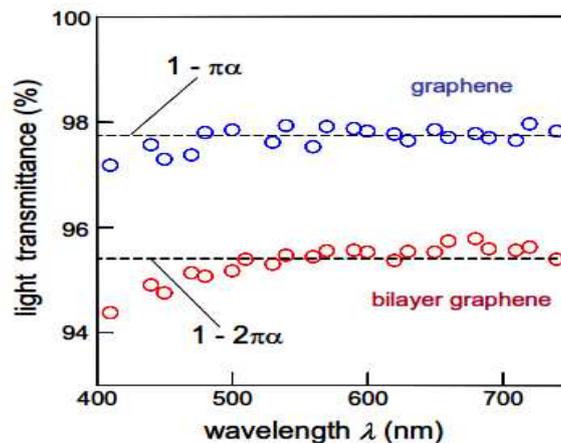


Figure 1-12: Spectres de transmittance de régions monocouches et bicouches de l'échantillon

De nouveaux conducteurs transparents à base de graphène avec une résistance de feuille de  $8,8 \Omega/\text{sq}$  et une transparence de 84 %, sont obtenus en intercalant quelques couches de

graphène (few-layer graphene FLG) avec du chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ) [40-41]. Grâce à une étude combinée des mesures de transport électrique et de transmission optique, il a été constaté que  $\text{FeCl}_3$  améliore la conductivité électrique des couches du graphène tout en laissant ces matériaux à base de graphène hautement transparents. Le  $\text{FeCl}_3$ -FLGs est stable dans l'air jusqu'à environ un an, ce qui démontre le potentiel de ces matériaux pour la production industrielle de conducteurs transparents [41].

| <b>Graphène</b>                              | <b><math>R_s</math> (<math>\Omega/\text{sq}</math>)</b> | <b>T (%)</b> | <b>FoM</b> | <b>Réf</b> |
|--|---|--------------|------------|------------|
| Monocouche                                   | 60  | 97           | 205        | [39]       |
| Multicouche                                  | 30  | 90           | 116        | [42]       |
| <b>Complète + <math>\text{FeCl}_3</math></b> | <b>8,8</b>  | <b>84</b>    | <b>235</b> | [40]       |
| Chimiquement dope                            | 125   | 97,7         | <b>129</b> | [43]       |
| Couche mince                                 | 230   | > 88%        | 12         | [44]       |

Tableau 1-3: Résistance par carré et transparence optique de quelques types de graphènes

La couche mince de graphène, difficile à réaliser, possède le facteur de mérite le plus faible (voir tableau 1-3). Les meilleurs TCF utilisant quatre ou cinq couches de graphène présentent une faible résistance par carré de 8,8  $\Omega/\text{carré}$  et une transmittance de l'ordre de 84 % [45]. Les TCF de graphène traités en solution présentent généralement une résistance de couche supérieure à 1000  $\Omega/\text{carré}$  avec une transmittance de 85% [46].

Une nouvelle technologie prometteuse est la réalisation des couches transparentes avec des nanofils. Cette technologie est détaillée par la suite.

### 1.1.5. Technologie à base de nanofils conducteurs

Les nanofils conducteurs existent sous deux formes : les nanofils métalliques et les nanotubes de carbone. Bien que l'Argent soit plus cher que l'Indium, les nanofils d'Argent AgNWs permettent une technologie qui réduit considérablement le coût global de la production en série de films conducteurs transparents (TCF) [47].

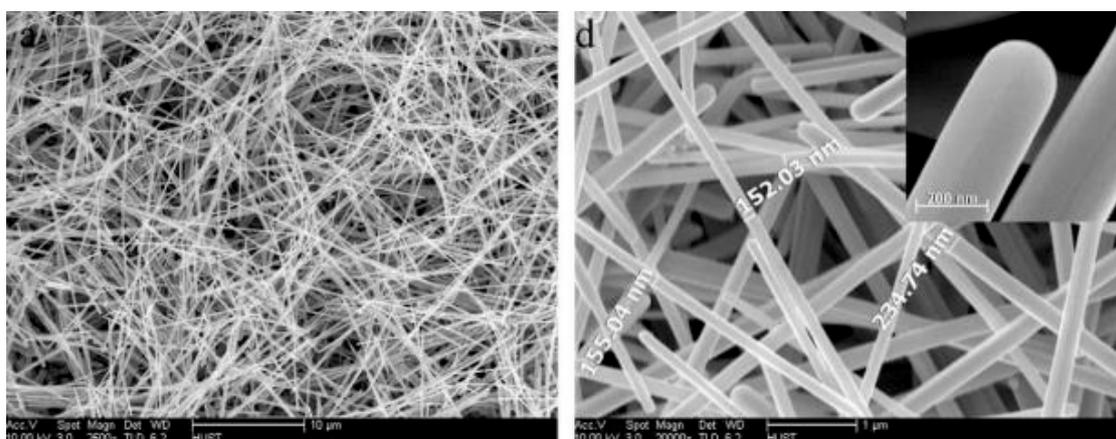


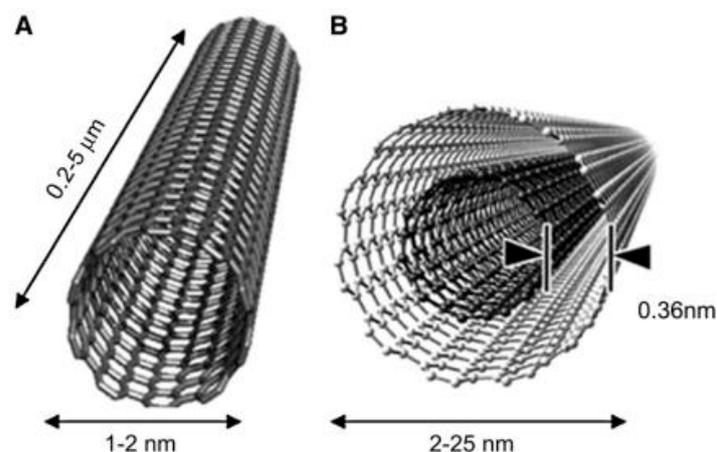
Figure 1-13 : Images de nanofils d'argent obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) [48]

A titre d'exemple, les TCF AgNWs sont utilisés comme capteurs tactiles pour ordinateurs [47]. Les électrodes transparentes AgNW présentent une excellente conductivité électrique car l'argent a la plus faible résistivité (de l'ordre de  $1,59 \times 10^{-6} \text{ cm}$ ) [49]. Une variété de dispositifs électriques déposés sur les électrodes AgNW ont été signalés, notamment des écrans tactiles [50], des cellules solaires organiques [51] et OLED [52-53]. Un film conducteur transparent obtenu à partir un réseau nanométrique de nanofils d'argent (AgNWs) par exemple, présente une résistance par carré de  $20 \Omega/\text{sq}$  pour une transmittance de 95% selon [54]. Une optimisation de cette technologie a permis d'obtenir une résistance par carré de  $2,9 \Omega/\text{sq}$  avec une transmittance  $T = 89,2\%$  [55]. Ils ont un facteur de mérite qui atteint 1000. Ces performances font que les nanofils métalliques sont en train de devenir une alternative efficace à l'ITO.

Bien que les électrodes AgNW aient plusieurs excellentes caractéristiques, il existe un problème qui empêche leur fabrication sur des substrats sensibles à la chaleur (plastiques par exemple) : un traitement thermique à environ  $200^\circ\text{C}$  est généralement nécessaire pour obtenir une conductivité électrique élevée [56]. Par conséquent, le traitement à basse température est souhaitable pour ces types de substrats [49].

La technologie des nanofils métalliques basée sur les nanofils de cuivre (CuNW) est en train de devenir une technologie de film transparent conducteur plus prometteuse, car le cuivre est 100 fois moins cher que l'argent. Les meilleurs TCF utilisant du CuNW présentent une résistance par carré et une transmittance plus élevées ( $100 \Omega/\text{carré}$  pour 95%). Un des inconvénients de cette technologie est la stabilité des CuNW contre l'oxydation qui reste malgré tout un défi [54-57].

Les nanotubes de carbones (NTs) sont largement développés dans [58]. Ils possèdent les mêmes propriétés que le graphène mais sous forme tubulaire. En effet, ils sont souvent définis comme un ou plusieurs feuillets de graphène enroulés sur eux-mêmes formant un cylindre. Il existe donc deux types de NTs (figure 1.14) : les nanotubes de carbone mono-paroi, SWNT (single-walled carbon nanotubes) et les nanotubes de carbone multi-parois, MWNT (multi-walled carbon nanotubes) [59].



*Figure 1-14 : Schéma conceptuel des systèmes de distribution de nanotubes de carbone à paroi simple (SWNT) (A) et de nanotubes de carbone à parois multiples (MWNT) (B) montrant les dimensions typiques de la longueur, de la largeur et de la distance de séparation entre les couches de graphène dans les MWNT [59]*

En fonction de leur conformation, les SWNT possèdent un caractère métallique ou semi-conducteur [60]. La combinaison de propriétés électriques et mécaniques fait des nanotubes de carbone d'excellents candidats pour de nombreuses applications. Ils peuvent notamment jouer un rôle essentiel dans le domaine de l'électronique organique, aussi appelé électronique flexible. Il est possible de citer, comme exemples, les cellules photovoltaïques (OPV) [61], les transistors [62-63] ou encore les diodes électroluminescentes organiques (OLED) [64]. La variation de la résistance par carré en fonction de la transmittance pour différentes épaisseurs de nanotubes de carbone est représentée sur la figure 1-15.

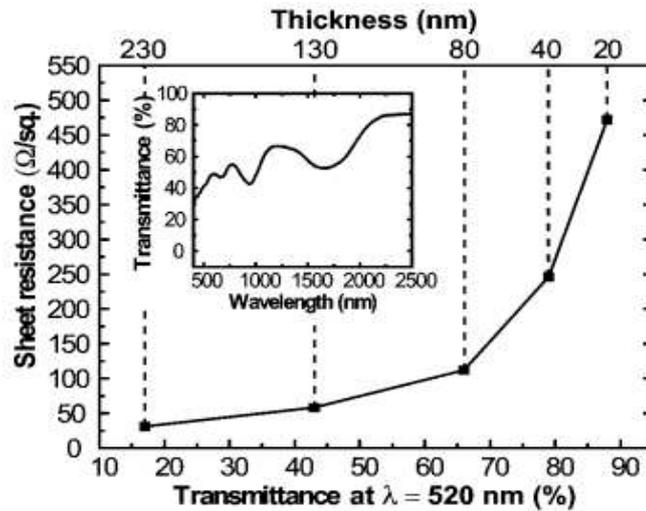


Figure 1-15 : Résistance par carré en fonction de la transmittance optique à  $\lambda = 520$  nm pour des feuilles de nanotubes de carbone de différentes épaisseurs [64]

Déposé sur verre et pour une épaisseur de 40 nm, un film de NTs ainsi réalisé présente une résistance par carré de 250  $\Omega$ /sq et une transmittance de 80%. La transmittance des films du graphène, du nanofil d'argent, du nanofil de carbone, du nanotube de carbone et de l'argent est représentée sur la figure 1-16. Les performances des technologies à base de nanofils conducteurs sont présentées dans le tableau 1-4.

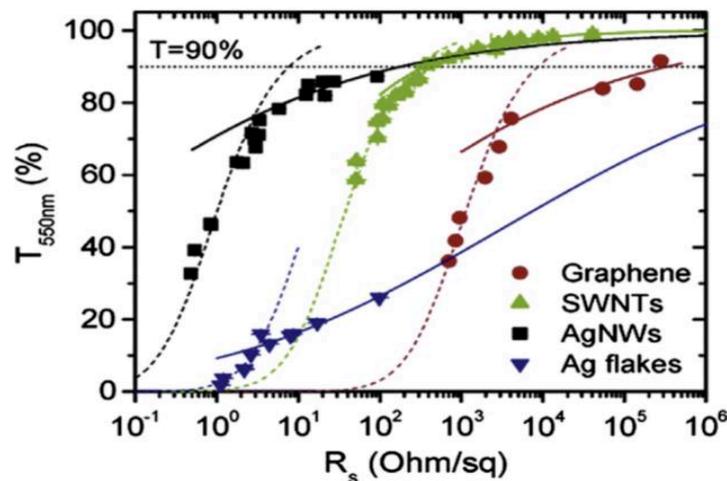


Figure 1-16: Transmittance (550 nm) tracée en fonction de la résistance par carré pour les films minces [65]

La solution hybride (AgNWs + SWNTs) permet d'avoir un film plus performant que le nanotube de carbone mais moins performant que certains nanofils d'argent. Elle a une résistance par carré de 21 Ohms/carré et une transparence optique de 87% [66] soit un facteur de mérite d'environ 130. Par contre, le nanofils d'argent a un coût plus élevé que la solution hybride avec l'introduction du SWNTs.

| Nanofils                     | Rs ( $\Omega/\text{sq}$ ) | T (%)   | FM    | Réf  |
|------------------------------|---------------------------|---------|-------|------|
| Nanofils métalliques (AgNWs) | 160                       | 97,3    | 85.5  | [55] |
|                              | 20                        | 95      | 1100  | [54] |
|                              | 2.9                       | 89.2    | 1080  | [55] |
| Nanotubes de carbone SWNTs   | 100 – 500                 | 80 – 95 | 16-14 | [66] |
| Hybride (AgNWs + SWNTs)      | 21                        | 87      | 130   | [66] |

Tableau 1-4 : Résistance par carré et transmittance des nanofils

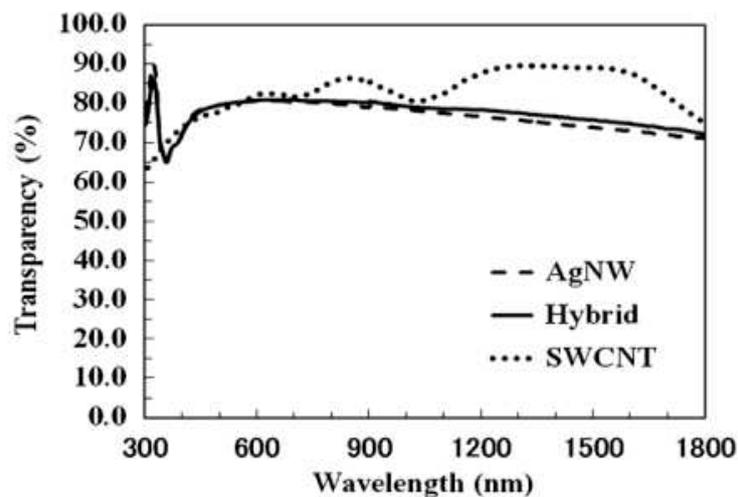


Figure 1-17 : Transparence optique des électrodes AgNW et SWCNT, et électrodes hybrides [67]

Malgré toutes ces performances, la résistance par carré de ces solutions reste élevée. Leur facteur de mérite reste faible ce qui limite leur application dans les technologies hyperfréquences.

### 1.1.6. Technologie utilisant un grillage métallique

Classiquement utilisé dans des applications électroniques transparentes, le grillage métallique est hautement conducteur puisqu'il s'appuie sur une structure métallique, et permet une transparence élevée. Par contre, il reste visible à l'œil nu puisque la largeur des métallisations peut atteindre 1000 $\mu\text{m}$  (figure 1-18). Il présente également de meilleures performances électriques et optiques que les technologies précédentes mais sa fabrication est

plus ou moins compliquée selon le design. La transmittance est obtenue par le rapport de la surface des ouvertures dans la structure ramenée à sa surface entière :

$$T = \frac{A_{see-through}}{A_{patch}} \times 100\% \quad (1-12)$$

$A_{see-through}$  : surface des ouvertures ;  $A_{patch}$  : surface entière de la structure

Le tableau 1-5 présente une comparaison des performances électrique et optique obtenues pour cette technologie et celle d'un film d'ITO : la technologie grillagée présente une meilleure transparence optique et une résistance par carré plus faible que celle d'un film d'ITO.

| Matériaux         | Transparence | Resistance par carré | Facteur de Mérite | Efficacité |
|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|------------|
| Films ITO         | 90%          | 4,6 $\Omega$ /sq     | 756               | Basse      |
| Conducteur maillé | 93%          | < 0,05 $\Omega$ /sq  | 102 000           | Haute      |

Tableau 1-5 : Comparaison entre des films transparents conducteurs de géométries de mailles différentes

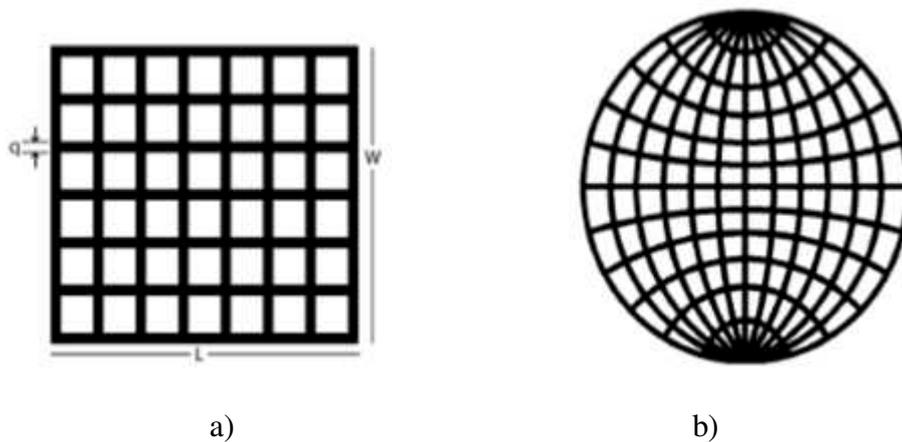


Figure 1-18: Antenne Patch grillagée a) Rectangulaire b) Circulaire [68]

En portant les couches métalliques maillées sur un substrat, une partie de l'intensité lumineuse est réfléchi donc perdue à la traversée de l'interface air/diélectrique à cause de la différence entre les indices de réfraction. Ces pertes par réflexions sont dites « pertes de Fresnel ». Le coefficient de réflexion, rapport entre la puissance incidente  $P_i$  et la puissance réfléchi  $P_r$  à l'interface entre les deux milieux diélectriques est donnée par [69] :

$$R = \frac{P_r}{P_i} = \left( \frac{n_{air} - n_{verre}}{n_{verre} + n_{air}} \right)^2 \quad (1-13)$$

$n_{air}$  : indice de réfraction de l'air     $n_{verre}$  : indice de réfraction du verre

Les pertes de Fresnel ( $P_{Fresnel}$ ) se calculent alors de la manière suivante :

$$P_{Fresnel} = 1 - (1 - R)^2 \quad (1-14)$$

$$T = (1 - R)^2 \quad (1-15)$$

T est la transmittance maximale de ce verre. A titre d'exemple, pour un verre d'indice  $n_{verre} \approx 1.5$ ,  $P_{Fresnel} \approx 8\%$  et  $T = 92\%$ . Le coefficient de réflexion peut néanmoins être réduit en déposant une couche antireflet sur chaque face du verre.

La transmittance théorique après le dépôt  $T_r$  est donnée par la formule :

$$T_r = T_{grid}(1 - R)^2 \quad (1-16)$$

Cette technologie présente donc le meilleur facteur de mérite, celui-ci peut atteindre 145 000 selon [69].

Le grillage peut être rendu invisible par une diminution du pas de grillage et de la largeur de grille, cette technique est appelée le maillage à pas micrométrique que nous vous présentons ci-dessous.

### 1.1.7. Technologie de maillage à pas micrométrique

Cette technologie part du même principe que le grillage métallique mais la largeur et le pas de maillage sont réduits pour que l'ensemble soit quasi-invisible et semble homogène à l'œil nu. Avec le design proposé en référence [69], la valeur de  $R_s$  est réduite,  $R_s = 0,022\Omega/sq$  à  $T = 81\%$ , le facteur de mérite est alors de l'ordre de 69 000.

Pour définir les valeurs des paramètres du maillage métallique afin qu'il soit le plus transparent possible, on utilise les performances de l'œil humain. Le pas du maillage doit être plus petit que l'acuité visuelle humaine : l'angle sous lequel sont observés deux points doit être inférieur à  $\theta_{min} = 4,9 \times 10^{-4}$  rad [70] pour que l'œil ne soit plus capable de les discriminer (Figure 1-19). Ainsi, en fonction de la distance des personnes au maillage (la distance minimale étant égale à celle de vision du point proche, ou Punctum Proximum, soit  $L = 25$  cm en moyenne), la valeur du gap pour fabriquer ces antennes correspond à l'ouverture  $G$  séparant deux points et doit rester inférieure à :

$$G_{max} = L \cdot \tan(\theta_{min}) \approx L \cdot \theta_{min} \quad (1-17)$$

Avec ( $\theta_{min} = 4,9 \cdot 10^{-4}$  rad),  $L$  : la distance à laquelle l'œil observe les deux points.

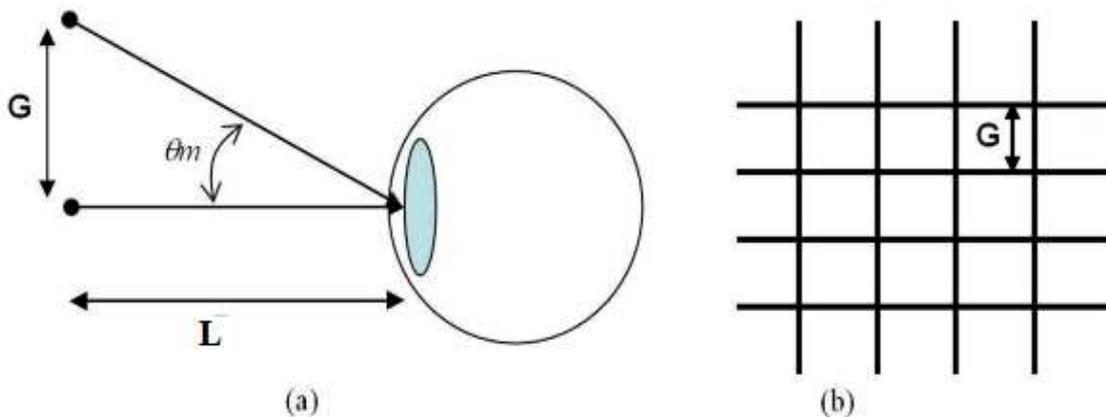


Figure 1-19 : Schéma de principe de la discrimination de deux objets observés à l'œil nu (a), géométrie de la maille (b).

La figure 1-20 illustre l'évolution de l'ouverture maximale  $G_{max}$  à respecter pour maximiser la discrétion du grillage, en fonction de la distance d'observation  $D$ . En utilisant le Punctum Proximum sachant qu'il augmente avec l'âge, la valeur minimale du gap est  $G_{max} = 0,25 \times 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 122 \mu\text{m}$  en moyenne à l'âge adulte. En revanche, pour une distance d'observation de 1 mètre par exemple, elle peut atteindre  $480 \mu\text{m}$ .

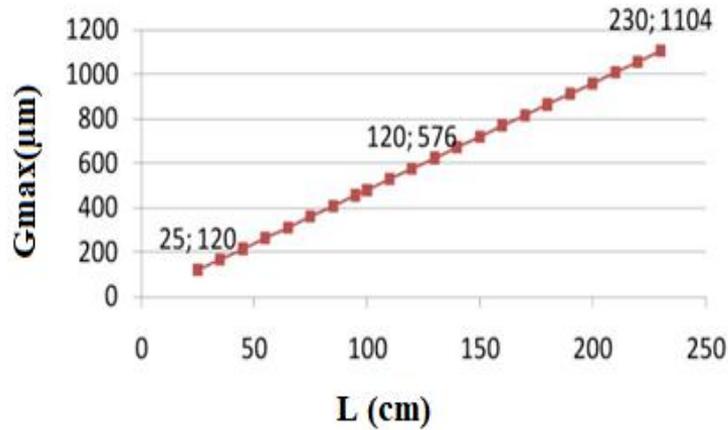


Figure 1-20: Ouverture maximale  $G_{max}$  de la maille à respecter pour assurer la discrétion d'une maille, en fonction de la distance d'observation  $L$ , selon (1-17)

Il existe différentes méthodes de calcul utilisées pour le grillage métallique et le maillage à pas micrométrique permettant de déterminer la transmittance et la résistance par carré théoriques selon le maillage (figure 1-21).

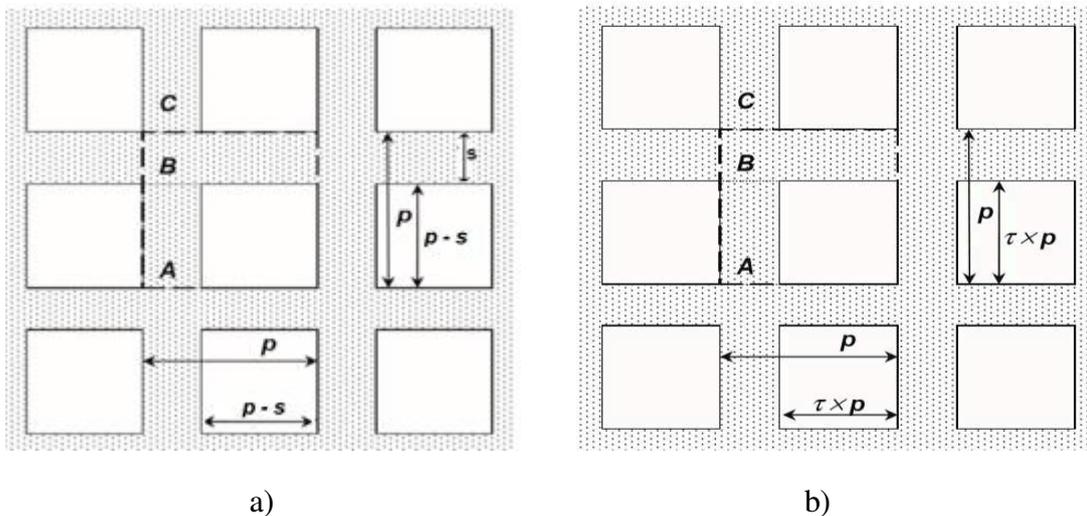


Figure 1-21: Modèles de maille

**Première méthode** (figure 1-21 a) [70] :

Pour un maillage carré, la transparence optique de la grille portée sur un substrat est donnée par la relation :

$$T(\%) = \left(\frac{p-s}{p}\right)^2 \cdot T_{sub} \quad (1-18)$$

Où  $p$  et  $s$  sont des dimensions définies comme sur la figure 1-21 (a) et  $T_{sub}$  est la transparence optique du substrat.

La résistance par carré de la structure est  $R'_s$  telle que :

$$R'_s = \frac{p}{s} R_s = \frac{p}{s} \times \frac{\rho}{e} = \frac{p}{s} \times \frac{1}{e \sigma} \quad (1-19)$$

où  $R_s$  est la résistance par carré de la structure à couche pleine,  $\rho$  la résistivité du métal utilisé,  $e$  l'épaisseur du film métallique,  $\sigma$  la conductivité électrique.

Le facteur de mérite devient alors :

$$F_0 M = \frac{Z_0 \times e}{2\rho} \frac{p-s}{p} \quad (1-20)$$

avec  $Z_0 = 377 \Omega$  est l'impédance du vide

Pour un maillage rectangulaire, la transparence optique de la grille est :

$$T(\%) = \left( \frac{p_x - s_x}{p_x} \right) \times \left( \frac{p_y - s_y}{p_y} \right) \cdot T_{sub} \quad (1-21)$$

Où  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $s_x$ ,  $s_y$  sont les composantes horizontales et verticales de  $p$  et  $s$ .

La résistance par carré suivant les directions  $x$  et  $y$  est :

$$R'_{sx} = \frac{p_x}{s_y} R_s ; \quad R'_{sy} = \frac{p_y}{s_x} R_s \quad (1-22)$$

Le facteur de mérite suivant les directions  $x$  et  $y$  est :

$$F_0 M_x = \frac{Z_0 \times e}{2\rho} \frac{p_x - s_x}{p_x} \quad F_0 M_y = \frac{Z_0 \times e}{2\rho} \frac{p_y - s_y}{p_y} \quad (1-23)$$

**Seconde méthode** (figure 1-21 b) : l'ouverture carrée a des côtés de longueur  $\tau \times p$  ( $0 < \tau < 1$ )

La transmittance de la grille est alors donnée par :

$$T_{grid}(\%) = \left( \frac{\tau \cdot p}{p} \right)^2 T_{sub} = \tau^2 \cdot T_{sub} \quad (1-24)$$

Pour maximiser la transmittance, il est également nécessaire de minimiser la largeur  $s$  des grilles. La figure 1-22 illustre la largeur maximale  $W_{max}$  des grilles à choisir pour assurer une valeur de transmittance  $T$  donnée. Quoiqu'il en soit cette limite basse sera conditionnée par la technologie utilisée.

A titre d'exemple, pour le Punctum Proximum, et pour une transmittance de 80%, les largeurs de conducteurs ne doivent pas dépasser 13  $\mu m$ , contre 50  $\mu m$  pour une transmittance de 50%. En revanche, pour une distance d'observation de 1 m, elles peuvent aller jusqu'à 53  $\mu m$  pour une transmittance de 80%, et jusqu'à 200  $\mu m$  pour une transmittance de 50%. Compte

tenu des contraintes de réalisation, il sera possible de surmonter les contraintes de dimensionnement des grillages, en choisissant par exemple des largeurs de grille de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  au lieu de 13 $\mu\text{m}$ .

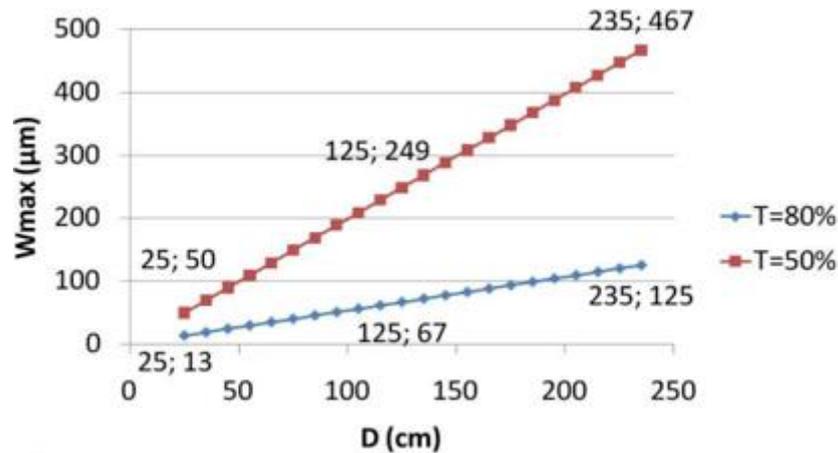


Figure 1-22 : Largeur maximale  $W_{max}$  des conducteurs à respecter pour assurer la transparence  $T$  d'une maille, en fonction de la distance d'observation  $D$  [71]

### 1.1.8. Technologie de micro maillage métallique

Considéré comme une nouvelle technique, le micromaillage métallique est un film transparent conducteur à base de micro-métaux (MM) structuré autour de nanoparticules par autoassemblage (procédé par lequel un système désorganisé de composants élémentaires s'assemble et s'organise de façon spontanée et autonome, à la suite d'interactions spécifiques et locales entre ces composants). Avec des propriétés très remarquables, il a non seulement une transparence optique élevée, mais également une conductivité électrique élevée [73-72]. A titre d'exemple, une résistance par carré de 0,7  $\Omega/\text{sq}$  et une transmittance dans le visible de 75% ont pu être obtenues avec un micro maillage métallique d'argent [73-72]. Son facteur de mérite est d'environ 1800.

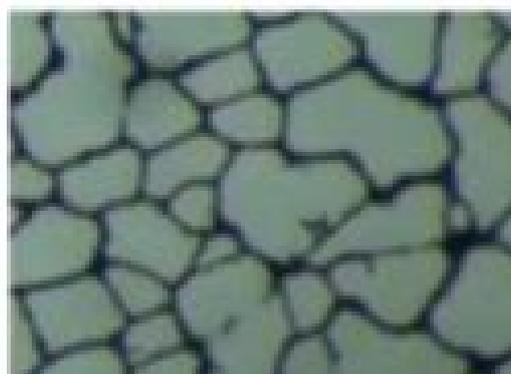


Figure 1-23 : Film conducteur transparent en Micro Métaux d'argent [73]

### 1.1.9. Conclusion sur les matériaux conducteurs transparents

Un certain nombre de solutions technologiques à faible impact visuel permettant malgré tout d'assurer des propriétés de conductivité électrique comparables à celles de conducteurs classiques a été présenté. Le film conducteur ultramince offre le facteur de mérite le plus faible

parmi les MCT (inférieur à 10), il n'est donc pas conseillé pour des applications hyperfréquences. Les oxydes transparents conducteurs, notamment l'ITO historiquement utilisé comme MCT, présentent un bon compromis entre résistivité et transparence optique avec un facteur de mérite atteignant 1000. Par contre, la résistance électrique de l'ITO reste élevée, et son coût de mise en œuvre est trop élevé pour la réalisation de dispositifs peu coûteux. Par ailleurs, il souffre d'une faible flexibilité mécanique. Ces insuffisances sont améliorées grâce aux solutions multicouches OTC/métal/OTC. Le facteur de mérite augmente jusqu'à atteindre environ 1500 mais sa transparence n'est pas constante dans le spectre du visible. Les technologies prometteuses comme les nanofils et le graphène, avec des facteurs de mérite respectivement de l'ordre de 1080 et 230 présentent des résistances élevées. Au vu des caractéristiques et des performances des différentes solutions, le grillage métallique semble offrir le facteur de mérite le plus élevé (>100 000) avec une transmittance supérieure à 90% et une résistance par carré inférieure à 0,05 Ohm/sq. Il constitue donc une solution intéressante pour synthétiser des matériaux conducteurs optiquement transparents pour la conception d'antennes à faible impact visuel. Malgré tout, les grilles restent visibles à l'œil nu à cause de leur épaisseur. Pour que le dépôt apparaisse comme homogène, le maillage à pas micrométrique, avec des largeurs de grille plus fines, présente aussi un facteur de mérite important (>50 000). En tenant compte de certains critères tels que la technologie de dépôt disponible et mature, la non toxicité, la résistance mécanique des couches, la capacité d'adhérence, la température de dépôt, et le coût de fabrication, la technologie utilisant un grillage métallique est la solution retenue.

## **1.2. Présentation et choix de plusieurs solutions de substrats optiquement transparents**

Les solutions de substrats transparents regroupent deux grandes familles, les verres et les plastiques. Les principales caractéristiques à prendre en compte sont :

- La transparence optique dans le domaine du visible qui doit être la plus élevée possible, typiquement supérieure à 70%, ce qui correspond au niveau de transparence autorisé pour les vitres teintées en France ;
- Dans la mesure où l'application visée est la conception d'antennes, une constante diélectrique faible pour des antennes efficaces ou élevée pour des antennes miniatures et, dans les deux cas, la tangente de l'angle de pertes ( $\tan \delta$ ) qui doit être la plus faible possible ;
- Le vieillissement, la tenue aux UV, les épaisseurs disponibles, le coût...

### **1.2.1 Verres ou substrats inorganiques**

#### **1.2.1.1. Verre sodocalcique**

Le verre sodocalcique (« Soda-lime glass » en anglais) est un verre à bas coût, réalisé principalement à partir d'oxydes de silicium ( $\text{SiO}_2$ ), de calcium ( $\text{CaO}$ ), de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), de magnésium ( $\text{MgO}$ ) ou d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), facilement accessibles [74]. On peut trouver facilement différentes dimensions et épaisseurs. La transparence est de plus de 90% dans la bande (400 - 700 nm) (figure 1-24) pour une constante diélectrique et une tangente de perte qui peuvent être relativement élevées, par exemple  $\epsilon_r \approx 7$  et  $\tan \delta \approx 3 \times 10^{-2}$  à 10 GHz [74].

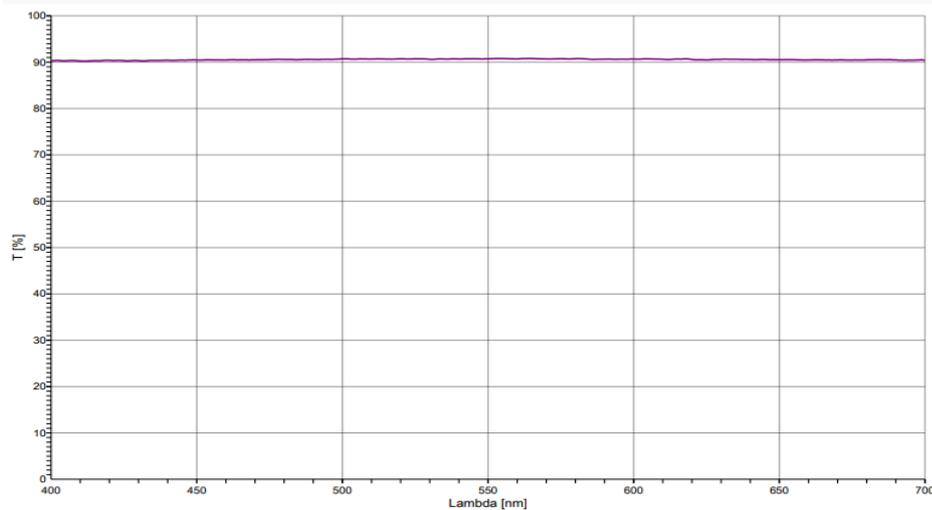


Figure 1-24 : Exemple de transparence optique d'un substrat de verre sodocalcique nu [74].

L'inconvénient majeur des verres sodocalciques est qu'ils n'ont pas de classification précise. Leurs caractéristiques diélectriques (permittivité diélectrique et tangente de pertes) ne sont pas souvent spécifiées et sont variables d'un verre à un autre de même nature. Ils sont également moins transparents que d'autres verres comme par exemple le verre Corning 7059 [75]. Ils ne sont donc pas conçus pour des applications à hautes fréquences.

### 1.2.1.2.Substrat monocristallin

Les substrats transparents monocristallins comme le saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  :  $\tan\delta = 2.10^{-5}$  à 10 GHz avec  $\epsilon_r = 11$ ) et l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$  :  $\tan\delta = 1.6.10^{-5}$  à 10GHz avec  $\epsilon_r = 10$ ) ont des caractéristiques optiques et diélectriques intéressantes, notamment du fait de leurs tangentes de pertes faibles. L'utilisation de ces matériaux permet de synthétiser des couches minces épitaxiées d'OTC dotées d'excellentes propriétés électriques (1120 S/cm pour un film de CdO pur et qui atteint un maximum 42 000 S/cm avec un dopage Sn, à 2,5 %) [76]. Ils sont donc utilisés en hyperfréquences pour réaliser des systèmes très efficaces et performants [77]. Cependant, l'utilisation des substrats monocristallins est limitée à cause de leur coût élevé. D'autre part, certains substrats comme le saphir peuvent présenter une anisotropie du fait de l'arrangement spécifique des atomes. Enfin, la constante diélectrique élevée ne favorise pas le rayonnement.

### 1.2.1.3.Verres électroniques

Les verres électroniques (ou verres technologiques), tels que le verre de référence 1737 chez Corning largement utilisé par la communauté scientifique, ou bien la Silice (ou quartz amorphe) présentent des propriétés optiques (transparence optique, tenue dans le temps et aux rayonnements ultra-violetts ...) similaires à celles des verres sodocalciques. La différence est la certification des principales caractéristiques hyperfréquences par les fabricants, leurs caractéristiques diélectriques sont ainsi maîtrisées.

La permittivité relative de ces verres peut varier de 3.8 à 7 à 10 GHz suivant les références et les tangentes de pertes peuvent atteindre  $10^{-3}$ , voire  $10^{-4}$  pour la Silice. L'inconvénient est que toutes les dimensions ne sont pas disponibles chez les fabricants. En particulier, le choix de l'épaisseur est limité et le coût nettement plus important comparativement à celui des verres sodocalciques. Par ailleurs, les couches conductrices d'épaisseur supérieure au micromètre adhèrent difficilement sur ces verres, elles

nécessitent souvent une couche d'accrochage (titane, chrome...) afin d'assurer leur adhérence à la surface du substrat.

Le tableau ci-dessous résume les propriétés diélectriques et optiques de quelques verres électroniques transparents de caractéristiques semblables [78] :

| Type Verres        | Épaisseur (mm) | Transmittance (%) | Fréquence de mesure | $\epsilon_r$ | $\tan\delta$ à 10 GHz | Réf  |
|--------------------|----------------|-------------------|---------------------|--------------|-----------------------|------|
| Corning Glass 1737 | 0,7 - 1,1      | 92                | 1,5 GHz             | 5,7          | $6,5 \cdot 10^{-3}$   | [79] |
| EAGLE XG           | 0,7 - 1,1      | 92                | 10 kHz              | 5,27         | $3 \cdot 10^{-3}$     | [80] |
| Borofloat 33       | 0,7 - 25,4     | 92                | 1 GHz               | 4,5          | $5,1 \cdot 10^{-3}$   | [81] |

Tableau 1-6 : Récapitulatif des paramètres de quelques verres électroniques

Les substrats organiques, décrits ci-après sont non cassants, déformables.

### 1.2.2. Substrats organiques

Contrairement aux substrats en verre, les substrats organiques sont principalement constitués de carbone, ce sont des substrats flexibles et facilement découpables. Pour des applications spécifiques, des couches conductrices peuvent être déposées sur des supports de formes non planes. Les principales références dont la transparence est similaire à celle des substrats verres déjà cités et utilisables pour des applications hyperfréquences sont :

- Le PMMA (polyméthacrylate de méthyle, plus connu sous le nom commercial de Plexyglass) ;
- Les PET (polytéréphtalate d'éthylène)
- Les Polycarbonates
- Le TPX (polyméthylpentène), (figure 1-25), transparent à 93% dans le visible, pour une épaisseur de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ , de niveau de pertes diélectriques faible (typiquement  $\tan \delta = 8 \times 10^{-4}$  à 10 GHz) [82].

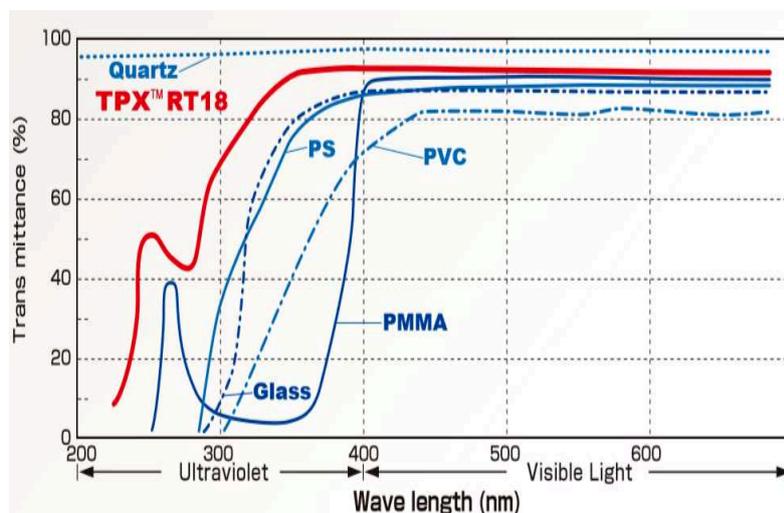


Figure 1-25 : Caractéristiques optiques du TPX (Mitsui chemicals) [82]

Malgré ces performances, ces substrats ont deux inconvénients majeurs, leur sensibilité aux rayonnements UV et à la température. En effet, leurs caractéristiques optiques ont tendance à se dégrader dans le temps (absorption d'une partie du spectre du visible qui entraîne un jaunissement). Ce phénomène entraîne une décomposition de la matière, dégradant ainsi l'esthétique et la fonctionnalité du système. C'est pourquoi les substrats organiques ne sont pas privilégiés pour des applications optiques. De plus, à cause de leur sensibilité à la température et à l'humidité, le dépôt métallique sur leur surface est très compliqué. La montée en température cause la déformation dudit substrat. La figure 1-26 présente l'exemple d'un TPX déformé après un dépôt métallique.



*Figure 1-26 : Déformation d'un substrat TPX sous l'effet de la chaleur après un dépôt par pulvérisation [83]*

### **1.2.3. Conclusion sur les substrats transparents**

Il existe une grande variété de substrats optiquement transparents dans le spectre visible mais peu proposent à la fois de bonnes performances radioélectriques et des performances optiques constantes dans le temps. Les verres sodocalciques sont moins coûteux mais présentent une tangente de perte élevée, et n'ont pas de classification et de stabilité des caractéristiques ce qui diminue les performances hyperfréquences d'un dispositif fabriqué à partir de ce verre. Quant aux substrats monocristallins, ils ont une faible tangente de perte mais leur coût est élevé et ils présentent parfois une anisotropie. Les substrats organiques ont pour principal intérêt leur flexibilité et leur coût, mais leurs performances optiques se dégradent dans le temps, à cause de l'exposition au rayonnement UV. Les verres électroniques résistent très bien aux conditions environnementales, mais ne sont pas très faciles à travailler. Toutes ces informations nous orientent malgré tout vers l'utilisation des verres électroniques. Parmi ces verres électroniques, le Borofloat 33 est facilement accessible, à faible coût et présente une faible permittivité et une faible tangente de perte diélectrique. Dans ces travaux, le substrat utilisé sera donc ce dernier.

## **1.3. Travaux de référence sur les antennes à faible impact visuel**

Dans cette section, quelques exemples d'antennes à faible impact visuel réalisées à partir de certains des matériaux conducteurs transparents décrits ci-dessus sont présentés et discutés. Ils serviront de référence pour la suite des travaux.

### **1.3.1. Antenne à base de film ultraminece métallique**

Une première référence [16] sert de base à la conception d'antennes à faible impact visuel. L'objectif a d'abord été de comparer la transparence présentée par une couche de cuivre ultrafine de 1000nm d'épaisseur ( $Cu_1$ ) et une autre de 10nm ( $Cu_2$ ) déposées par pulvérisation

radiofréquence sur du substrat de verre Corning 1737 de permittivité diélectrique 5.7 et de tangente de perte  $2.10^{-4}$ . La transparence obtenue est comprise entre 45% et 64% dans le visible [16] avec une résistance par carré l'ordre de de  $8.3 \Omega/\text{sq}$  pour la couche de 10nm. La couche de 1000nm est opaque donc sa transparence est nulle et sa résistance par carré de  $0.01 \Omega/\text{sq}$ .



Figure 1-27: Couches de cuivre déposées sur verre Corning 1737 a) Film de cuivre de  $1 \mu\text{m}$  d'épaisseur b) Film de cuivre de 10 nm d'épaisseur

Deux antennes ont été réalisées. Elles ont les mêmes dimensions, de 50 mmx50 mm sur un plan de masse en laiton de 150 mm x150 mm (figure 1-28). Leur fréquence de résonance est d'environ 800 MHz [16].

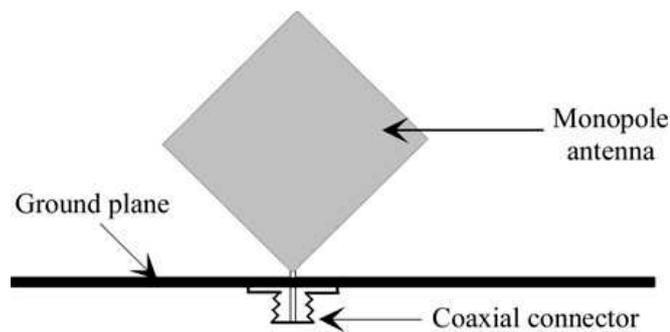


Figure 1-28: Antenne monopole

La figure 1-29 a) montre un bon accord entre la théorie et les mesures sur l'antenne en  $\text{Cu}_1$ . A la fréquence de résonance, la partie réelle de l'impédance d'entrée est de  $15 \Omega$ . Sur l'antenne en  $\text{Cu}_2$ , la partie réelle de l'impédance d'entrée est plus élevée (figure 1-29 b).

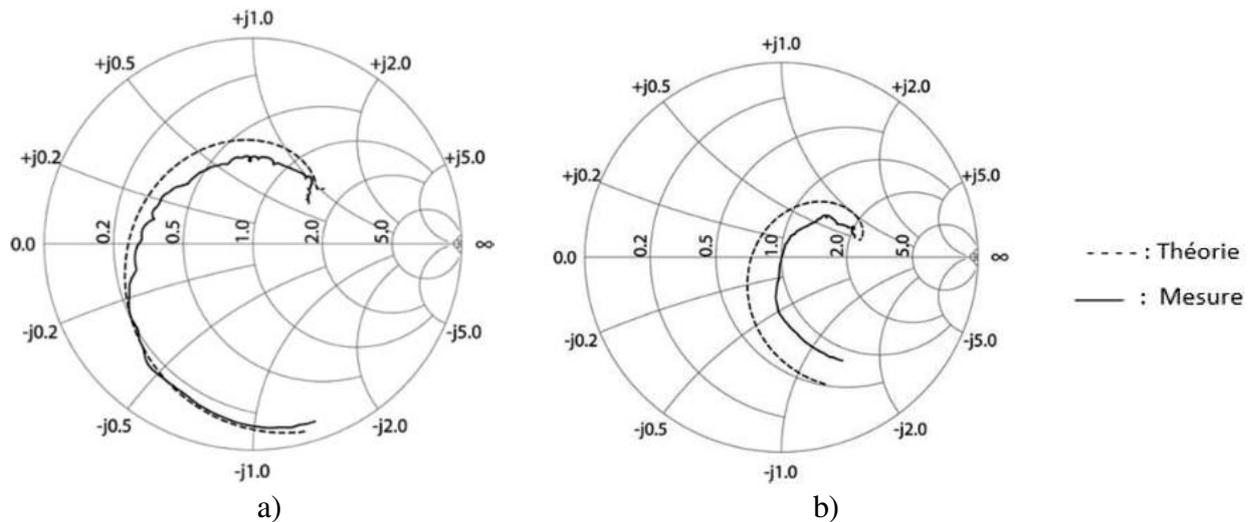


Figure 1-29 : comparaison des valeurs théoriques et mesurées de 500 à 1300 MHz a) Film de cuivre de 1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur b) Film de cuivre de 10 nm d'épaisseur

L'antenne transparente à base de  $\text{Cu}_2$  a un gain théorique de -4,8 dBi à comparer à celui de l'antenne en  $\text{Cu}_1$  de l'ordre de 0,98 dBi. Cet écart peut être attribué en partie à une diminution de la conductivité dans la couche de cuivre ultrafine, mais principalement aux pertes dues à l'effet de peau. Lorsque l'épaisseur du métal est inférieure à la profondeur de peau, la résistance effective de la couche conductrice augmente. Ces pertes s'ajoutent aux pertes ohmiques de la couche de cuivre.

### 1.3.2. Antenne en ITO

Dans un premier temps, une antenne en ITO identique en termes de dimensions et de forme à celle conçue précédemment en cuivre est proposée pour comparaison [16]. Un film d'ITO d'épaisseur 1  $\mu\text{m}$  a été déposé. Sa transparence optique dans le domaine du visible, située entre 69% et 86%, est supérieure à celle d'une couche ultramince de cuivre même si les deux matériaux ont environ la même résistance par carré (8.6  $\Omega/\text{sq}$  pour ITO).

Dans un second temps, une antenne monopôle ultra large bande en anneau circulaire avec une structure d'alimentation en guide d'ondes coplanaire (CPW) est réalisée. La géométrie et les paramètres définissant l'antenne proposée sont illustrés sur la figure 1-30 a) et b) [85, 86]. Elle a été fabriquée sur un film conducteur ITO d'épaisseur 100 nm. L'antenne est conçue sur un substrat de verre de taille 50  $\times$  50  $\text{mm}^2$ , d'épaisseur 1.3 mm et de permittivité diélectrique 4.6. Les dimensions de l'antenne sont données dans le tableau 1-7.

| Paramètres  | X  | W     | L    | W1 | D0   | D1 |
|-------------|----|-------|------|----|------|----|
| Unités (mm) | 50 | 23.45 | 18.7 | 1  | 25.2 | 11 |

Tableau 1-7 : Valeur des caractéristiques de l'antenne [85]

Comparativement à une antenne opaque réalisée à partir du film en cuivre ultramince d'épaisseur 1  $\mu\text{m}$ , on constate une baisse de gain d'environ 5,1 dBi. Ce qui limite les performances hyperfréquences de l'antenne en ITO à cette fréquence.

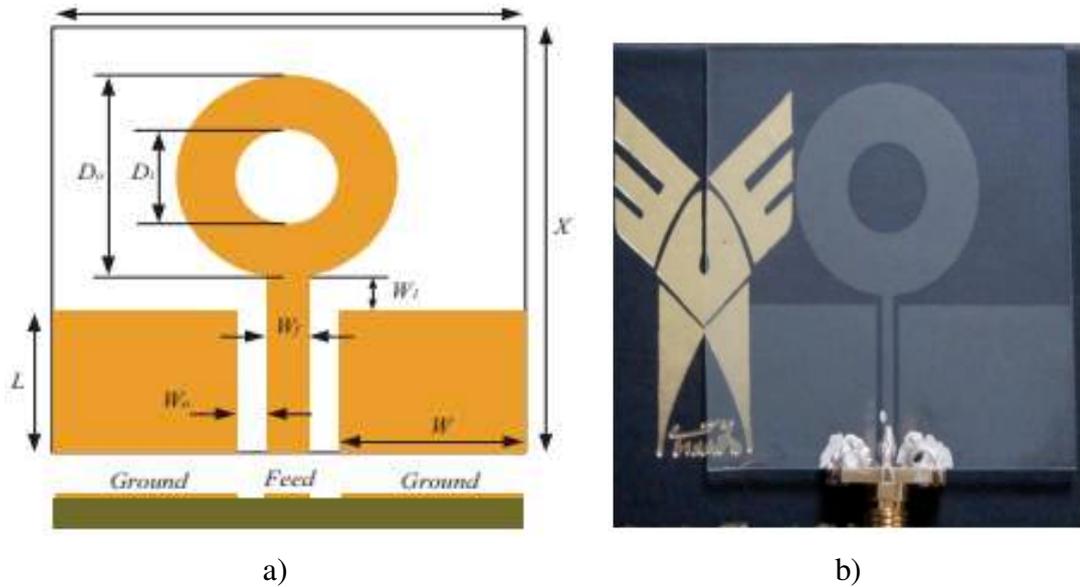


Figure 1-30 : Antenne transparente en ITO a) structure b) réalisation

Cette antenne est étudiée à plusieurs fréquences toujours dans la bande de fréquence où l'antenne est adaptée (tableau 1-8).

|                                 |    |    |     |    |
|---------------------------------|----|----|-----|----|
| Fréquences                      | 3  | 5  | 8   | 13 |
| Gain (dB)                       | -4 | -2 | 0,5 | 2  |
| Transparence (%)<br>ITO + verre | 88 |    |     |    |

Tableau 1-8 : Gain et transparence mesurés

La transparence globale obtenue est de 88% avec un gain variant de -4 à 2 dB selon les fréquences.

### 1.3.3. Antenne en multicouche

Pour parvenir à l'obtention d'antennes transparentes efficaces, l'utilisation de matériaux ayant de faibles résistances par carré est nécessaire. Un des moyens pour y parvenir est l'utilisation de multicouches qui présentent une résistance par carré plus faible que les couches OTC simples ou que les films ultraminesces.

#### Antennes Multicouche ITO/Cu/ITO

Une solution hybride [16] de la même structure de monopole que dans les points 1.3.1. et 1.3.2. a été testée en enrobant une couche de cuivre ultrafine entre une sous-couche et une surcouche d'ITO : ITO/Cu/ITO. Cette multicouche oxyde semi-conducteur/métal offre un bon compromis entre une faible résistivité électrique et une haute transparence optique. Cette solution limite les pertes surfaciques métalliques tout en gardant une conductivité globale élevée (de l'ordre de  $1,16 \cdot 10^6$  S/m). Une valeur de gain théorique de -1,96 dBi a ainsi été obtenue. Cependant, la transparence optique des deux premières antennes (Cu et ITO) est pour partie supérieure à celle de l'antenne multicouche ITO/Cu/ITO (tableau 1-9). En revanche, cette dernière permet d'améliorer le gain de l'antenne de 2 à 3dB.

| Matériaux      | Résistance par carré | Transparence (%) | Gain (dBi) |
|----------------|----------------------|------------------|------------|
| Cu (1 $\mu$ m) | 0,01                 | 0                | 0,98       |
| Cu (10nm)      | 8,3                  | 45 < T < 64      | -4,80      |
| ITO            | 8,6                  | 69 < T < 86      | -4,10      |
| ITO/Cu/ITO     | 4,7                  | 28 < T < 61      | -1,96      |

Tableau 1-9 : Performances de quelques antennes monopoles à 800 MHz [16]

### Antenne multicouche en AgHT

Le film d'oxyde d'étain dopé AgHT (polyester enduit d'argent) a également été utilisé pour la conception d'une antenne transparente monopole [86]. L'antenne en AgHT-8 est de dimensions 50mm x50mm [87]. Une couche de AgHT-8 de 177 $\mu$ m d'épaisseur est déposée sur du plexiglas de 1,48 mm d'épaisseur, de permittivité diélectrique 2,39 et de tangente de perte de  $1,3 \cdot 10^{-4}$ . Le matériau conducteur et le substrat sont transparents, ce qui rend l'antenne proposée optiquement très peu visible.

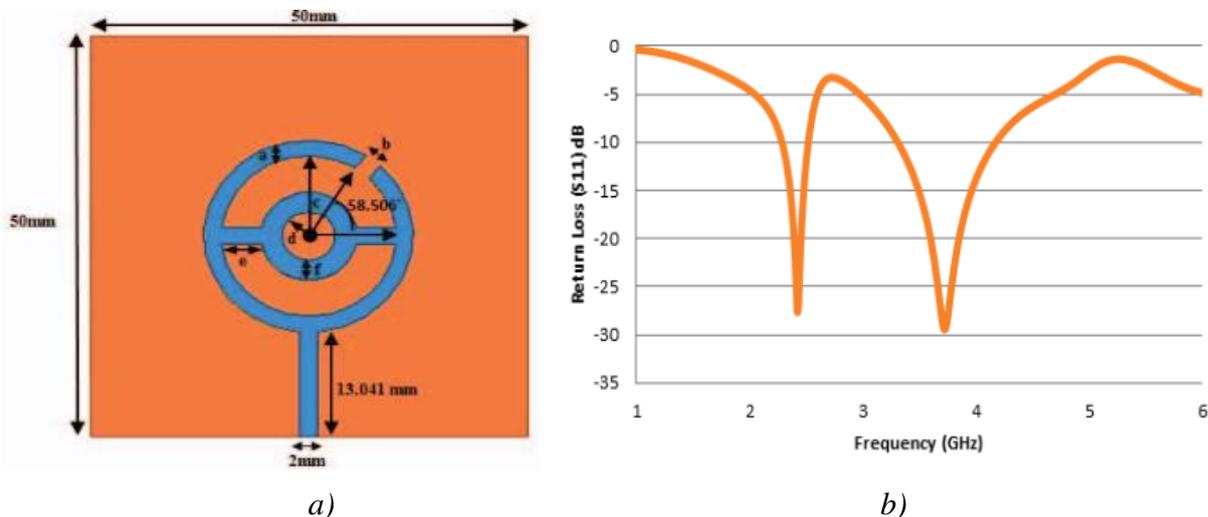


Figure 1-31 : a) Géométrie de l'antenne b) Coefficient de réflexion

Les valeurs de résistance par carré et de transparence optique n'ont pas été fournies par les auteurs. Le tableau 1-10 résume les caractéristiques de cette antenne.

| Caractéristiques             | Bande passante basse | Bande passante haute |
|------------------------------|----------------------|----------------------|
| Fréquence de résonance (GHz) | 2,42                 | 2,71                 |
| Bande passante (%)           | 9,16                 | 22                   |
| Gain (dBi)                   | 2,26                 | 2,11                 |

Tableau 1-10 : Caractéristiques des antennes

Une autre étude [88] propose d'utiliser un film AgHT pour améliorer le gain d'une antenne coplanaire en localisant les zones de l'antenne où les courants de surface sont les plus importants et en les rendant plus conductrices. Dans l'exemple proposé, le gain est augmenté de -5 dBi à 0 dBi à 2,2 GHz tout en préservant la transparence optique. La comparaison de la

distribution du courant de surface sur des antennes à base de cuivre et à base d'AgHT (figures 1-32 (a) et (b)) montre que les courants de surface sont beaucoup plus forts le long des bords de la fente et au niveau de l'alimentation pour l'antenne cuivre que pour l'antenne AgHT qui présente des pertes ohmiques importantes le long des bords de la fente (résistance par carré élevée,  $4,5 \Omega/\text{sq}$ , par rapport à celle en cuivre,  $0,0,2\Omega/\text{sq}$ ). La distribution de courant de surface simulée pour l'antenne avec la méthode proposée redevient similaire à celle de l'antenne en cuivre.

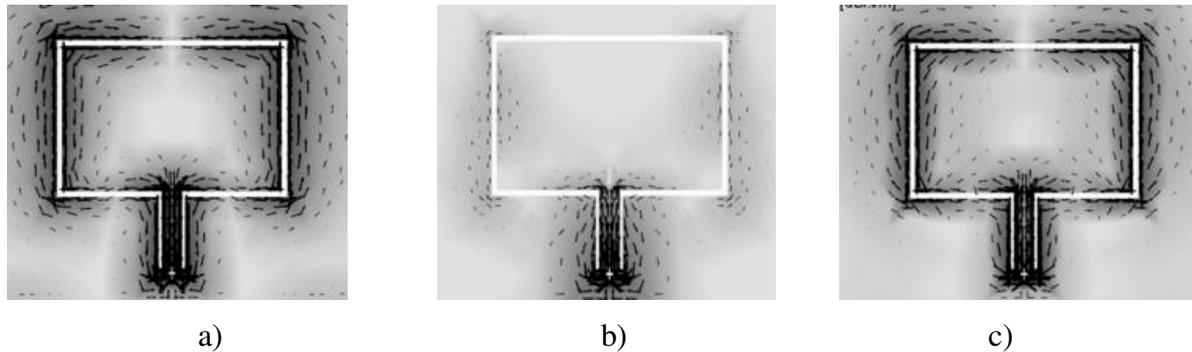


Figure 1-32 : Distribution du courant de surface à 2,2 GHz sur des antennes coplanaires en : (a) cuivre, (b) film AgHT-4, (c) film AgHT-4 avec la méthode proposée

Enfin, une comparaison des performances obtenues avec des antennes en AgHT et en ITO a été effectuée [89]. Elle révèle qu'en général, la transparence des films AgHT est inférieure à 70 %. Le film AgHT-4, avec une transparence de 75 %, a une résistance par carré similaire à celle d'un film ITO, transparent à 90 %. Par conséquent, pour concevoir une antenne efficace avec des films AgHT, un compromis doit être trouvé sur la transparence. Pour la même transparence, une antenne ITO sera plus efficace en rayonnement qu'une antenne conçue à partir d'un film AgHT.

| Matériaux                                   | 90% Film ITO | 75 % Film AgHT-4 | 75 % Film AgHT-8 |
|---|--------------|------------------|------------------|
| Resistance par carré ( $\Omega/\text{sq}$ ) | 4,6          | 4,5              | 8                |

Tableau 1-11 : Comparaison films ITO et AgHT

### Antenne multicouche en IZTO/Ag/IZTO

Un autre exemple d'antenne monopole ultra large bande, à métallisation double face, transparente et flexible, fabriquée à partir du multicouche IZTO/Ag/IZTO (IZTO = oxyde d'indium dopé étain et zinc) [90] a été développée par Hong et al. (figure 1-33).

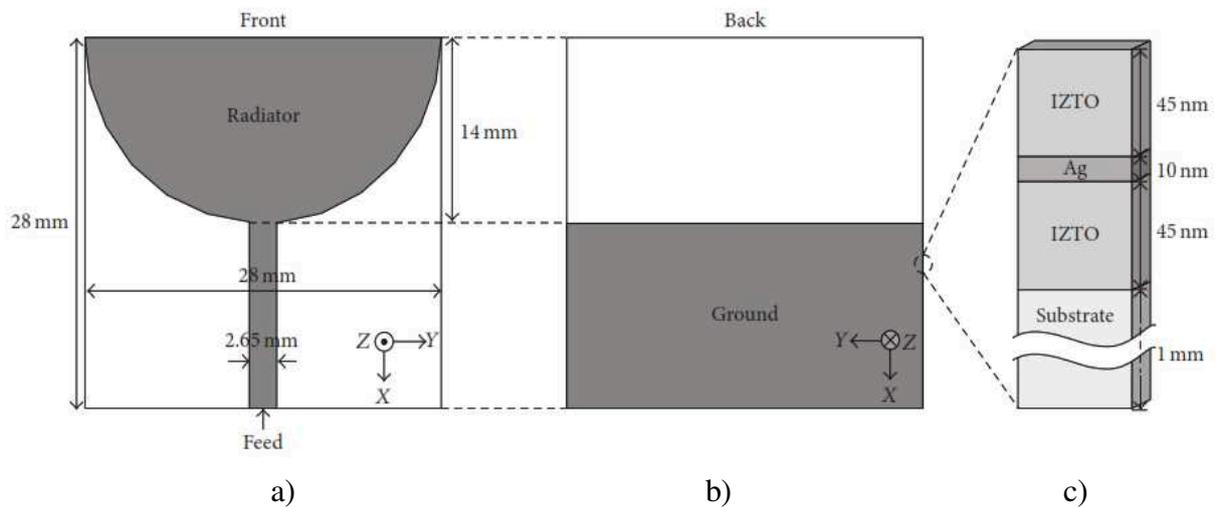


Figure 1-33 : Structure et dimensions de l'antenne (a) Vue de face. (b) Vue arrière. (c) Structure du film et du substrat d'électrode multicouche IZTO/Ag/IZTO



Figure 1-34 : Antenne ultra large bande en multicouche IZTO/Ag/IZTO [90]

Une transparence optique de 86% avec une résistance par carré de  $5 \Omega/\text{sq}$  sont obtenues, soit un facteur de mérite de 481. Un gain de 0,7 dBi a été mesuré à 6,5 GHz, contre 4,17dBi pour l'antenne opaque équivalente en cuivre.

#### 1.3.4. Antenne en graphène

La référence [91] présente une antenne patch microruban optiquement transparente maillée, alimentée par couplage, fonctionnant aux fréquences TéraHertz (figure 1-35). Ses dimensions sont 1,36 x 0,102 mm. Le motif de maillage est rectangulaire sur substrat en polyimide de 0,015 mm d'épaisseur et de constante diélectrique 3,25.

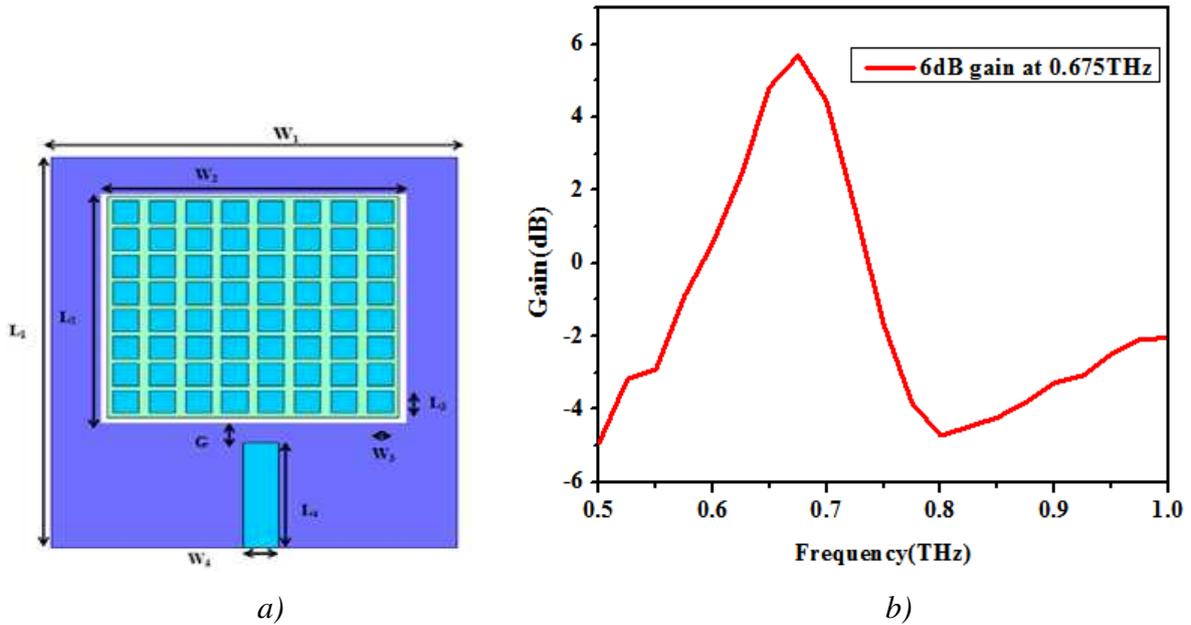


Figure 1-35 : a) Antenne patch maillée b) Variation du gain en fonction de la fréquence

La transparence optique de ce type de structures atteint 97 %. La conception proposée a permis d'obtenir une efficacité de rayonnement et un gain de 75 % et 6 dB respectivement à 0,675 THz.

Dans [92], les auteurs ont fait l'analyse de deux antennes patch optiquement transparentes à base de graphène et, pour l'une, recouverte par des nanotubes de carbone à parois multiples (Multi Walled Carbon NanoTube MWCNT). Le graphène optiquement transparent est utilisé comme patch et plan de masse des antennes, qui sont séparées par un substrat en polyimide flexible de  $2,5 \mu\text{m}$  d'épaisseur. (figure 1-36). Leurs caractéristiques de rayonnement sont analysées dans la bande 5,66-6,43 THz.

Les dimensions (longueur et largeur) du patch rayonnant sont  $10,71 \mu\text{m} \times 14,87 \mu\text{m}$  sur un substrat de mêmes dimensions que le plan de masse ( $27,9 \mu\text{m} \times 66,67 \mu\text{m}$ ).

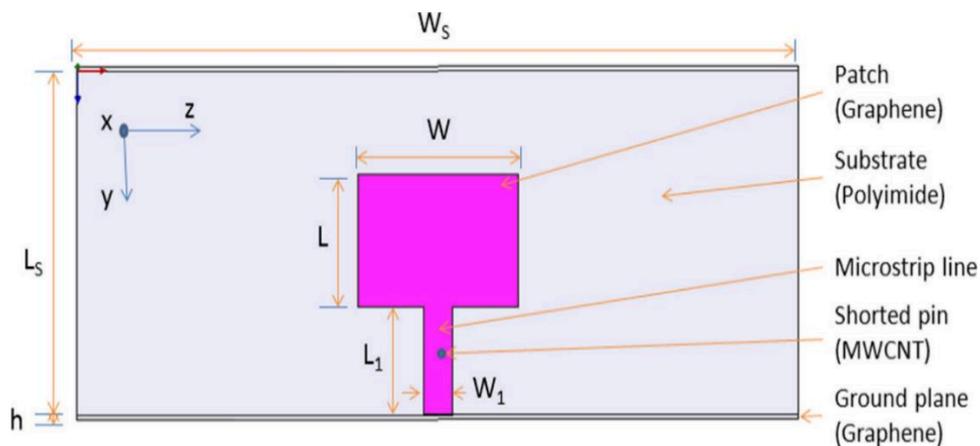


Figure 1-36 : Antenne patch microruban optiquement transparente à base de graphène

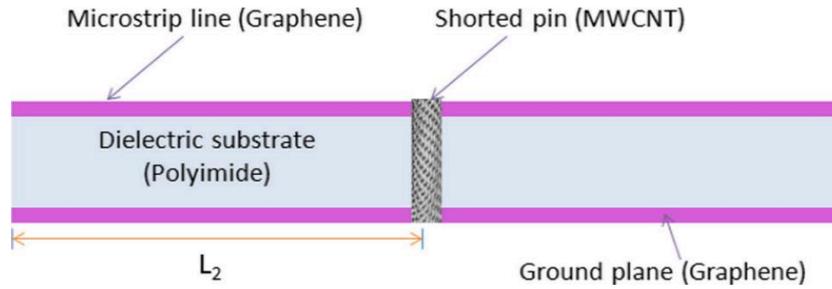


Figure 1-37 : Vue en coupe transversale d'une antenne patch microruban transparente à base de graphène chargée MWCNT

Des gains de 3,3 dBi et 3,22 dBi sont obtenus pour l'antenne sans MWCNT et pour l'antenne avec MWCNT respectivement à 6,2 THz. Plus globalement, un gain de plus de 2,8 dB est atteint dans la bande 5,66-6,43 THz. L'efficacité de rayonnement de l'antenne transparente proposée est inférieure à celle de l'antenne non transparente car le graphène transparent a une résistance par carré élevée par rapport au graphène non transparent.

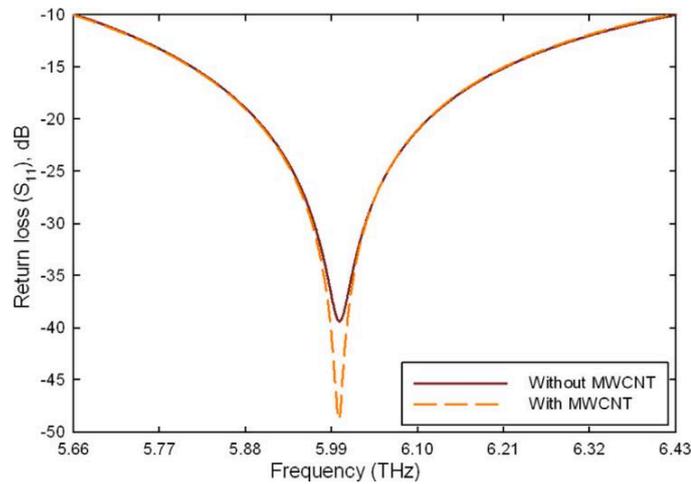


Figure 1-38 : Coefficient de réflexion ( $S_{11}$ ) pour les antennes transparentes à base de graphène avec et sans MWCNT

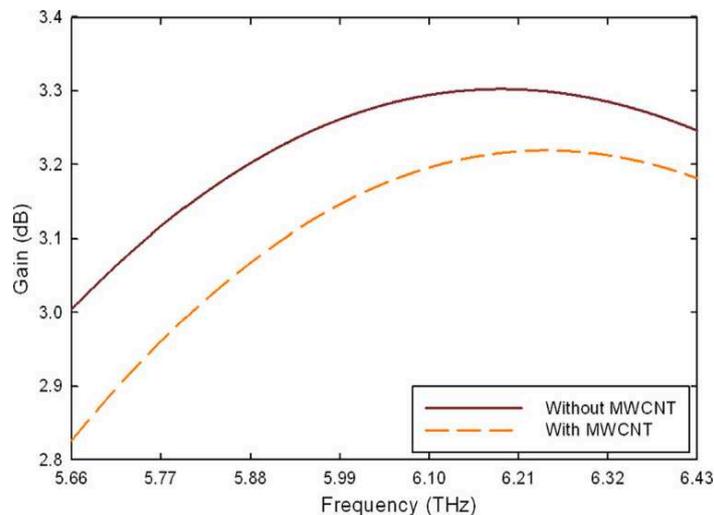


Figure 1-39 : Gain (dB) des antennes transparentes à base de graphène avec et sans MWCNT

L'antenne à base de graphène chargée MWCNT permet donc une amélioration du coefficient de réflexion de 9 dB par rapport à celle sans l'antenne chargée MWCNT. Les deux antennes transparentes ont une large bande passante de l'ordre de 12,8 %, une directivité élevée (7,56 dB) et un gain élevé (> 2 dB). Les valeurs de la résistance par carré et de transparence optique n'ont pas été fournies par les auteurs.

### 1.3.5. Antenne à base de nanofils conducteurs

Rakib Hasan et al [93] ont présenté une antenne monopole optiquement transparente conçue à partir d'un conducteur hybride de nanofils d'argent et de nanotubes de carbone (CNT) (figure 1-40 a)). La transparence de l'antenne est de 89,3 %, la résistance par carré de 13  $\Omega$ /sq et elle fonctionne à 2,9 GHz. Le gain de l'antenne transparente a été mesuré et est à environ -6,5 dB de moins que l'antenne de référence en cuivre d'épaisseur 0,11 mm. Les diagrammes de rayonnement simulés de l'antenne de référence et de l'antenne hybride sont représentés sur la figure 1-40 b).

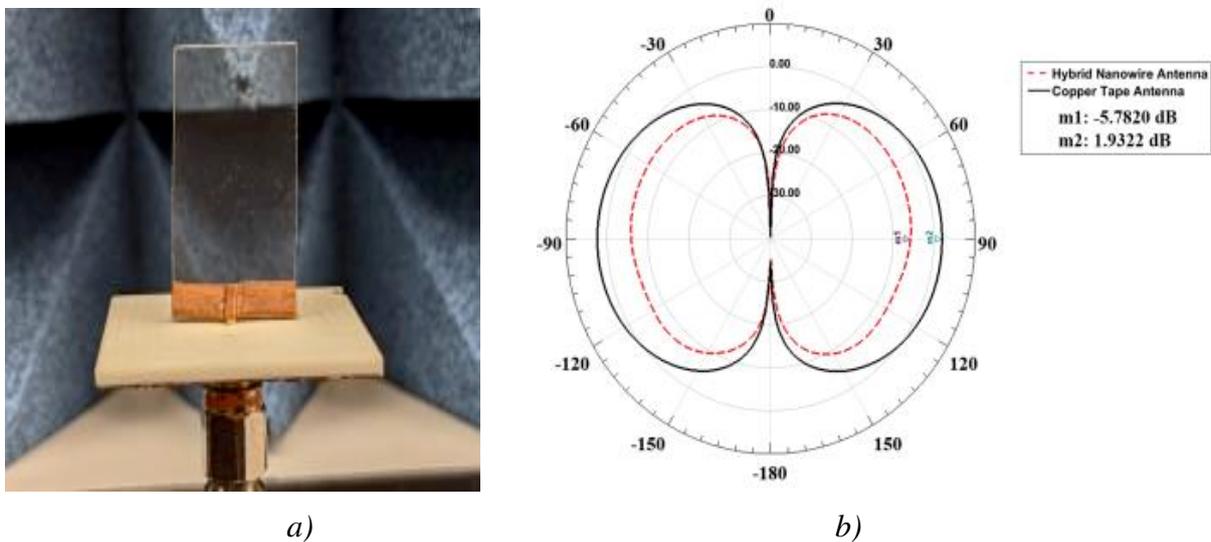


Figure 1-40 : a) Antenne hybride argent-CNT b) Diagramme de rayonnement de l'antenne transparente et de l'antenne de référence en Cuivre [93]

| Longueur | Largeur  | Hauteur du ruban de cuivre | Longueur du plan de masse | Largeur du plan de masse | Épaisseur du plan de masse | Épaisseur du revêtement |
|----------|----------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 24,87 mm | 15,44 mm | 3,0 mm                     | 34,31 mm                  | 32,73 mm                 | 1.78 mm                    | 20 nm                   |

Tableau 1-12 : Géométrie et informations sur les matériaux

Par ailleurs, grâce à la flexibilité des nanofils conducteurs, une antenne à faible impact visuel en nanofils d'argent (AgNW), flexible, fonctionnant à 2,3GHz, a été réalisée (figure 1-41) [94]. Le film de nanofils d'argent d'épaisseur est déposé sur du substrat Polydiméthylsiloxane (PDMS) de dimensions 16mm x 20mm x 0,2 $\mu$ m. Le plan de masse est une feuille de cuivre aux dimensions de 100mm x 80mm. Une transparence optique de 85% et une résistance par carré de 12  $\Omega$ /sq sont obtenues.



Figure 1-41 : Antenne transparente flexible en AgNWs

Les antennes réalisées à partir des technologies présentées ci-dessus ne peuvent donc prétendre à des performances en hyperfréquences similaires à celles d'antennes métalliques opaques de référence. Pour s'en rapprocher, il faudra réduire la résistance par carré de ces matériaux.

### 1.3.6. Antennes en technologie de métal maillé

Une feuille de conducteur maillé est un matériau très économique pour concevoir des antennes à faible impact visuel [89]. Cependant, par rapport à ses homologues opaques, elle présente une résistance par carré plus élevée en raison d'une couverture de conducteur moins importante. Par conséquent, il est normal d'avoir des antennes à performances électromagnétiques inférieures pour une transparence optique accrue. Il est montré dans [95] que, pour une antenne patch à mailles rectangulaires, en optimisant le compromis ouverture/métallisation de la maille, l'efficacité de rayonnement de l'antenne peut être améliorée pour être comparable à celle d'un patch opaque.

#### 1.3.6.1. Grillage épais

La référence [96] propose une étude des propriétés de rayonnement des antennes « transparentes » constituées de conducteurs maillés. En fixant les dimensions du patch, le maillage est modifié de façon à connaître l'influence de la transparence et des largeurs de grille (largeur des métallisations) sur les performances de l'antenne. Par exemple, sur la figure 1-43, une antenne opaque présente un gain de 7,7 dB, et un patch maillé de mêmes dimensions avec une transparence de 60% a un gain de 6,3 dB, avec un maillage de largeur 1 mm. En gardant la transparence à 60% et en affinant le maillage tel qu'il ait une largeur de grille de 0,5 mm, alors le gain peut être augmenté jusqu'à environ 7,1 dB.

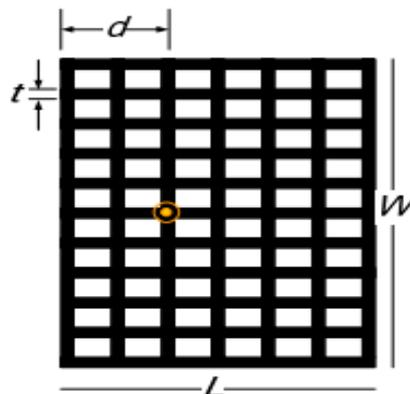
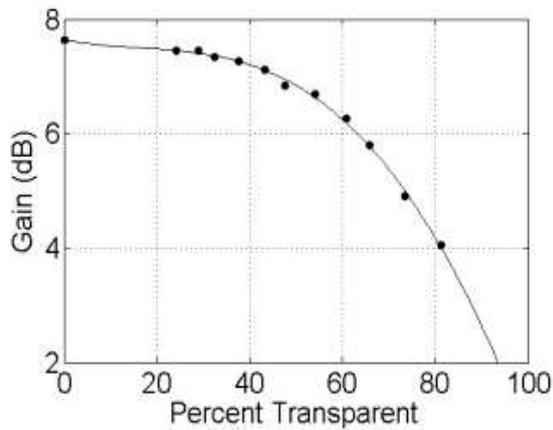
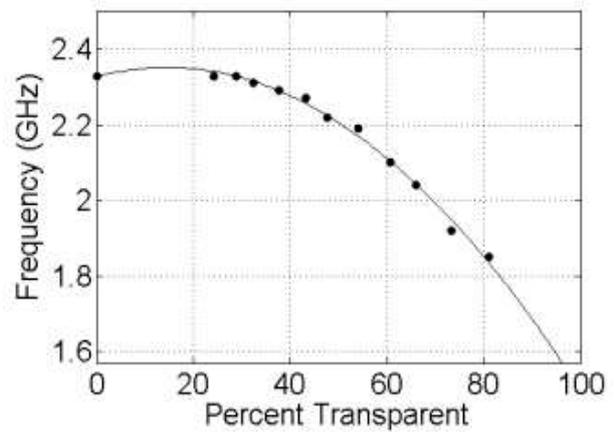


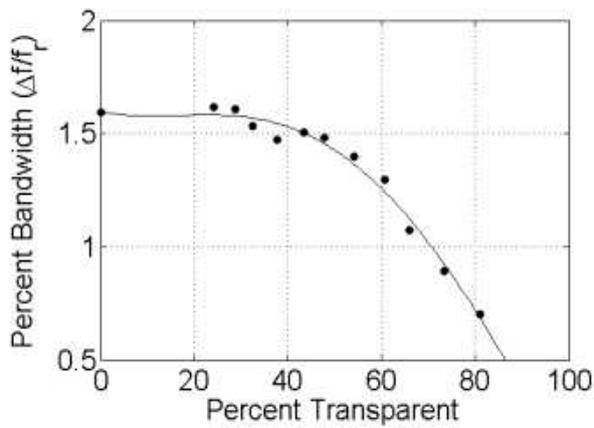
Figure 1-42 : Géométrie d'un patch maillé [96]



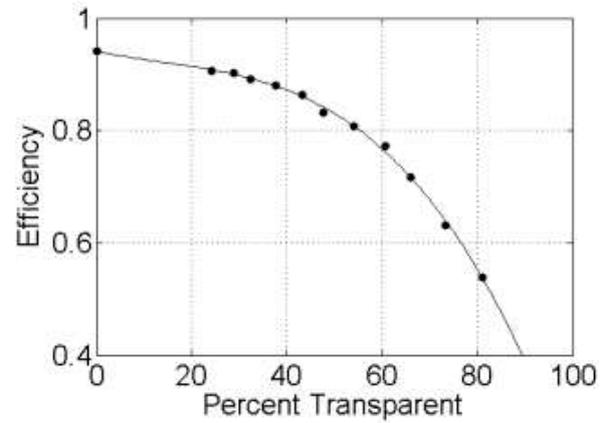
a)



b)



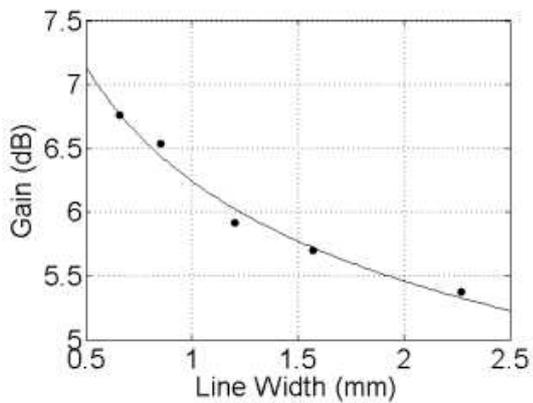
c)



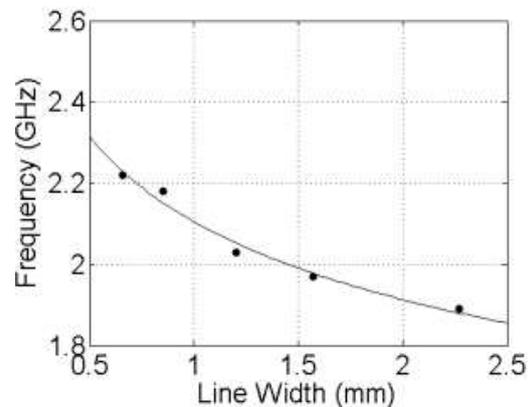
d)

Figure 1-43 : Effet de la transparence sur a) le gain, b) la fréquence de résonance, c) la bande passante, d) l'efficacité [96]

Le gain, la bande passante, l'efficacité et la fréquence de résonance de l'antenne diminuent à mesure que la transparence augmente (Figure 1-43). Ces performances de l'antenne sont améliorées par diminution de la largeur de la grille (figure 1-44).



a)



b)

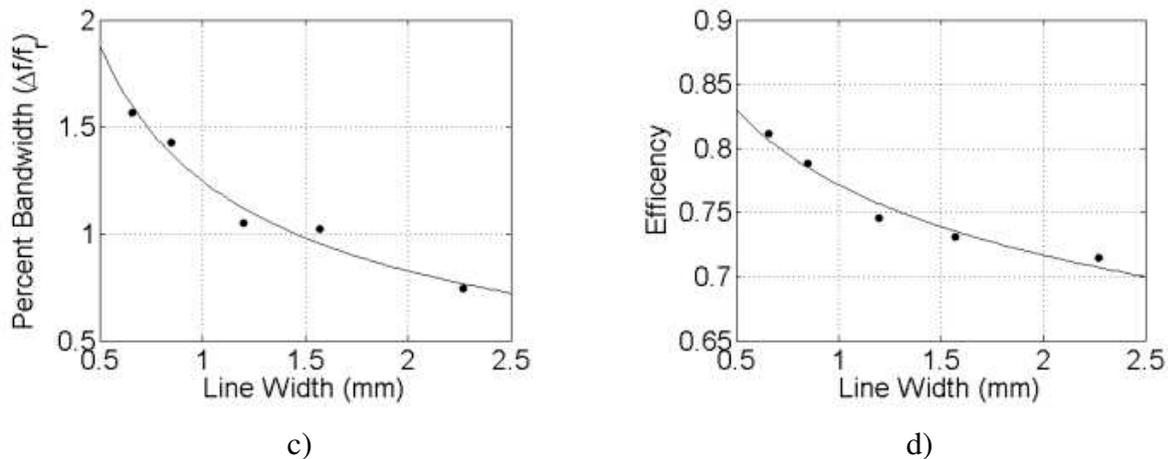


Figure 1-44 : Effet de la largeur de grille de métallisation sur a) le gain, b) la fréquence de résonance, c) la bande passante, d) l'efficacité [96]

Des réalisations ont été effectués par S. H. Kang et C. W. Jung afin d'étudier les caractéristiques de rayonnement de ce type d'antenne [97] dans la bande WLAN 2,4-2,5 GHz (802.11b). Le matériau conducteur est du cuivre de 20 $\mu$ m d'épaisseur déposé sur un substrat en acrylique transparent ( $\epsilon_r=2,62$  et  $\tan \delta=0,01$ ) de dimensions 50 x 50 mm et d'épaisseur 1,2 mm (figures 1-45).

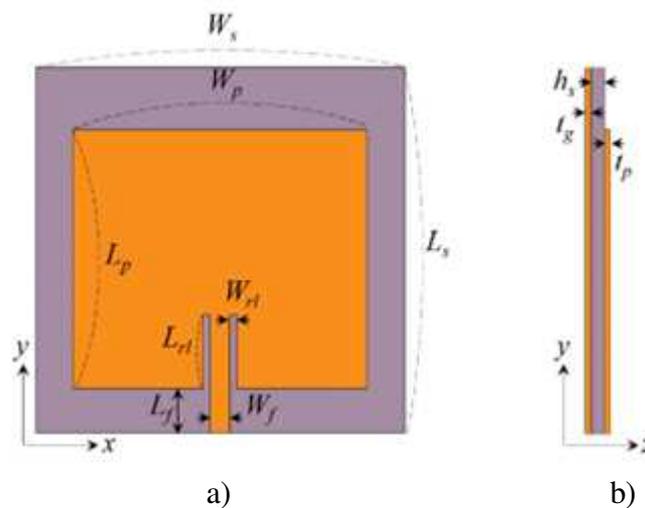


Figure 1-45 : Structure de l'antenne patch a) Vue de dessus b) Vue latérale

D'après les résultats (tableau 1-13), à l'inverse de la transmittance, le gain de l'antenne 2 est plus élevé que celui de l'antenne 1.

|                                  | Antenne 1 | Antenne 2 |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| Largeur cellule ( $\mu$ m)       | 2000      | 1000      |
| Largeur métallisation ( $\mu$ m) | 200       | 200       |
| Transparence (%)                 | 82,64     | 69,44     |
| Gain(dBi)                        | 4,14      | 4,90      |

Tableau 1-13 : Résultats de mesure des antennes WMM fabriquées

Les performances électromagnétiques des antennes diminuent donc avec l'augmentation de la transparence optique, ce qui confirme l'analyse précédente.

### 1.3.6.2. Maillage à pas micrométrique

Le maillage à pas micrométrique est un grillage avec des largeurs de mailles fines et des pas de grillages très réduits (de l'ordre de cinq à dix fois moins que précédemment) de telle sorte qu'on ne puisse pas identifier les mailles à l'œil nu à la distance d'observation minimale.

Une antenne imprimée sur substrat de verre a été réalisée avec cette technologie par Xavier Castel et al. [1] et comparée aux performances d'antennes monopôles équivalentes présentée à partir de la sections 1.3.1. à 1.3.5. Un pas de maillage de  $300\ \mu\text{m}$  et une largeur de métallisation de  $20\ \mu\text{m}$  ont été sélectionnés pour atteindre un niveau élevé de transparence optique (supérieur à 80%).

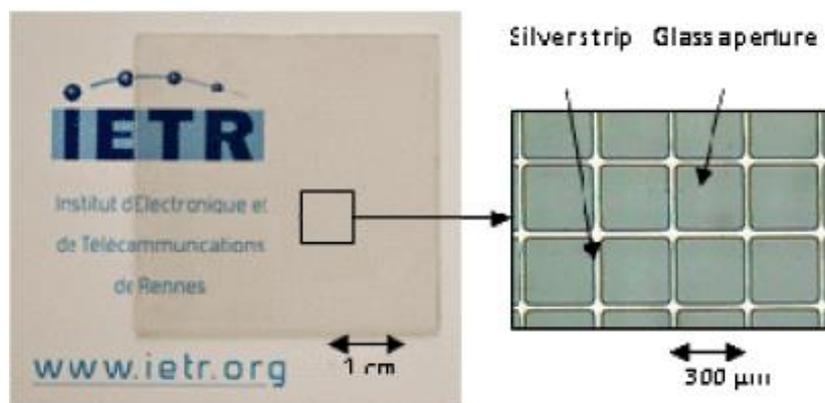
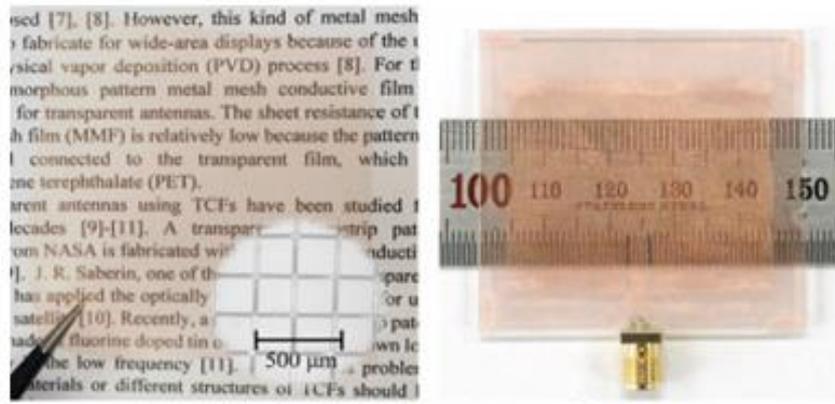


Figure 1-46: Photos du maillage de  $6\ \mu\text{m}$  d'épaisseur d'argent

L'antenne monopôle en argent à mailles micrométriques présente les meilleures caractéristiques : un haut niveau de transparence optique (supérieur à 80%) couplé à une résistance carrée aussi faible que  $0,054\ \Omega/\text{sq}$  avec un gain égal à 2,24 dBi à 850 MHz, très proche de celui de l'homologue de référence et opaque (2,29 dBi) constitué d'une couche continue d'argent.

Dans la référence [97], un maillage à pas micrométrique a été réalisé avec une grille de  $30\ \mu\text{m}$  et un gap entre les grilles de  $224\ \mu\text{m}$  (figures 1-48).



a)

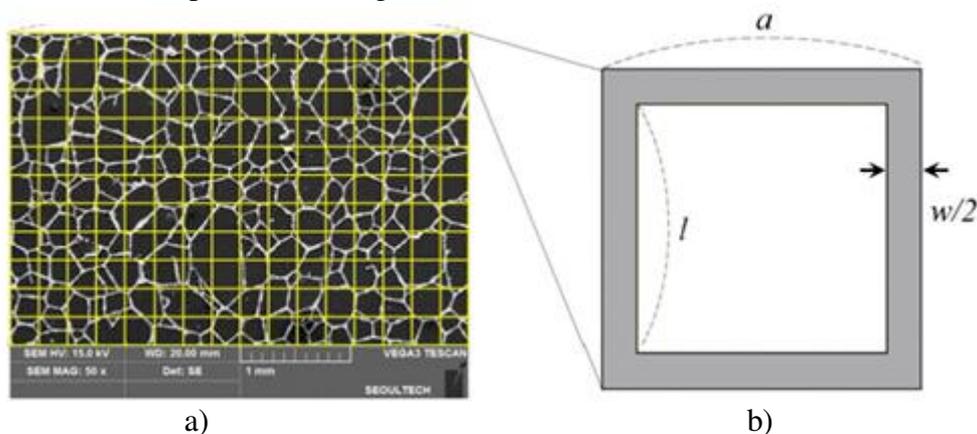
b)

Figure 1-47 : Photographies a)  $l = 224\mu\text{m}$  et  $w = 30\mu\text{m}$  maillage métallique b) Antenne transparente

Les performances optiques offrent une transparence de 77,77 % et un gain de 4,38 dBi.

### 1.3.6.3. Antenne en technologie micromaillage métallique

Enfin, une antenne dont les métallisations ont été réalisées à base de micro métaux est proposée par les mêmes auteurs S. H. Kang et C. W. Jung [97]. La structure de maillage irrégulier a été assimilée à un maillage régulier de longueur  $l$  et largeur  $w$  (figure 1-49). Ses performances ont été comparées à celles d'une antenne au maillage à pas micrométrique présenté dans la section précédente (Figure 1-50).



a)

b)

Figure 1-48 : Processus de modification de micro maillage. a) Maille b) Cellule unitaire d'un maillage régulier

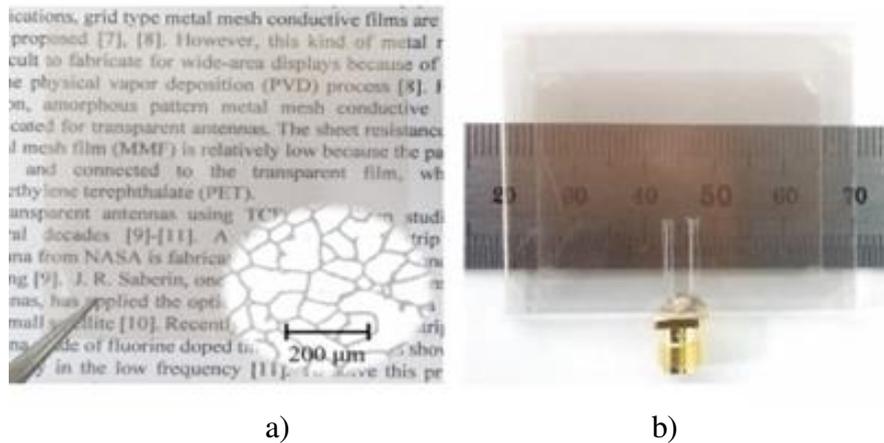


Figure 1-49 : Photographies a) micro maillage métallique b) Antenne transparente

Les résultats de mesure sont les suivants :

|           | Antenne en maillage à pas micrométrique | Antenne en micromaillage métallique |
|-----------|---|-------------------------------------|
| l(μm)     | 224                                     | 241                                 |
| w(μm)     | 30                                      | 20                                  |
| T(%)      | 77,77                                   | 68,83                               |
| fr(GHz)   | 2,49                                    | 2,44                                |
| Gain(dBi) | 4,38                                    | 5,38                                |

Tableau 1-14 : Résultat de mesure des antennes

L'antenne en technologie micromaillage métallique présente un gain plus élevé par rapport à l'antenne maillée à pas micrométrique mais sa transparence optique reste moins bonne.

Les antennes maillées offrent de bonnes performances par rapport aux antennes précédemment décrites excepté la technologie du grillage épais, mais leur réalisation semble être difficile. Ces résultats confirment la conclusion de l'état de l'art sur les matériaux conducteurs transparents.

### 1.3.7. Conclusion sur les antennes à faible impact visuel

En résumé, les antennes maillées offrent de bonnes performances par rapport aux antennes fabriquées à partir de films conducteurs transparents. En effet, elles présentent le meilleur compromis entre résistance par carré et transparence optique par conséquent le meilleur facteur de mérite. Même à 90 % de transparence, il est possible de concevoir une antenne patch maillée avec une efficacité supérieure à 50 % alors que les antennes conçues à partir de films ITO ou AgHT ne présentent qu'un rendement inférieur à 40 % pour une transparence supérieure à 70 %. Ensuite, pour la même transparence, une antenne ITO peut être rendue plus efficace qu'une antenne conçue à partir d'un film AgHT.

## 1.4. Bilan

Dans ce chapitre, nous avons réalisé un état de l'art sur les différentes technologies permettant de synthétiser des solutions conductrices transparentes ainsi que sur les substrats diélectriques transparents disponibles. Au vu des performances mises en évidence dans la

littérature, le matériau métallique maillé a été sélectionné pour la réalisation d'antennes à faible impact visuel. En effet, sa transparence optique est élevée (supérieure à 80%), sa résistance par carré faible (inférieure à  $0,1 \Omega/\text{sq}$ ) ce qui permet une bonne conductivité électrique. Par conséquent, son facteur de mérite est supérieur à 60.000 pour le maillage à pas micrométrique et à 100.000 pour le grillage métallique.

Ensuite, différents substrats transparents ont été recensés. Les verres électroniques semblent être les meilleurs candidats pour la réalisation des systèmes hyperfréquences. Parmi ceux-ci, le choix s'est porté sur le Borofloat 33 à cause de ses performances électromagnétiques et de son faible coût. Nous avons opté pour des solutions à coût de réalisation maîtrisé par conséquent un compromis entre performances et coût a dû être cherché.

Enfin, après la présentation de plusieurs systèmes antennaires utilisant ces technologies de matériaux conducteurs transparents, des pertes importantes sont constatées avec les systèmes basés sur l'utilisation de couches minces. Au vu des performances des antennes en solutions grillagées par rapport aux autres solutions en termes d'impact visuel et de rayonnement, en tenant compte des moyens de réalisation disponibles à l'IETR site de Nantes et des coûts de réalisation, nous nous positionnons donc, dans ces travaux, sur la réalisation d'antennes transparentes et discrètes utilisant un conducteur maillé à faible impact visuel déposé sur du verre Borofloat 33 du fabricant allemand Schott.

# Chapitre 2

## Techniques de caractérisation diélectrique des substrats et caractérisation du substrat utilisé

Dans ce chapitre, les principales techniques de caractérisation diélectrique largement utilisées sont présentées. Ensuite un choix est fait parmi ces techniques afin d'identifier celle(s) qui sont la (les) mieux adaptée(s) pour réaliser la mesure des paramètres diélectriques du verre Borofloat 33 que nous avons choisi comme substrat pour la réalisation d'antennes à faible impact visuel en technologie microruban.

Le choix des techniques de caractérisation dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- La bande de fréquence considérée ;
- La précision de mesure requise ;
- La facilité de mise en œuvre expérimentale de la structure de mesure, en particulier :
  - ✓ La facilité d'usinage d'échantillons (formes, dimensions) et le coût du montage technique ;
  - ✓ La nature des matériaux à tester (homogénéité, liquide, solide...) ;
- La disponibilité des équipements nécessaires à la caractérisation.

### 2.1. Techniques de caractérisation diélectrique des substrats

Un matériau qui a la capacité de stocker de l'énergie lorsqu'un champ électrique externe est appliqué, peut être classé comme « diélectrique ».

Pour concevoir une antenne imprimée, il est essentiel de bien connaître les propriétés des matériaux diélectriques, en particulier la constante diélectrique  $\epsilon_r'$  et la tangente de perte  $\tan\delta$  du substrat support sur la bande de fréquence d'intérêt. Les valeurs de ces paramètres permettront de dimensionner le système antennaire et ainsi de connaître ses performances en rayonnement.

La permittivité diélectrique complexe  $\epsilon^*$  est donnée par :

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon'(\omega) - j\epsilon''(\omega) \quad (2-1)$$

Elle détermine la réponse d'un matériau à un champ électrique.

$\omega = 2\pi f$  est la pulsation du champ électrique et  $f$ , la fréquence.

La partie réelle  $\epsilon'(\omega)$ , appelée permittivité diélectrique, représente le stockage du champ électrique, et la partie imaginaire  $\epsilon''(\omega)$ , appelée facteur de perte, représente la quantité d'énergie dissipée.

Pour un diélectrique, les pertes sont exprimées au travers de la tangente de l'angle de perte  $[\theta]$  du matériau :

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2-2)$$

La permittivité relative s'exprime comme :

$$\varepsilon_r'(\omega) = \frac{\varepsilon'(\omega)}{\varepsilon_0} \quad (2-3)$$

avec  $\varepsilon_0 = 8,8541 \times 10^{-12} F.m^{-1}$

Il existe toujours une incertitude sur l'extraction des paramètres lors de la caractérisation des matériaux car elle s'appuie sur des mesures, chaque technique a ses avantages et ses limitations dépendant de la bande de fréquence, des matériels et techniques de mesure mis en œuvre etc...[98]. Les propriétés diélectriques sont intrinsèques au matériau (c'est-à-dire indépendantes de la méthode de mesure) et peuvent donc être mesurées de différentes manières. Les méthodes de caractérisation diélectrique des matériaux en hautes fréquences peuvent être classées en deux catégories : les méthodes non résonantes et les méthodes résonantes. Elles permettent de caractériser le matériau par la mesure des coefficients de réflexion et de transmission.

Les méthodes non résonantes sont utilisées pour connaître les propriétés électromagnétiques sur une bande de fréquence plus ou moins large [99]. Les méthodes résonantes fournissent les propriétés diélectriques à une seule fréquence ou à des fréquences discrètes multiples d'une fréquence « fondamentale » Dans ce cas, le matériau diélectrique est intégré dans une structure résonante mais l'usage de ces méthodes reste limité uniquement aux échantillons à faibles pertes. Elles offrent un meilleur compromis sur la bande de fréquence d'intérêt que les méthodes non-résonantes [100].

### **2.1.1. Méthodes non résonantes**

Pour les méthodes non résonantes, les propriétés des matériaux sont déduites de leur impédance d'onde et de leur vitesse de propagation. Lorsqu'une onde électromagnétique se propage d'un matériau à un autre, l'impédance et la vitesse de l'onde changent, ce qui entraîne une réflexion partielle de l'onde aux interfaces entre les deux matériaux [2]. Les mesures des coefficients de réflexion et de transmission à travers celles-ci peuvent fournir des informations permettant de déduire l'expression de la permittivité et de la tangente de pertes d'un des matériaux mis en jeu connaissant l'autre.

#### **2.1.1.1. La méthode par capacité plan métal-isolant-métal (MIM)**

##### **En Basse Fréquence (MIM-BF)**

Utilisée pour la caractérisation des matériaux à basse fréquence (inférieure à 1GHz), la méthode du condensateur à plaques parallèles consiste à mettre en sandwich le matériau diélectrique à caractériser (échantillon planaire de forme circulaire ou rectangulaire) entre deux électrodes pour former un condensateur (Figure 2-1) [101].

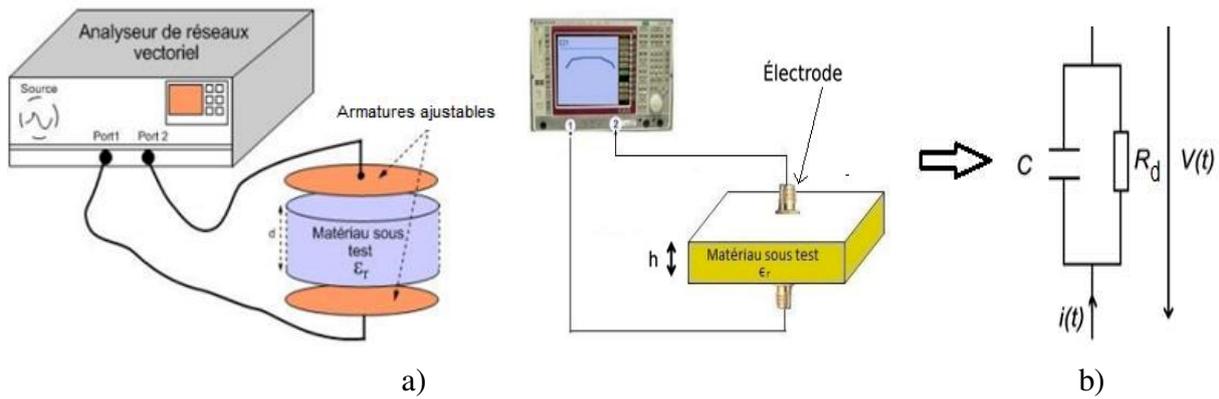


Figure 2-1 : a) Montages de mesure et b) Schéma électrique équivalent d'une capacité métal-isolant-métal (MIM)

Pour estimer la constante diélectrique, on utilise la mesure de la valeur de capacité. Cette méthode a une grande précision de mesure (environ  $\pm 1\%$  pour  $\epsilon_r'$  et  $5\% \pm 0,005$  pour  $\tan \delta$ ) et implique une préparation et une configuration très simples des échantillons, généralement dans une gamme de fréquences allant de 20 Hz à 1 GHz [101]. Cependant, l'entrefer et ses effets peuvent provoquer des erreurs significatives s'ils ne sont pas pris en compte.

La permittivité relative  $\epsilon_r'$  du diélectrique entre les deux électrodes métalliques circulaires est alors donnée par [102] :

$$\epsilon_r' = \frac{C \cdot h}{S \cdot \epsilon_0} \quad (2-4)$$

C : valeur de la capacité mesurée, S : surface des électrodes et h : épaisseur du substrat à caractériser entre les deux électrodes. La précision de la mesure de la permittivité relative est donc dépendante des incertitudes dimensionnelles du condensateur.

La mesure du déphasage  $\theta$  entre la tension alternative  $v(t)$  appliquée au condensateur et le courant de sortie mesuré  $i(t)$  permet de déterminer les pertes diélectriques du matériau telles que [102] :

$$\tan \delta = \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)} = \frac{1}{R_d C \omega} \quad (2-5)$$

### En Haute fréquence (MIM-HF)

C'est le même principe de mesure qu'en basse fréquence. Cette méthode consiste à réaliser de part et d'autre du diélectrique, par photolithographie, des électrodes afin de délimiter la capacité MIM (ou une électrode et un plan de masse en vis-à-vis).

Comme dans l'exemple proposé (Figure 2-2), l'obtention du coefficient de réflexion  $S_{11}$  en entrée de l'échantillon avec un analyseur de réseau permet de définir l'impédance d'entrée complexe  $Z_{DUT}$  (DUT : Device Under Test) de la capacité MIM.

$$Z_{DUT} = Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}} \quad (2-6)$$

$Z_0 = 50 \Omega$  est l'impédance d'entrée du VNA (Vector Network Analyzer).

Il est alors possible de définir un modèle équivalent, ici composé de deux capacités en série  $C_1$  (capacité entre l'électrode circulaire et le plan de masse inférieur) et  $C_2$  (capacité entre le plan de masse inférieur et le plan de masse supérieur).

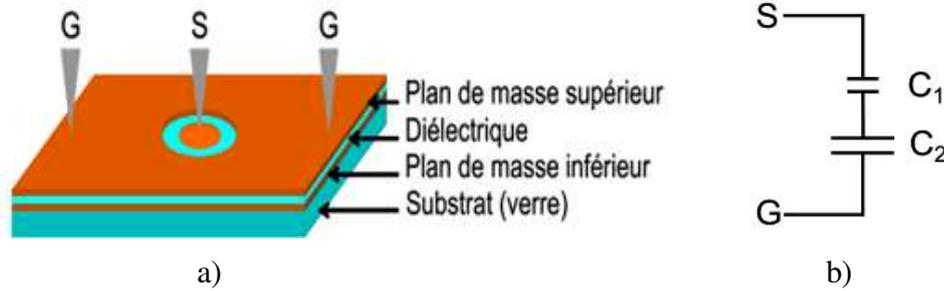


Figure 2-2 : a) Exemple de schéma en 3D de structure MIM b) Schéma électrique équivalent

Ainsi, comme en basse fréquence, l'extraction de la permittivité relative est dépendante des dimensions géométriques.

$$C \approx C_1 = \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{i\omega Z_{DUT}} \right] = \varepsilon'_r \varepsilon_0 \frac{S}{h} \quad (2-7)$$

$$\tan\delta = \frac{-\operatorname{Im} \left[ \frac{1}{i\omega Z_{DUT}} \right]}{\operatorname{Re} \left[ \frac{1}{i\omega Z_{DUT}} \right]} = \frac{-\operatorname{Re}[Z_{DUT}]}{\operatorname{Im}[Z_{DUT}]} \quad (2-8)$$

L'erreur dans cette mesure peut provenir d'une erreur d'étalonnage et d'une erreur de référence de phase de l'appareil de mesure. Une erreur sur la mesure du coefficient de réflexion se traduit par une erreur sur l'impédance totale de la structure testée qui détermine l'erreur sur la capacité et la tangente de perte. Elle peut être minimisée en effectuant un calibrage minutieux. La relation entre l'erreur sur la valeur de capacité et l'erreur de phase de l'instrument est [103] :

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{-2\Delta S_{11}}{(1-S_{11}^2)} = \frac{-2i.r.e^{i\Phi}\Delta\Phi}{(1-r^2e^{2i\Phi})} \quad (2-9)$$

$$\text{Avec } S_{11} = re^{i\Phi}$$

### 2.1.1.2. Méthode de la ligne de transmission / réflexion

La méthode de la ligne de transmission / réflexion est une méthode de mesure large bande, par exemple de 10 MHz à plus de 100 GHz [98], dans laquelle seul le mode fondamental est supposé se propager [104].

La mesure implique de placer un échantillon du diélectrique à caractériser dans une section de ligne de guide d'onde ou de ligne coaxiale et de mesurer les paramètres S aux deux accès avec un analyseur de réseau vectoriel. Le procédé comprend la mesure du signal réfléchi ( $S_{11}$  ou  $S_{22}$ ) et transmis ( $S_{21}$  ou  $S_{12}$ ). Les paramètres de diffusion sont étroitement liés à la permittivité complexe et à la perméabilité du matériau. Dans de nombreux cas, la méthode nécessite une préparation des échantillons de telle sorte que ceux-ci s'intègrent parfaitement à la structure. Pour une mesure diélectrique précise, le champ électrique doit être maximal dans l'échantillon.

Avantages de la méthode de la ligne de transmission / réflexion [105] :

- Elle peut être utilisée pour déterminer à la fois la permittivité et la perméabilité du matériau testé.
- Les lignes coaxiales et guides d'ondes sont couramment utilisés pour mesurer les échantillons à fortes pertes et à pertes moyennes
- Elle est adaptée à une analyse large bande avec une précision acceptable.

Inconvénients de la méthode de la ligne de transmission / réflexion :

- La précision des mesures est limitée par les gaps d'air (entrefer)
- La préparation des échantillons est relativement difficile [106]

### Méthode de la ligne de transmission par câble coaxial

La figure 2-3 illustre la configuration typique de mesure avec un câble coaxial.

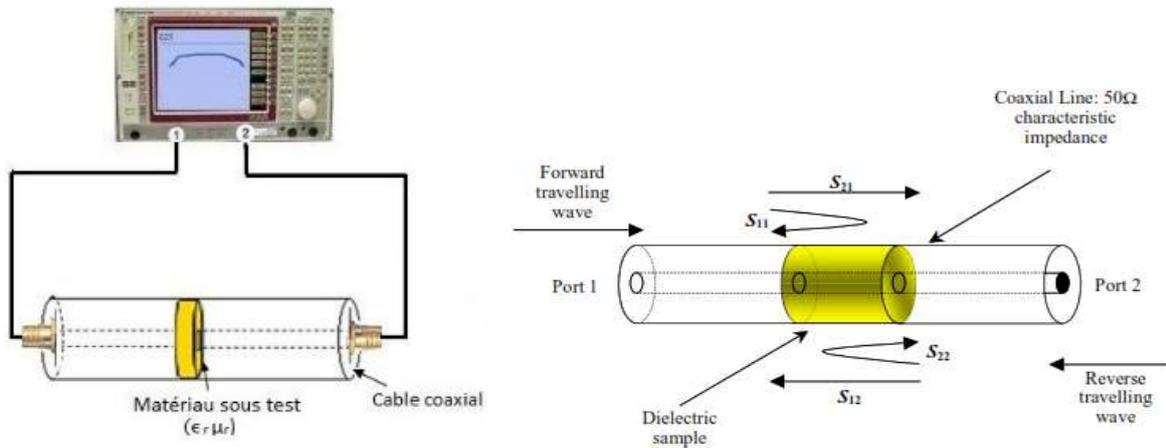


Figure 2-3 : Extraction des paramètres diélectriques d'un échantillon diélectrique dans une ligne de transmission coaxiale, à partir de la mesure des paramètres S [107]

La constante de propagation complexe  $\gamma$  est liée au coefficient d'atténuation  $\alpha$  et à la constante de propagation  $\beta$  par la relation :

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2-10)$$

Pour un matériau diélectrique, la constante de propagation d'une onde dans une ligne de transmission est liée à la permittivité complexe du matériau de remplissage par le biais de la relation [100] :

$$\gamma = j\sqrt{\frac{\omega^2\mu_r\epsilon_r}{c^2} - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2} \quad (2-11)$$

À partir de cette équation, il devient possible d'extraire la permittivité complexe du matériau remplissant la ligne de transmission (en supposant  $\mu_r=1$ ).

$$\epsilon_r' = \left(\frac{c}{\omega}\right)^2 \left[ \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 + \beta^2 \right] \quad (2-12)$$

$$\varepsilon_r'' = 2\alpha\beta \left(\frac{c}{\omega}\right)^2 \quad (2-13)$$

Du fait de la simplicité de cette technique, elle a été largement adoptée et de nombreuses améliorations ont été apportées au fil des années, qui permettent d'évaluer avec un degré de précision élevé la permittivité des échantillons à pertes modérées et élevées.

### Méthode de la ligne de transmission par guide d'onde

La méthode s'applique à tous les matériaux liquides et solides mais elle couvre une plage de fréquences plus étroite que celle du coaxial qui dépend des dimensions du guide d'onde utilisé, dans une gamme de fréquence comprise entre 50 MHz et plus de 100 GHz [108]. La préparation de l'échantillon est relativement difficile car l'échantillon doit couvrir la totalité de la section du guide [101].

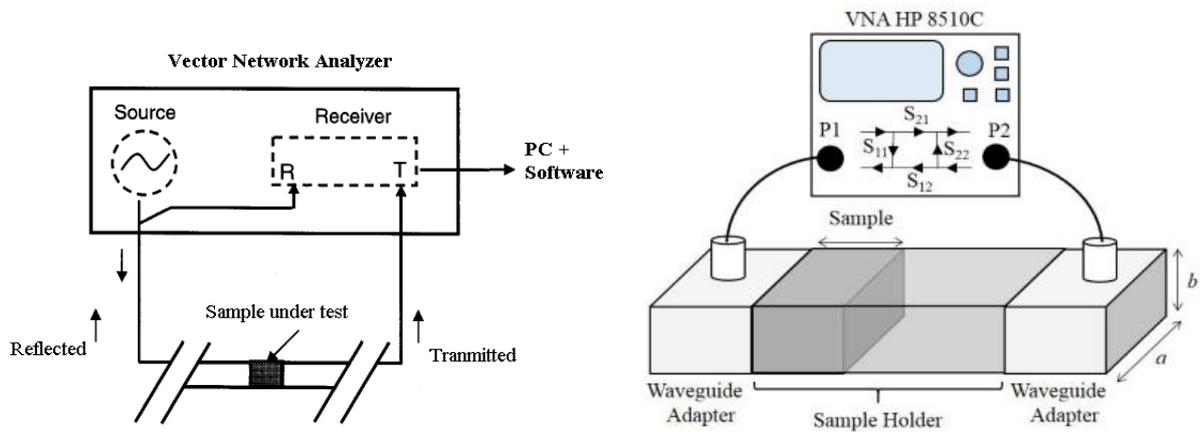


Figure 2-4 : Méthode de la ligne de transmission (guide d'ondes) [106] [99]

La propagation dans le guide n'est possible que pour une fréquence supérieure à la fréquence de coupure ( $f_c$ ) dont l'expression est donnée dans la relation suivante en fonction de la largeur  $a$  et de la hauteur  $b$  de la section du guide d'onde rectangulaire :

$$f_{c_{mn}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2b}\right)^2} \quad (2-14)$$

Où  $f_{c_{mn}}$ , la fréquence de coupure du mode désigné par un couple d'indices d'entiers relatifs  $(m,n)$ ,  $c$ , la vitesse de la lumière dans le vide et  $(\varepsilon_r, \mu_r)$ , la permittivité relative et la perméabilité magnétique relative du milieu remplissant le guide d'onde.

En supposant que seul le mode fondamental  $TE_{10}$  est supposé se propager, les dimensions du guide doivent alors être adaptées pour permettre une caractérisation sur la bande de fréquence souhaitée.

La méthode de la ligne de transmission est détaillée dans la référence [109].

#### 2.1.1.3. Méthode par sonde diélectrique (Coaxial probe)

C'est l'une des techniques les plus pratiques et les plus utilisées pour mesurer les pertes dans les matériaux à haute fréquence.

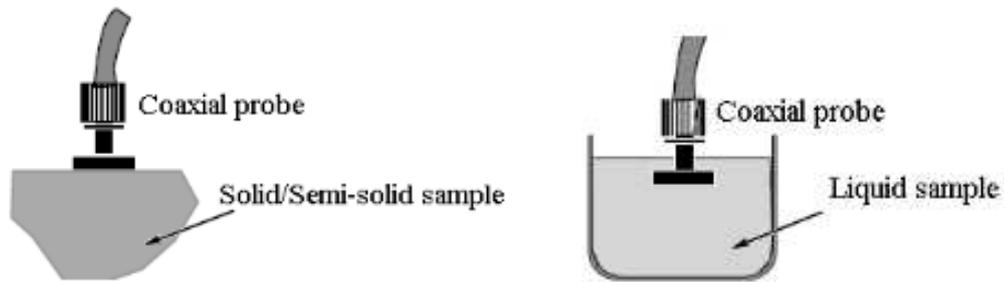


Figure 2-5 : Méthode de la sonde coaxiale [101]

La sonde coaxiale ouverte est une section coupée de la ligne de transmission. Les caractéristiques du matériau sont mesurées par toucher sur la face plate d'un matériau solide à la sonde. Les champs électromagnétiques, à l'extrémité de la sonde, pénètrent dans le matériau à tester et le signal réfléchi ( $S_{11}$ ) peut être mesuré. La permittivité complexe est calculée à partir de l'amplitude et la phase du signal réfléchi.

Elle utilise une sonde associée à un VNA qui détecte le signal réfléchi à l'interface avec le MUT (Material Under Test). C'est une méthode assez simple qui permet de réaliser des mesures diélectriques sur une large gamme de fréquences allant de 0,5 GHz à 110 GHz. Elle est idéale pour une large variété de matériaux, ainsi que pour les mesures à large bande. Globalement, sa conception est robuste et peut supporter des conditions d'utilisation variées, en particulier une large plage de températures. Mais cette méthode n'est pas bien adaptée pour les matériaux à faible permittivité.

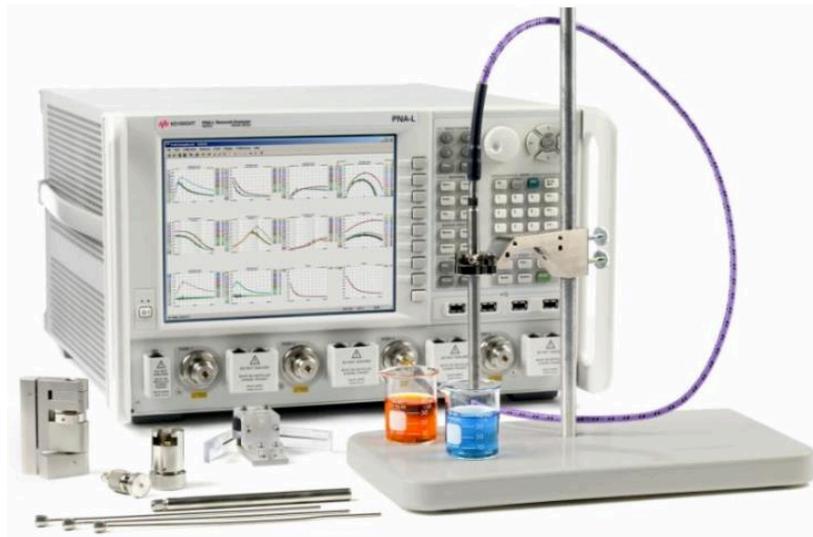


Figure 2-6 : Exemple de configuration expérimentale pour la mesure par sonde coaxiale [110]

Cette technique ne nécessite pas la manipulation de la géométrie du matériau diélectrique à tester. Le circuit équivalent de la section coaxiale ouverte, réduite à son plan, est une connexion en parallèle d'une conductance  $G$  et d'une susceptance capacitive  $B$  (Figure. 27), la quantité  $G$  représente la fraction de la puissance rayonnée dans l'espace libre tandis que  $B$  représente l'énergie du champ électrique stockée dans la section [111].

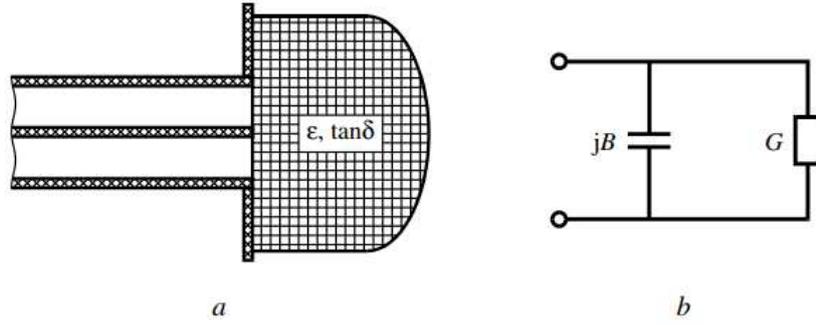


Figure 2-7 : a ) Schéma d'une sonde diélectrique à extrémité ouverte appliquée à un diélectrique solide, b) Circuit équivalent d'une sonde diélectrique [111]

Les équations ci-dessous régissent la détermination de la permittivité et de la tangente de perte pour une sonde diélectrique.

$$G = \frac{1}{\ln(a/b)} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sin\theta} [J_0(ka \sin\theta) - J_0(kb \sin\theta)]^2 d\theta \quad (2-15)$$

$$B = \frac{1}{\pi \ln(a/b)} \int_0^{\pi} \left[ 2\text{Si}(k \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos\theta}) - \text{Si}\left(2ka \sin\frac{\theta}{2}\right) - \text{Si}\left(2kb \sin\frac{\theta}{2}\right) \right] d\theta \quad (2-16)$$

où a et b sont les rayons des conducteurs extérieur et intérieur de la ligne coaxiale, en mm;  $J_0$  est la fonction de Bessel d'ordre zéro du premier type ; Si est le sinus intégral;  $k = 2\pi / \lambda$  est le nombre d'onde.

Lorsque l'échantillon diélectrique est connecté à l'ouverture de la sonde, l'admittance  $Y = G + jB$  change.

Le principe de fonctionnement implique la propagation d'une onde progressive TEM, des champs électromagnétiques sont envoyés à partir de l'extrémité ouverte dans le matériau diélectrique.

Aux fréquences relativement basses, les pertes dues au rayonnement peuvent être négligées ( $G=0$ ) et les valeurs des caractéristiques diélectriques peuvent être données sous la forme explicite suivante [111] :

$$\epsilon = \frac{2\Gamma \sin\left[2B + \frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda}\right]}{B \left\{ 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left[2B + \frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda}\right] \right\}} \quad (2-17)$$

$$\tan\delta = \frac{1 - \Gamma^2}{2\Gamma \sin\left[2B + \frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda}\right]} \quad (2-18)$$

$\Gamma$  : Module du coefficient de réflexion de la sonde avec échantillon, calculé à partir du taux d'ondes stationnaires K.

$$\Gamma = (K - 1)/(K + 1) \quad (2-19)$$

avec 
$$K = \frac{\lambda}{\pi d}$$

La position du minimum de champ dans la ligne est  $L_1$  lorsque l'échantillon n'est pas connecté et  $L_2$  lorsque l'échantillon est connecté.

*Les avantages de la méthode de mesure en sonde coaxiale sont :*

- Elle ne nécessite aucun usinage de l'échantillon, préparation de l'échantillon facile.
- Après l'étalonnage, les propriétés diélectriques d'un grand nombre d'échantillons peuvent être systématiquement mesurées en un court laps de temps.
- La mesure peut être effectuée dans un environnement à température contrôlée.

*Les inconvénients de la méthode de mesure en sonde coaxiale sont :*

- La nécessité de calibration.
- La mesure est extrêmement affectée par les gaps d'air.

#### 2.1.1.4. Méthode en espace libre

La méthode de caractérisation en espace libre (Free Space Measurement method, FSM) consiste à positionner un porte-échantillon dans lequel est placé le matériel à caractériser entre deux antennes connectées à un analyseur de réseau vectoriel (figure 2-8) [112].

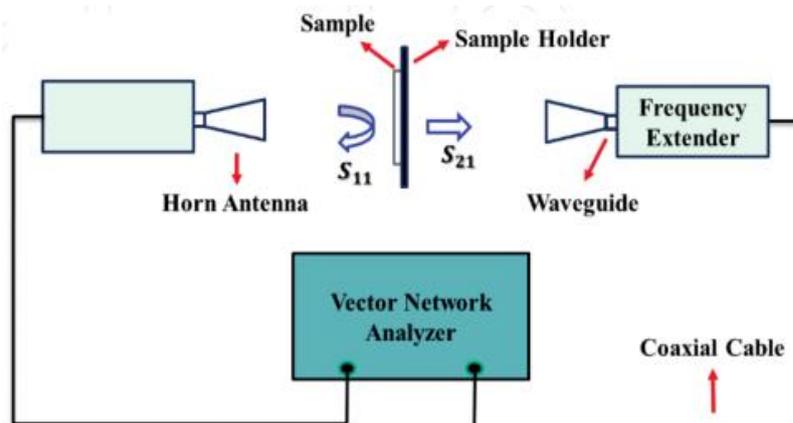


Figure 2-8 : Représentation schématique de la méthode FSM)

La méthode FSM permet de mesurer les paramètres S sans contact, de manière non destructive, à plus ou moins haute température, sur une bande de fréquences plus ou moins large et pour différentes formes d'échantillons, en particulier des matériaux non homogènes [112] [105]. Elle est applicable pour les mesures supérieures à 60 GHz et est préférable pour toutes les mesures supérieures à 75 GHz [112].

Cette méthode de détermination de la permittivité complexe en espace libre est basée sur la mesure du coefficient de transmission T à travers l'échantillon et / ou du coefficient de réflexion  $\Gamma$  à l'interface air-échantillon.  $S_{11}$  et  $S_{21}$  sont les coefficients de réflexion et de transmission mesurés en espace libre sans échantillon. En appliquant les conditions aux limites à l'interface air-échantillon (figure 2-8), les paramètres  $S_{11}$  et  $S_{21}$  sont liés à  $\Gamma$  et à T par les équations suivantes [113] :

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2T^2} \quad (2-20)$$

$$S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2T^2} \quad (2-21)$$

$\Gamma$  et  $T$  dépendent des caractéristiques du matériau, ils se déterminent par les relations ci-dessous [114] :

$$\Gamma = \frac{Z_{sn}-1}{Z_{sn}+1} = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2-22)$$

$$\text{avec } K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (2-23)$$

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} = e^{-\gamma d} \quad (2-24)$$

$Z_{sn}$  est l'impédance caractéristique normalisée  $\gamma$  est la constante de propagation ;  $d$  est l'épaisseur de l'échantillon de permittivité relative  $\epsilon_r$  et de perméabilité relative  $\mu_r$ . Soit  $\gamma_0$  la constante de propagation dans le vide et  $Z_0$  l'impédance caractéristique de la monture en absence du diélectrique.  $Z_{sn}$  et  $\gamma$  se définissent par :

$$\gamma = \gamma_0 \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2-25)$$

$$Z_{sn} = Z_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} \quad (2-26)$$

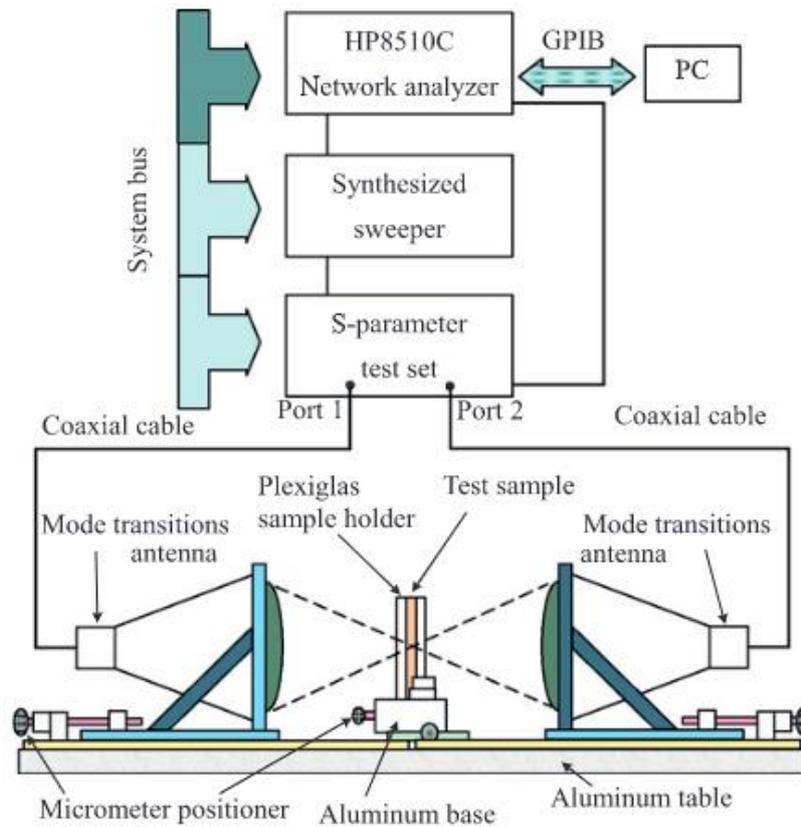
Avec  $\gamma_0 = j \frac{2\pi}{\lambda_0}$  et  $Z_0 = 120\pi$  ; On en déduit  $\epsilon_r$  et  $\mu_r$  :

$$\epsilon_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \right) = \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^2 \quad (2-27)$$

$$\mu_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right) \quad (2-28)$$

La technique de caractérisation en espace libre convient aux matériaux qui doivent rester non modifiés. Elle est utilisée pour caractériser des matériaux dans un environnement non clos (figure 2-9) [115].

La mesure nécessite que l'échantillon soit de grande taille et plat. Avant de commencer la mesure, le VNA doit d'abord être calibré.



a)



b)

Figure 2-9 : a) Configuration schématique b) et photographie du système de mesure de l'espace libre [115]

La précision des mesures dépend principalement de l'alignement précis du centre géométrique de l'échantillon cylindrique avec l'axe du banc de mesure [113]. Les effets de diffraction aux bords de l'échantillon et les réflexions multiples entre les antennes et les modes de transition sont les principales sources d'erreurs dans cette méthode. Ces erreurs peuvent être corrigées en minimisant les réflexions par une combinaison de lentilles et d'antennes [116].

Avec la méthode espace libre, plus l'épaisseur du diélectrique est grande, meilleure est la précision obtenue sur les paramètres électriques de l'échantillon.

*Avantages de la méthode de caractérisation en espace libre*

- Peut être utilisée pour les mesures à haute fréquence.

- Permet une mesure non destructive.
- Permet des mesures sur MUT dans de nombreuses conditions environnementales ou physiques telles que des températures élevées et de larges bandes de fréquences.

#### *Inconvénients de la méthode de caractérisation en espace libre*

- Besoin d'un MUT large (son diamètre est au moins celui du plan de sortie des antennes) et plat
- Réflexions multiples entre l'antenne et la surface de l'échantillon.
- Effets de diffraction au bord de l'échantillon.

### **2.1.2. Méthodes résonantes**

Les méthodes résonantes sont des méthodes de caractérisation basées sur la mesure de résonances. Ce sont les plus fiables en termes de précision sur  $\epsilon_r$  et  $\tan\delta$ , surtout pour les matériaux à faibles pertes, mais sur des bandes de fréquence étroites. Il existe de nombreuses méthodes de caractérisation résonantes, telles que celles utilisant les résonateurs à cavités, les résonateurs diélectriques, les T résonants etc. [99].

Les méthodes à perturbation conviennent à toutes les mesures de permittivité et de perméabilité des matériaux à pertes moyennes à élevées. Les caractéristiques de résonance dépendant du MUT et de la cavité, le facteur de qualité et la fréquence de résonance de la cavité vide ( $Q$  et  $f_r$ ) peuvent être mesurés à partir des paramètres de réflexion [109]. Une deuxième étape consiste à répéter la mesure après avoir rempli la cavité avec le MUT. La permittivité ou la perméabilité du matériau peut ensuite être calculée en utilisant la variation de la fréquence de résonance, le volume de la cavité et le facteur de qualité  $Q$ . La bande de fréquence de travail est définie par les dimensions du dispositif de résonance et les caractéristiques de l'échantillon [109]

#### *Avantages des méthodes résonantes :*

- Capacité à caractériser de très petits échantillons de matériau sous test.

#### *Inconvénients des méthodes résonantes :*

- Caractérisation limitée à une bande de fréquence étroite

#### **2.1.2.1. Méthode utilisant une cavité résonante**

La méthode en cavité résonante est largement utilisée dans la mesure des propriétés électromagnétiques ( $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$ ). A partir de la mesure des coefficients de réflexion  $S_{11}$  ou de transmission  $S_{21}$ , une analyse des paramètres de résonance (fréquence et facteur de qualité) est effectuée, ainsi  $\epsilon_r$  est déterminée à partir des dimensions de la cavité et des fréquences de résonance. De même, les pertes sont calculées à partir du coefficient de qualité à la résonance.

Le principe de cette méthode consiste à placer le matériau dans une cavité résonante et à remonter à la valeur de  $\epsilon_r$  à partir de la variation de la fréquence de résonance et du facteur de qualité de la cavité. Elle s'applique essentiellement à des matériaux à faibles pertes. Elle est aussi adaptable à la mesure des conductivités élevées.

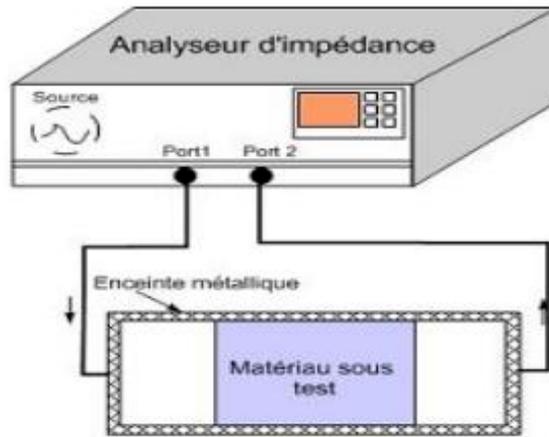


Figure 2-10 : Schéma du dispositif de mesure en cavité résonante [117]

Une cavité résonante peut avoir une forme géométrique quelconque. Les cavités les plus classiques sont les cavités métalliques rectangulaires ou cylindriques remplies d'air, dans lesquelles on insère l'échantillon à caractériser (Figure 2-11). La complexité de l'analyse électromagnétique dépend de la forme de la cavité. Le principe de fonctionnement d'une cavité résonante repose sur le phénomène de résonance des ondes électromagnétiques. A des fréquences particulières, dites fréquences de résonance, l'énergie est emmagasinée sous forme électrique. Les modes de résonance de la cavité métallique sont de type Transverses Electriques ( $TE_{mnp}$ ) ou Transverses Magnétiques  $TM_{mnp}$ . Les différences observées entre les fréquences de résonance à vide et avec l'échantillon, ainsi que la mesure du facteur de qualité, permettent de déterminer les propriétés diélectriques de l'échantillon [117].

Les méthodes en cavité présentent l'avantage d'être précises (environ 1%) mais l'extraction de paramètres est limitée en fréquence autour des fréquences de résonance de la cavité. Aussi, la caractérisation des matériaux sur une large bande de fréquence requiert l'usinage d'une série de cavités de dimensions variant de quelques mètres à quelques millimètres ainsi que des échantillons de tailles spécifiques. C'est pourquoi, le domaine d'utilisation des techniques de mesure en cavité fermée se réduit en général à 500 MHz -5 GHz.

La figure 2-11 ci-après est un exemple d'une cavité rectangulaire. « a », « b » et « d » représentent les dimensions de la structure.

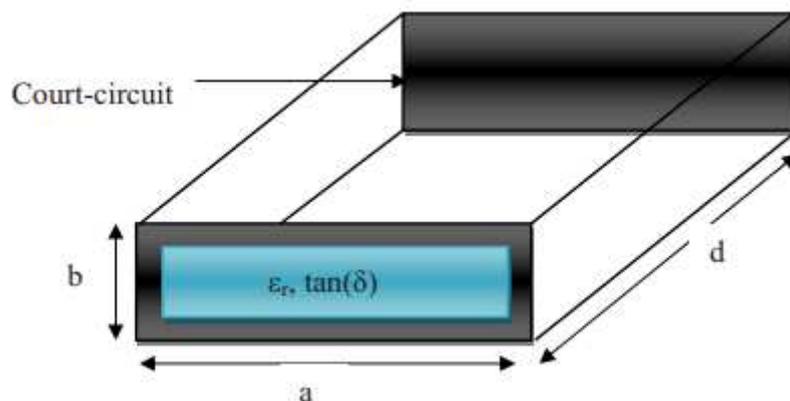


Figure 2-11: Cavité rectangulaire totalement remplie du matériau sous test [109]

Pour une cavité rectangulaire, la fréquence de résonance se détermine de façon générale par la relation suivante :

$$f_{r(m,n,p)} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2} \quad (2-29)$$

Les entiers « m », « n » et « p » représentent les indices du mode excité dans la structure.

Le coefficient de qualité, appelé aussi coefficient de surtension, est donné par la relation suivante :

$$Q = 2\pi \frac{W_a}{W} = \omega \frac{W_a}{P} \quad (2-30)$$

$W_a$  et  $W$  sont respectivement l'énergie emmagasinée et l'énergie dissipée dans la cavité pendant une période du signal électromagnétique. La grandeur  $P$  représente la puissance moyenne perdue et  $\omega$  est la pulsation angulaire de l'onde. Les pertes dans la cavité, en présence du matériau diélectrique, sont la somme des pertes ohmiques dans les parois métalliques, des pertes diélectriques traduisant les effets dissipatifs dans l'échantillon, et des pertes liées au couplage de la cavité avec l'appareil de mesure. L'analyse électromagnétique de la cavité permet, dans l'approximation des faibles perturbations, de définir les relations suivantes :

$$\epsilon_r' = 1 + 2C \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2-31)$$

$$\text{et } \epsilon_r'' = C \left( \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0} \right) \quad (2-32)$$

Où  $C$  est un paramètre qui peut être défini soit par une analyse théorique à partir des expressions des champs électrique et magnétique excités dans la cavité, soit d'une façon expérimentale en utilisant un matériau étalon de caractéristiques électromagnétiques connus. Les paramètres  $f_0$  (respectivement  $f_0 + \Delta f$ ) et  $Q_0$  (respectivement  $Q_1$ ) sont la fréquence de résonance et le facteur de qualité à vide (respectivement en présence du matériau).

Les méthodes de mesure en cavité résonante présentent une grande sensibilité. Les principales sources d'erreur de mesure de ces techniques viennent des pertes métalliques, de la difficulté d'usinage de l'échantillon, ainsi que de la présence d'une lame d'air entre le matériau et les parois métalliques de la cavité. Enfin, cette technique de mesure suppose implicitement des variations lentes de la permittivité dans la bande de fréquences couvertes par les points de mesure.

Le facteur de qualité à vide de la cavité est défini par [109]

$$Q_0 = 2\pi \frac{\text{énergie emmagasinée à la résonance}}{\text{énergie dissipée dans une période à la fréquence de résonance}} \quad (2-33)$$

$$Q_0 = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2-34)$$

- $f_0$  : fréquence de résonance
- $\Delta f$  : largeur de bande à -3dB

### 2.1.2.2. Méthode utilisant une cellule triplaque à base de résonateurs

Comme indiqué lors de la présentation des précédentes méthodes de caractérisation, en mesurant la fréquence de résonance et le facteur de qualité d'un résonateur, il est également possible de déterminer les parties réelles et imaginaires de la constante diélectrique complexe du substrat en technologie stripline.

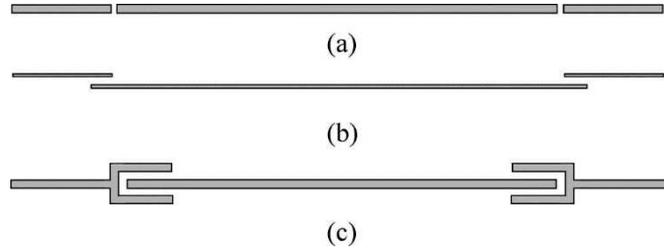


Figure 2-12 : Exemples de configurations de résonateurs pour la caractérisation de la technologie stripline (a) Résonateur stripline (vue de dessus). (b) Résonateur à accès couplés dans des plans différents (vue de côté). (c) Résonateur couplés en fourche (vue de dessus). [118]

Le résonateur stripline consiste en une section de conducteur incorporée dans un matériau diélectrique entre deux plans de masse. La ligne de transmission prend en charge un mode fondamental de propagation purement TEM. La constante de propagation est donnée par :

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \sqrt{\varepsilon_r} = \left( \frac{2\pi f_{r,n}}{c} \right) \sqrt{\varepsilon_r} \quad (2-35)$$

Où  $f_{r,n}$  est la fréquence de résonance ;  $c$  est la vitesse de la lumière dans le vide et  $\varepsilon_r$  est la constante diélectrique du matériau. La résonance se produit à des fréquences  $f_{r,n}$  satisfaisant la relation

$$2\beta L_{\text{eff}} = 2n\pi \quad (2-36)$$

$L_{\text{eff}}$  est la longueur effective du résonateur tenant compte des débordements de champs en limite des métallisations, elle est alors légèrement supérieure à la longueur physique. En mesurant le paramètre de transmission  $S_{21}$ , on peut obtenir les fréquences de résonance  $f_{r,n}$  et déterminer la constante diélectrique à partir de la relation suivante :

$$\varepsilon_r = \left( \frac{nc}{2f_{r,n}L_{\text{eff}}} \right)^2 \quad (2-37)$$

La tangente de perte peut être obtenue à partir de la fréquence de résonance et du facteur de qualité  $Q$  qui prend en compte toutes les pertes dans le résonateur, y compris les pertes diélectriques, les pertes conductrices et les pertes de rayonnement. Les pertes de rayonnement sont généralement faibles comparées aux autres pertes donc négligées. Ainsi, le coefficient d'atténuation total  $\alpha$  peut être exprimé par  $\alpha = \alpha_c + \alpha_d$ , où  $\alpha_c$  est le coefficient d'atténuation dû aux pertes de conduction et  $\alpha_d$  le coefficient d'atténuation dû aux pertes diélectriques. Le coefficient d'atténuation  $\alpha$  peut être déterminé à partir du facteur  $Q$  et de la fréquence de résonance mesurés, par la relation :

$$\alpha = \frac{\pi f_r \sqrt{\varepsilon_r}}{c Q} \quad (2-38)$$

Les pertes de conduction ( $\alpha_c$ ) peuvent être calculées en connaissant la conductivité des métallisations. Après avoir déterminé le coefficient d'atténuation  $\alpha_d$  du diélectrique, la tangente de perte diélectrique est déterminée à partir de :

$$\tan\delta = \frac{\alpha_d C}{\pi f_r \sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{Q} - \frac{\alpha_d C}{\pi \sqrt{\epsilon_r} f_r} \quad (2-39)$$

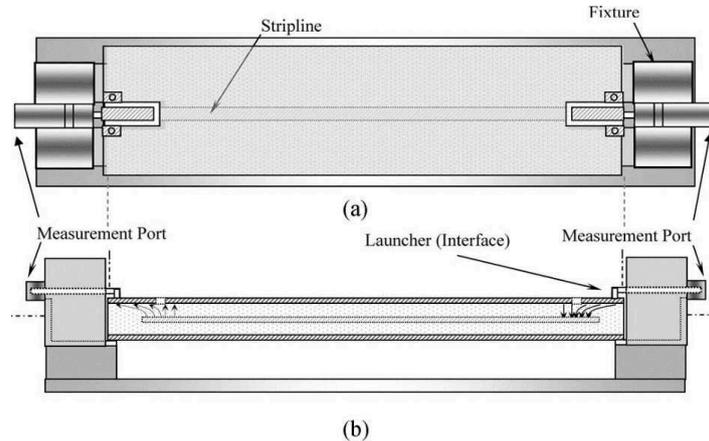


Figure 2-13 : Configuration des mesures haute fréquence (a) Vue de dessus (b) Vue latérale [118].

### 2.1.2.3. Méthode utilisant un Té résonant

Le résonateur en T est également une structure largement utilisée pour la détermination des caractéristiques diélectriques (constante diélectrique et tangente de perte) de matériaux dans une technologie choisie (microruban, coplanaire...) et dans une gamme de fréquences allant de 100 MHz à 60 GHz.

La première étape de cette technique consiste à mesurer le paramètre de transmission  $S_{12}$  d'un T résonant (de longueur  $\lambda/4$  à la fréquence d'intérêt) (figure 2-14).

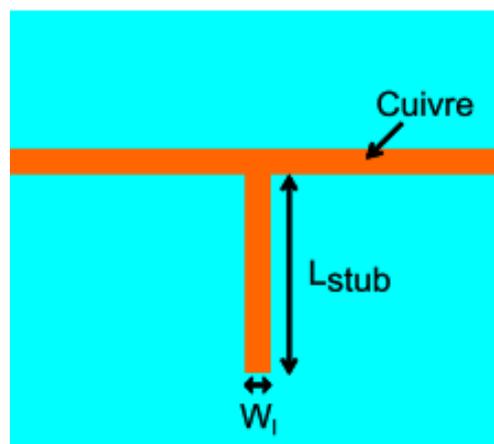


Figure 2-14 : Schéma vu de dessus d'un Té résonant (stub)

Des résonances sont présentes à toutes les fréquences harmoniques de la fréquence d'intérêt (à  $f=(2k+1)f_0$  soit  $l=\lambda/4+k.\lambda/2$ ), suivant les propriétés du substrat diélectrique et les dimensions du système, telles que pour la première fréquence de résonance :

$$f_{res} = \frac{c}{4L_{stub}\sqrt{\epsilon'_{reff}}} \quad (2-40)$$

où,  $L_{stub}$  est la longueur du stub et  $\epsilon'_{reff}$  est la permittivité relative effective qui est définie, par exemple pour une ligne microruban, par l'équation d'Hammerstad [119] :

$$\epsilon'_{reff} = \frac{\epsilon'_r+1}{2} + \frac{\epsilon'_r-1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W_l} \right]^{-1/2} \quad (2-41)$$

où  $h$  est l'épaisseur du substrat diélectrique et  $W_l$  est la largeur de la ligne microruban. Cette équation est valable si  $h < W_l$  [120].

Pour un résonateur en T coplanaire (figure 2-15), les fréquences de résonance ( $f_{r,n}$ ) et la largeur de bande 3dB autour de chaque point de résonance ( $BW_n$ ) permettent d'extraire la constante diélectrique effective ( $\epsilon_{eff,n}$ ) et l'atténuation ( $\alpha_n$ ), conformément aux équations [121-122] :

$$\epsilon_{eff,n} = \left( \frac{n \cdot c}{4 \cdot L_{stub} \cdot f_{r,n}} \right)^2 \quad (2-42)$$

$$\alpha_n = 8.686 \cdot \frac{\pi \cdot n \cdot BW_n}{4 \cdot L_{stub} \cdot f_{r,n}} \left[ \frac{dB}{length} \right] \quad (2-43)$$

Ici,  $n$ , est l'indice de résonance ( $n = 1, 3, 5, \dots$ ),  $c$ , est la vitesse de la lumière dans le vide et  $L_{stub}$  est la longueur physique effective du segment de résonance.

Plus spécifiquement, le facteur de perte a un effet prépondérant sur la largeur du pic de résonance (c.-à-d. le facteur de qualité  $Q$ ) et la permittivité relative a un effet prépondérant sur la fréquence de résonance. Le facteur de qualité  $Q$  est défini par l'équation suivante [120] :

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta f_{res-sub}} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2-44)$$

où  $\Delta f_{res-sub}$  est la bande de fréquence à -3dB [123].

Elle est influencée par la qualité de la métallisation, ce qui impose de bien connaître la valeur de la conductivité du métal déposé afin de ne pas surestimer les pertes diélectriques extraites à cause des pertes conductrices.

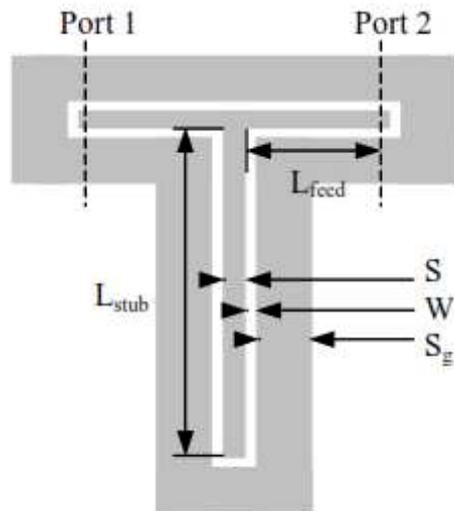


Figure 2-15 : Exemple de disposition d'un résonateur en T coplanaire (CPW) [121]

Les structures de guides d'ondes coplanaires peuvent supporter à la fois des modes pairs et impairs.

| Méthodes de caractérisation            | Mesure              | Avantages  | Désavantages   |
|--|---------------------|--|--|
| Sonde coaxiale /<br>Sonde diélectrique | $\epsilon_r$        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesure sur une large bande de fréquence,</li> <li>▪ Idéal pour les semi-solides ou les liquides</li> <li>▪ Ne nécessite aucun usinage de l'échantillon, préparation simple et non destructive des échantillons</li> <li>▪ Bonne précision pour les matériaux à fortes pertes</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les gaps d'air provoquent des erreurs</li> <li>▪ Besoin d'une phase de calibrage</li> </ul>   |
| Ligne de transmission                  | $\epsilon_r, \mu_r$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesure sur une large bande de fréquence</li> <li>▪ Convient aux mesures des échantillons solides et liquides</li> <li>▪ Mesure des échantillons à pertes moyennes ou fortes.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Préparation des échantillons difficile pour le guide d'onde (il faut pouvoir remplir la section transversale de l'appareil la plus complètement possible)</li> <li>▪ La précision des mesures est limitée par les gaps d'air</li> </ul> |
| Espace libre                           | $\epsilon_r, \mu_r$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesure large bande et sans contact</li> <li>▪ Préparation facile des échantillons</li> <li>▪ Précision moyenne pour grandes et faibles pertes</li> <li>▪ Idéal pour les échantillons plats et solides de grandes dimensions</li> <li>▪ Utilisable à hautes températures</li> <li>▪ Permet des mesures non destructives</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Problème de diffraction sur les bords de l'échantillon</li> <li>▪ Limitée par la taille pratique de l'échantillon</li> <li>▪ Réflexions multiples entre la surface de l'échantillon et les antennes</li> </ul>                          |

|  |                     |   |  |
|--|---------------------|---|--|
| Cavité résonante                             | $\epsilon_r, \mu_r$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Adaptée aux matériaux solides et liquides</li> <li>▪ Méthode parmi les plus précises</li> <li>▪ Possibilité de mesure en haute température</li> <li>▪ Idéale pour les matériaux à faibles pertes</li> <li>▪ Aucune procédure d'étalonnage répétitif</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mesures à la seule fréquence de résonance (bandes de fréquences étroites)</li> <li>▪ Convient aux échantillons de petites dimensions</li> </ul> |
| Capacité parallèle                           | $\epsilon_r$        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plus grande précision</li> <li>▪ Pour des échantillons minces, de surface plane</li> <li>▪ Convient aux matériaux à fortes pertes</li> <li>▪ Mesure relativement facile</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Effet de polarisation des électrodes</li> <li>▪ Les gaps d'air sont de grandes sources d'erreurs</li> </ul>                                     |
| Ligne de transmission planaire / Té résonant | $\epsilon_r$        | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pas de manipulation spéciale des échantillons</li> <li>▪ Peut être utilisé pour solides / liquides</li> <li>▪ Mesures haute température possible</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facteur de qualité faible</li> <li>▪ Les gaps d'air provoquent une erreur</li> </ul>  |

*Tableau 2-1 : Comparaison des techniques de caractérisation diélectrique les plus utilisées*

### 2.1.3. Conclusion et choix

Dans cette partie, des techniques de caractérisation diélectrique ont été décrites. En basse et moyenne fréquence, les méthodes résonantes sont préférables, alors qu'à fréquence plus élevée la ligne de transmission, les méthodes coaxiales, à cavité résonante et en espace libre sont couramment utilisées. Les méthodes par capacité MIM, par sonde coaxiale et en espace libre ont montré de bonnes performances pour les matériaux à fortes pertes sur une large plage de fréquences, tandis que la cavité résonante offre une précision supérieure pour les matériaux à faible permittivité et les échantillons de petite taille. Cependant, une bonne technique doit pouvoir fournir une bonne précision, un coût limité, une procédure simple, des mesures rapides pour le matériau de test souhaité (pertes élevées ou faibles).

La méthode de caractérisation électromagnétique retenue dans ces travaux est une méthode large bande. Dans cette méthode, seul le mode fondamental du guide d'onde est supposé se propager.

## 2.2. Caractérisation diélectrique de la technologie microruban sur Borofloat 33 retenue pour la conception d'antennes à faible impact visuel

La technologie retenue pour réaliser des antennes à faible impact visuel est la technologie microruban, il est donc intéressant de tenir compte du fait que le substrat diélectrique ne sera pas utilisé seul mais plutôt avec une métallisation supérieure et une métallisation inférieure. La technique de caractérisation choisie va donc prendre en compte cette spécificité et permettre de qualifier le matériau dans son environnement, de manière la plus précise possible. Par ailleurs, le fonctionnement d'une antenne, comme celui d'autres fonctionnalités, ne se limite pas à une seule fréquence, il est donc intéressant de pouvoir assurer cette caractérisation sur une bande de fréquence englobant la bande de fréquence d'intérêt.

Le procédé choisi comprend la mesure des coefficients de réflexion ( $S_{11}$  ou  $S_{22}$ ) et de transmission ( $S_{21}$  ou  $S_{12}$ ) d'un échantillon de ligne de transmission. Les paramètres de diffusion sont étroitement liés à la permittivité complexe et à la perméabilité du matériau. Pour une mesure précise, le champ électrique maximal est requis dans l'échantillon.

L'idée est de travailler avec des lignes de transmission d'impédance caractéristique nettement différente de 50 Ohms afin de générer des désadaptations suffisamment franches pour pouvoir ensuite associer un modèle à la mesure. Il suffit ensuite d'identifier les valeurs des paramètres  $\epsilon_r$  et  $\tan\delta$  qui permettent de faire coïncider le modèle et la mesure. Cette technique a été appliquée à la détermination des valeurs de la permittivité diélectrique et de la tangente de perte du substrat de verre Borofloat 33 utilisé dans une solution technologique microruban, dans un premier temps avec des métallisations de cuivre pleines déposées sur le verre et ensuite avec des métallisations grillagées pour évaluer les modifications de ces paramètres dues au grillage.

## 2.2.1. Caractérisation de la technologie microruban métallisations pleines

L'échantillon utilisé pour la caractérisation est présenté sur la figure 2-16.

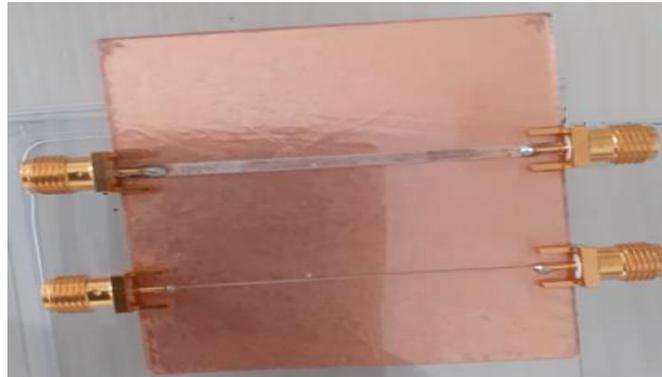


Figure 2-16 : Lignes de cuivre sur du verre Borofloat 33

Les mesures des coefficients de réflexion et de transmission ont été réalisées sur un analyseur de réseau après étalonnage avec kit de calibration électronique. Les valeurs pratiques des paramètres S sont ainsi mesurées pour chacune des lignes connectées au VNA (figure 2-17 a). Les lignes sont ensuite modélisées sur le logiciel de simulation 1D Keysight ADS (Advanced Design System). Le modèle équivalent est conçu en fonction de la forme et des dimensions des lignes produites. Les cellules LC viennent modéliser la transition entre la connectique SMA, sur laquelle se propage un mode TEM, et la ligne microruban sur laquelle se propage un mode hybride qu'on peut qualifier de quasi-TEM, sous l'approximation que le milieu environnant complexe peut être modélisé par une permittivité relative effective tenant compte de la permittivité relative du substrat et de l'air ambiant.

Les valeurs des paramètres électromagnétiques ( $\epsilon_r$  et  $\tan\delta$ ) et les valeurs de la capacité et l'inductance du modèle de la transition coaxial-microruban sont ajustées de manière à faire coïncider les courbes de réponse théorique (sur ADS) et pratique (sur VNA). Les valeurs de la tangente de perte et de la constante diélectrique du matériau utilisé sont ainsi extraites.

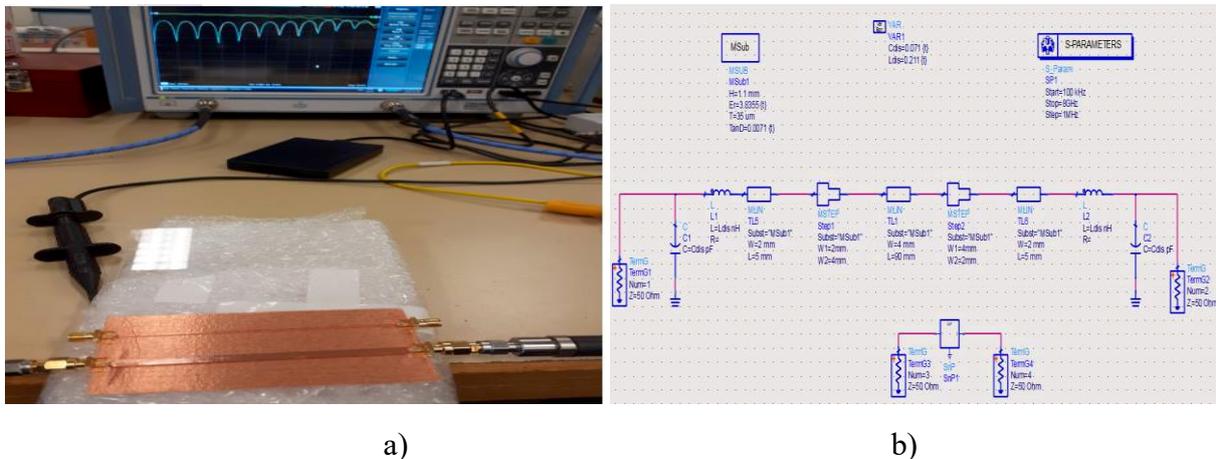


Figure 2-17 : a) Configuration de la mesure sur VNA b) Modèle ADS

La figure 2-18 présente les réponses en fréquence.

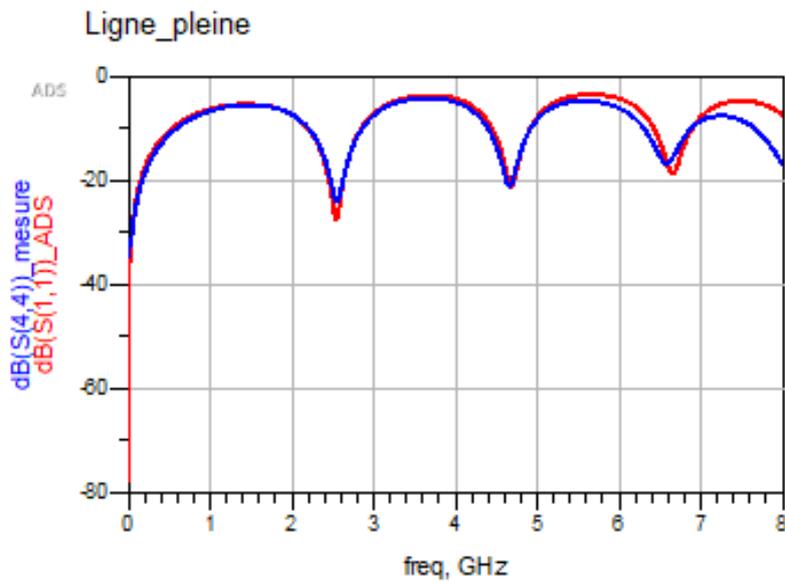


Figure 2-18 : Comparaison des réponses en fréquences issues de la modélisation ADS (rouge) et de la mesure sur VNA (bleue)

Le modèle permet une bonne, voire très bonne, corrélation avec la mesure jusqu'à 7 GHz environ. L'extraction des paramètres électromagnétiques tels que la permittivité relative et la tangente de perte sont donc suffisamment précises pour permettre ensuite une conception d'antenne de qualité dans cette bande de fréquence. Nous avons obtenu une permittivité diélectrique de 4,5 et une tangente de perte de 0,012.

### 2.2.2. Caractérisation de la technologie microruban à métallisations grillagées

De la même manière, nous avons réalisé une ligne grillagée sur un plan de masse grillagé (figure 2-19). L'objectif est de voir l'influence du grillage sur les paramètres caractéristiques de la ligne.



Figure 2-19 : Lignes de cuivre grillagée sur du verre Borofloat 33

Des mesures de  $S_{11}$  et  $S_{22}$  de la ligne grillagée ont été effectuées sur le VNA (figure 2-20). La réponse en fréquence est présentée sur la figure 2-21.

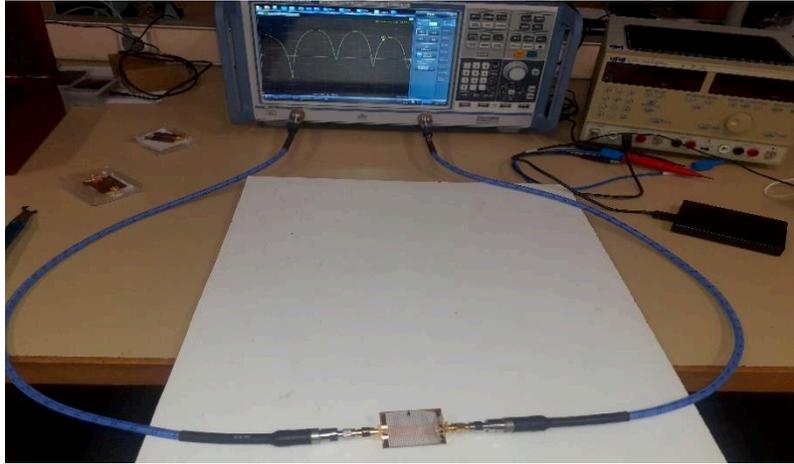


Figure 2-20 : Configuration de la mesure sur VNA

La modélisation de la ligne grillagée n'est pas possible sur ADS, nous avons donc comparé les mesures des réponses en fréquence réalisées sur VNA avec la simulation ADS d'une ligne dont les métallisations sont pleines (figure 2-21).

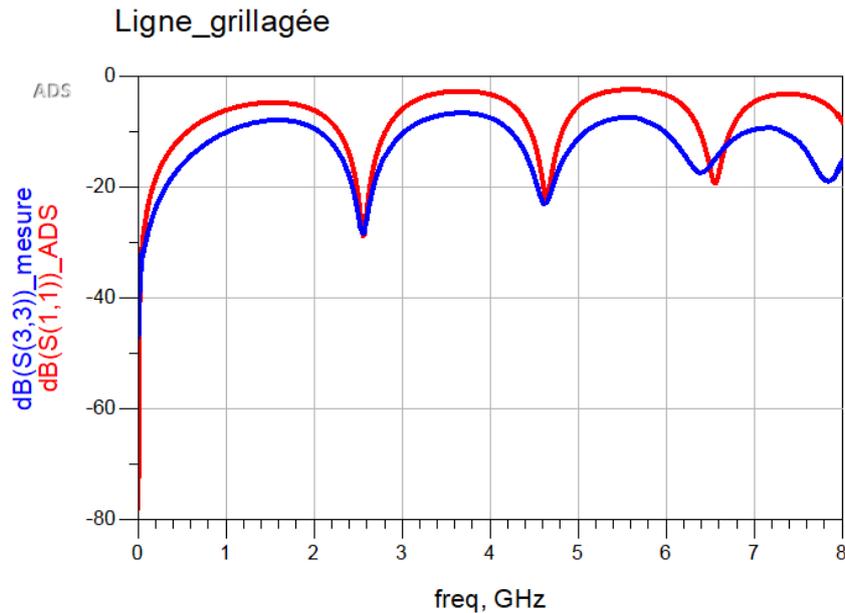


Figure 2-21 : Comparaison des réponses en fréquence issues de la modélisation ASD (Rouge) et de la mesure sur VNA (Bleue)

Une première constatation est que les résultats de mesure sont en cohérence avec ceux obtenus pour une ligne à métallisation non grillagée. Les points de fréquence pour lesquels l'adaptation est la meilleure sont quasiment les mêmes que pour une ligne pleine. On retrouve donc bien la même valeur de permittivité relative extraite. La différence s'opère sur les niveaux maximums des coefficients de réflexion. L'écart maximal en entrée est d'environ 7 dB, observé à 6 GHz. Elle ne semble pas liée à une variation de valeur de tangente de perte (figure 2-22) mais plutôt à celle de la conductivité globale de la ligne dû aux évidements sur les métallisations.

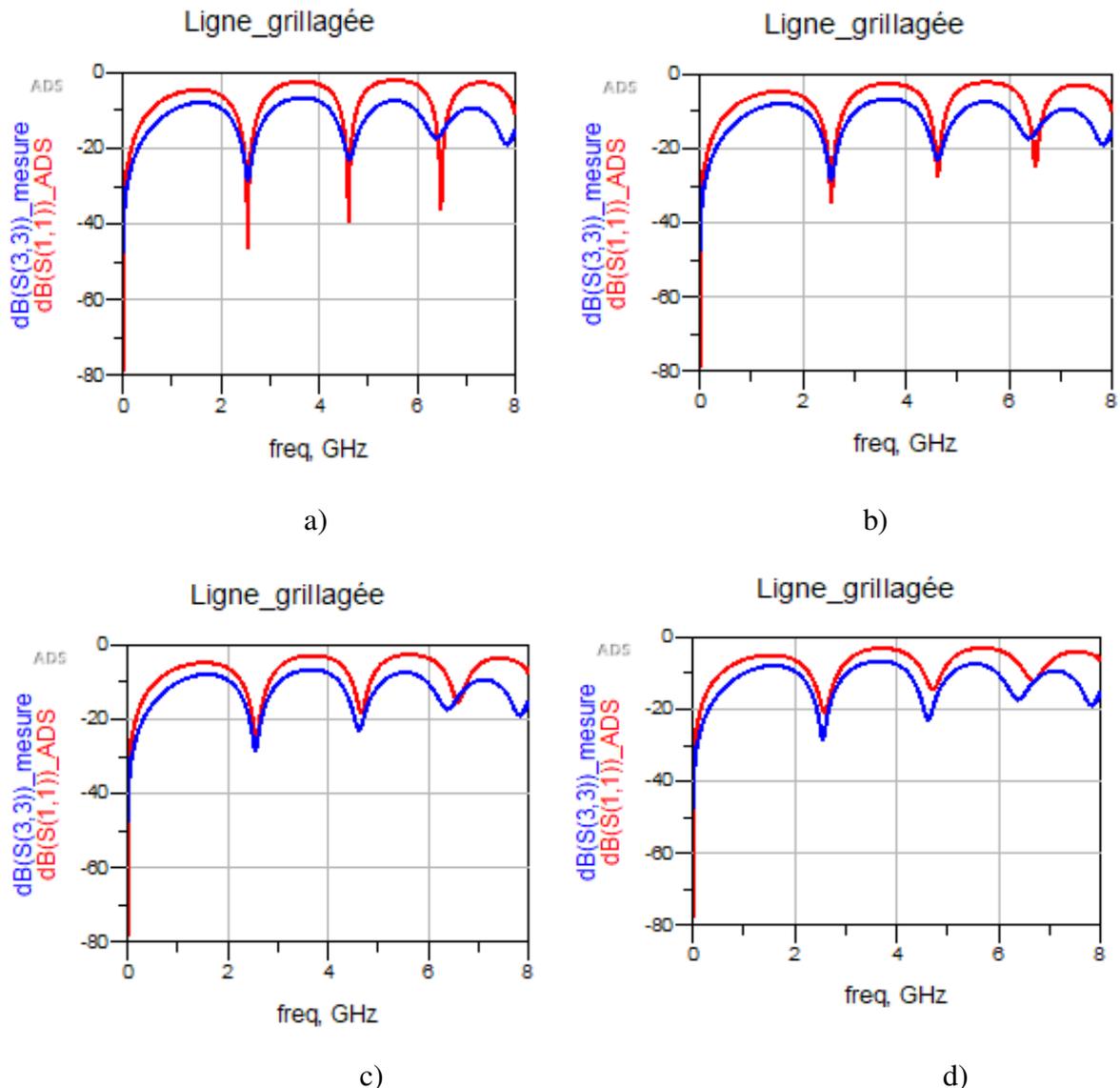


Figure 2-22 : Réponses en fréquence après modification de la tangente de perte a)  $\tan\delta = 0.002$  b)  $\tan\delta = 0.009$  c)  $\tan\delta = 0.03$  d)  $\tan\delta = 0.05$

### 2.3. Conclusion

Dans ce chapitre, les principales techniques de caractérisation diélectrique largement utilisées ont été présentées. Une solution large bande a été retenue pour la caractérisation de la technologie microruban sur verre Borofloat 33. Une permittivité diélectrique de 4,5 et une tangente de perte de 0,012 ont été obtenues sur une bande de fréquence de 0 à 7 GHz. Une étude a été faite sur ligne grillagée pour voir l'influence du grillage sur les paramètres diélectriques, une perte de  $S_{11}$  est observée, causée par la modification de la conductivité de la ligne due aux évidements.



# Chapitre 3

## Processus technologique de réalisation des antennes grillagées à faible impact visuel

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'ensemble du processus de réalisation des antennes patch grillagées présentées dans ce manuscrit, celui-ci a été mis en œuvre à l'IETR. La première étape consiste en un dépôt double face d'une couche conductrice sur le substrat transparent par pulvérisation cathodique. Ensuite, une étape d'épaississement de la couche est réalisée par électrodéposition. Viennent enfin les étapes de lithographie laser et de gravure chimique pour réaliser le maillage.

Nous discuterons dans un premier temps des techniques de dépôt de couches minces et dans un second temps nous détaillerons les techniques de micro fabrication en salle blanche. Pour finir, nous développerons l'ensemble du processus qui a abouti à la réalisation des antennes.

### 3.1. Démarche de réalisation

L'objectif est de réaliser des antennes pleines et grillagées possédant la géométrie et les dimensions décrites sur les figures 3-1 et 3-2 :

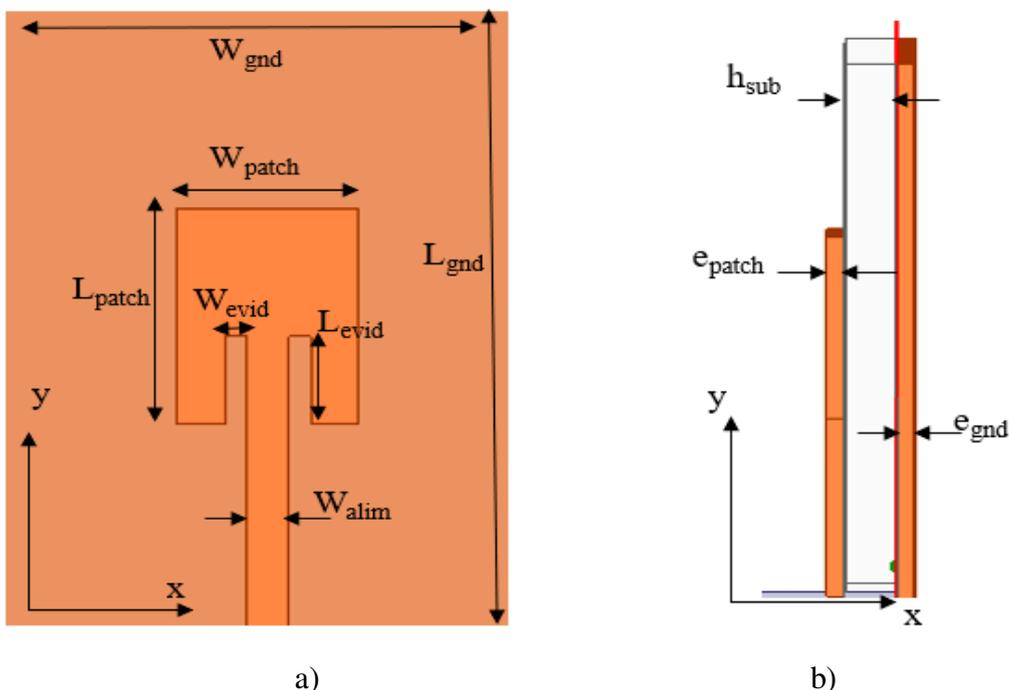


Figure 3-1: Schéma de l'antenne opaque a) vue de dessus, b) vue de profil

Toutes les antennes auront les mêmes dimensions et le même type de dépôt métallique (tableau 3-1). Les dimensions sont limitées par le process de réalisation du masque, Il faut que l'antenne rentre dans un cercle de diamètre 3 pouces. En tenant compte des données de la revue bibliographique, l'épaisseur de dépôt à atteindre a été fixée à  $6.5 \mu\text{m}$  ce qui permet d'obtenir

un gain de l'ordre de 2dBi sachant que l'effet de peau sur du cuivre à des fréquences compatibles avec les dimensions de l'antenne est de l'ordre de  $1.2\mu\text{m}$  (valeur à 3GHz). L'épaisseur de peau doit être inférieure à l'épaisseur du conducteur pour limiter les pertes.

|                        | Élément rayonnant | Plan de masse | Ligne d'alimentation | Substrat | Evidement |
|------------------------|-------------------|---------------|----------------------|----------|-----------|
| Longueur (mm)          | 24                | 60            | 33                   | 60       | 9         |
| Largeur (mm)           | 20                | 60            | 2,3                  | 60       | 1.3       |
| Épaisseur de dépôt(mm) | 0,0065            | 0,0065        | 0,0065               | 1,1      | 0,0065    |

Tableau 3-1 : Dimensions des antennes

L'antenne grillagée se caractérise de plus par son pas de grillage et sa largeur de grille. Ces dimensions (p et s) sont fixées en fonction de la transparence et de la résistance par carré recherchées. Le grillage sera effectué sur les deux faces.

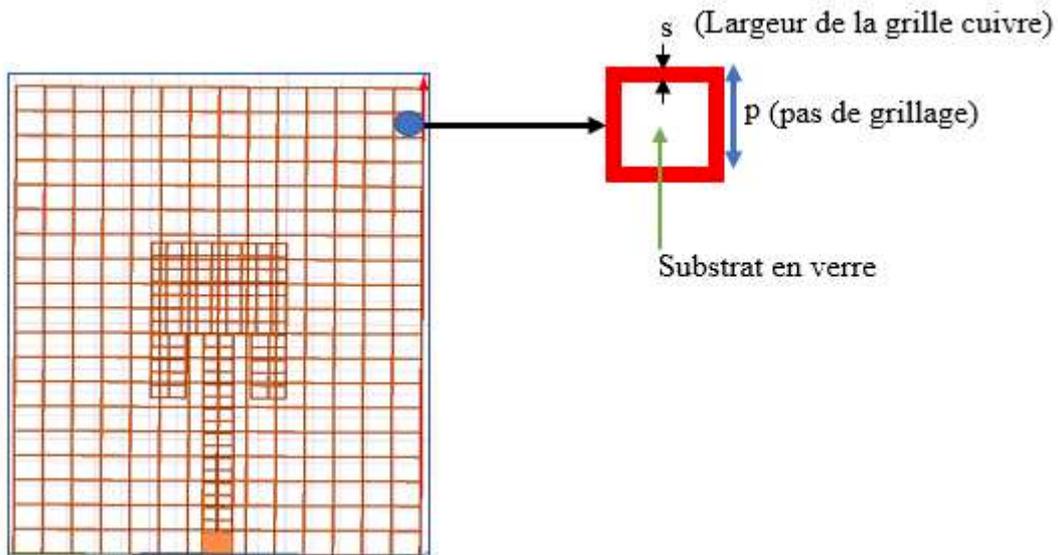


Figure 3-2 : Schéma de l'antenne grillagée

Les dimensions des grillages sont dans le tableau 3-2.

|                     | Élément rayonnant                  |                                  | Plan de masse                      |                                  |
|---------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|                     | Gap entre grille ( $\mu\text{m}$ ) | Largeur grille ( $\mu\text{m}$ ) | Gap entre grille ( $\mu\text{m}$ ) | Largeur grille ( $\mu\text{m}$ ) |
| Antenne grillagée 1 | 1000                               | 100                              | 1000                               | 100                              |
| Antenne grillagée 2 | 1000                               | 100                              | 2000                               | 100                              |

Tableau 3-2 : Dimensions des grillages des antennes à faible impact visuel

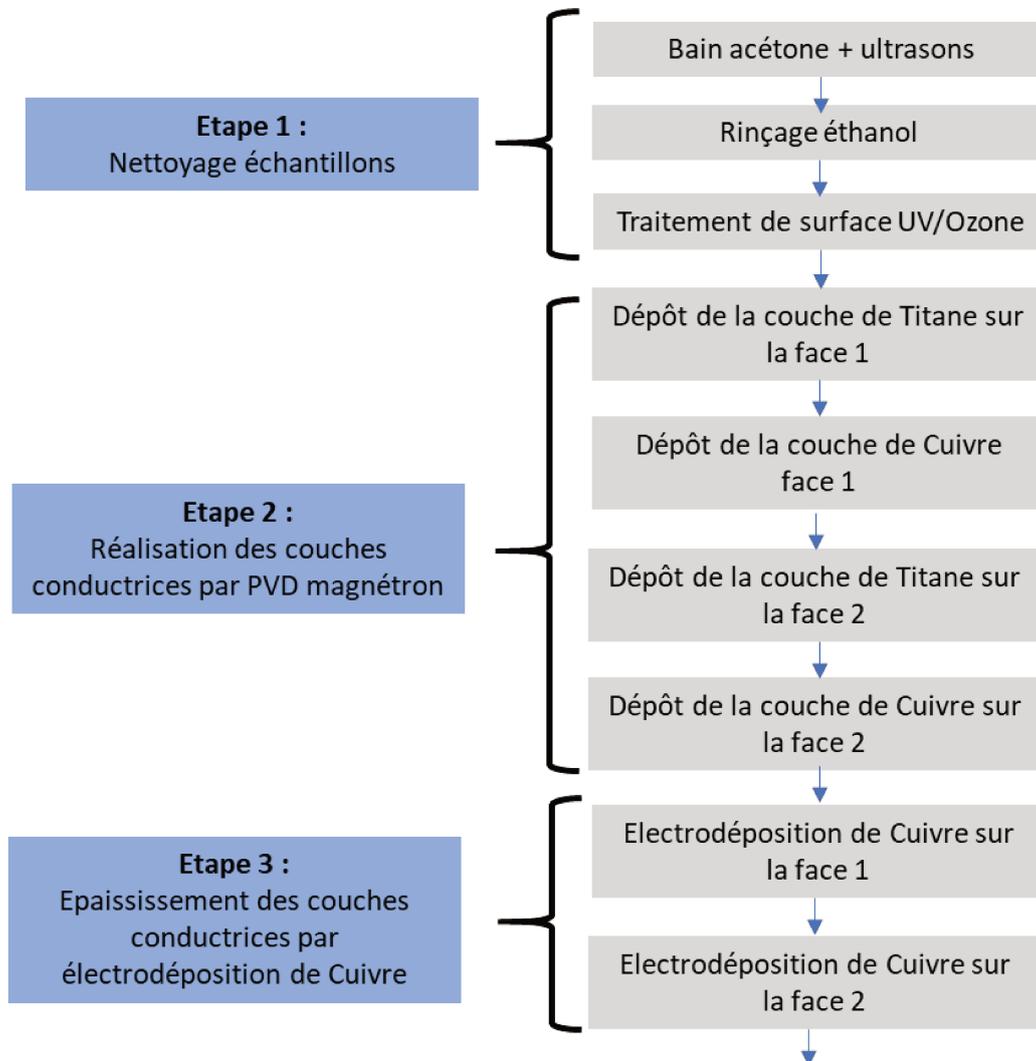
Le diagramme ci-dessous récapitule toutes les étapes à suivre pour réaliser les antennes. Dans la suite de ce chapitre, nous développerons et justifierons le choix des outils de micro fabrication en salle blanche utilisés.

### Description avec diagramme du protocole :

Ce travail peut se résumer à quatre grandes étapes qui sont les suivantes :

- Etape 1 : Le nettoyage des échantillons de verre
- Etape 2 : La réalisation des couches minces métalliques
- Etape 3 : L'épaississement des couches minces métalliques
- Etape 4 : La mise en forme des couches minces métalliques

Les étapes 2, 3 et 4, sont reprises pour la mise en forme de la face 2.



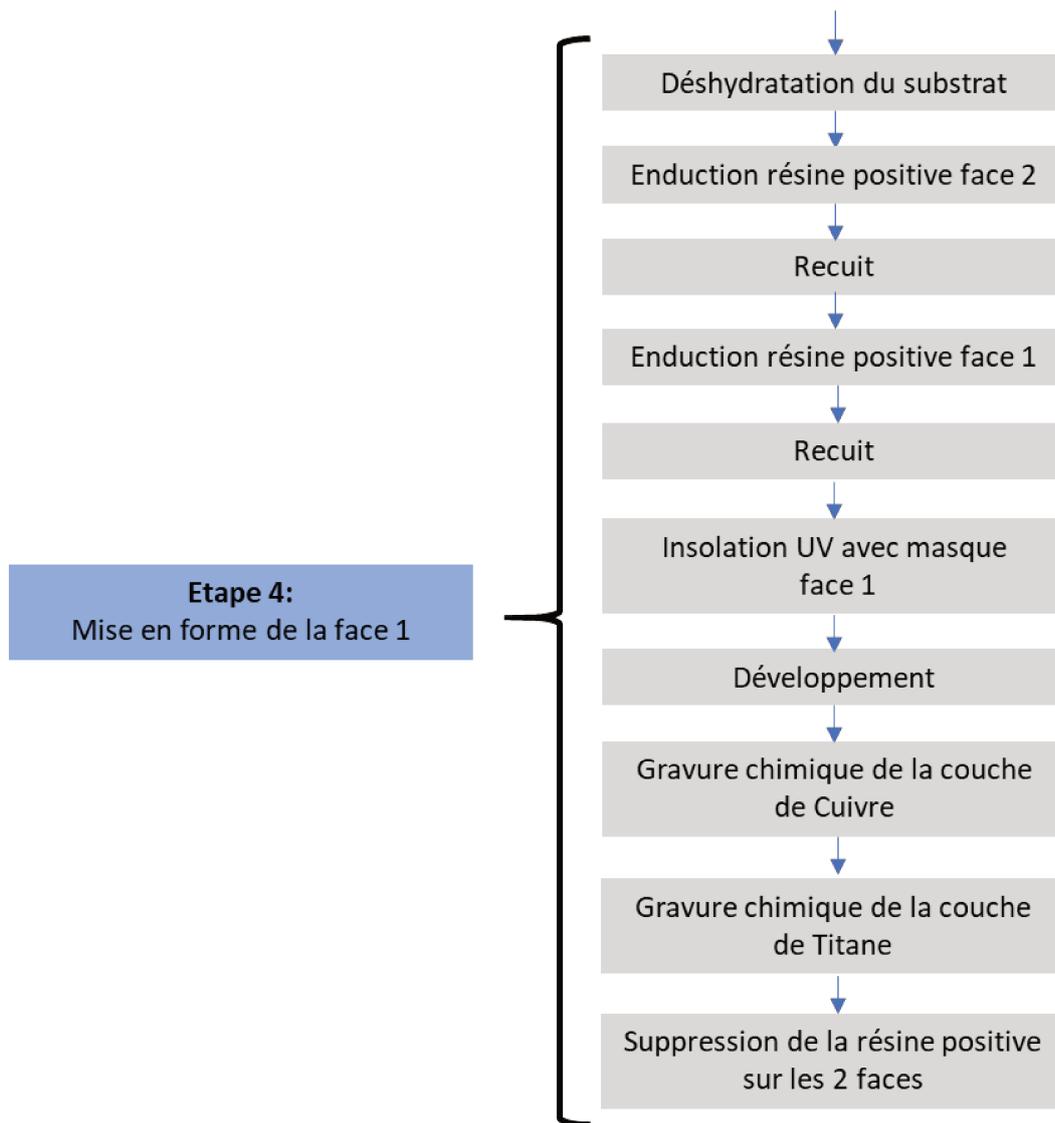


Figure 3-3: Etapes de réalisation de l'antenne grillagée

### 3.2. Nettoyage des échantillons

L'échantillon de substrat diélectrique en verre est tout d'abord nettoyé dans un bain d'acétone, d'ultrason, puis rincé avec de l'éthanol pour enlever toute impureté. Le substrat est ensuite déshydraté sur une plaque chauffante à 100°C pendant 5 min. Pour améliorer l'adhérence du métal au verre, celui-ci subit un traitement de surface UV/Ozone (figure 3-5) pendant 15min.

Le nettoyage à l'UV/ozone est un processus d'oxydation photo-sensibilisé dans lequel les molécules organiques réagissent chimiquement avec les molécules d'ozone, entraînant le clivage des liaisons et la dissociation des molécules de surface. Le processus utilise une source de lumière UV à haute intensité qui a deux pics d'émission dominants aux longueurs d'onde de 185 nm et de 254 nm. Ces deux longueurs d'onde sont responsables de processus différents, qui aboutissent finalement au nettoyage de la surface. L'énergie du photon absorbé est suffisante pour rompre la double liaison oxygène-oxygène entraînant la formation de deux radicaux libres

d'oxygène ( $O\bullet$ ). Ces radicaux libres peuvent ensuite réagir avec l'oxygène moléculaire produisant des molécules d'ozone (figure 3-4).

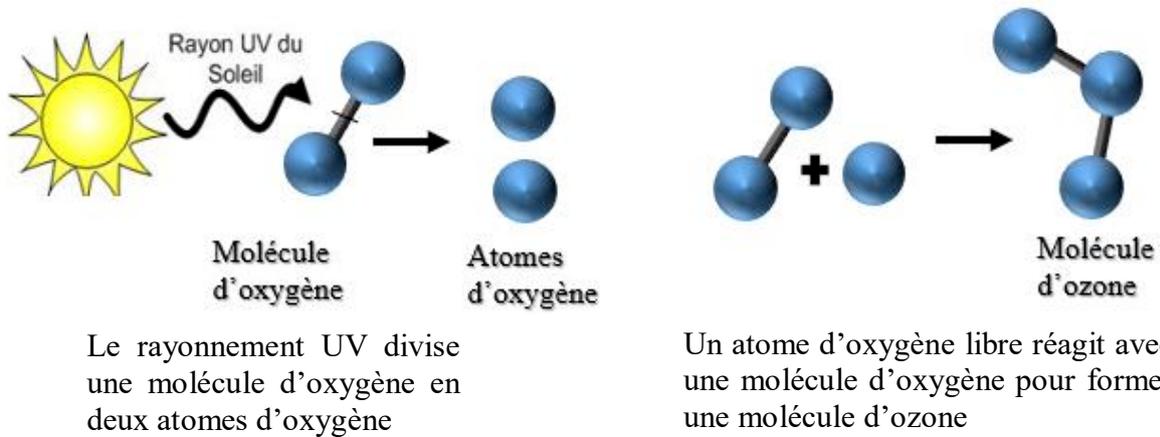


Figure 3-4 : Production naturelle de l'ozone [124]

Le rayonnement UV à 254 nm est facilement absorbé par les espèces organiques présentes à la surface de nombreux substrats. L'exciton qui se forme sera dans un état hautement énergétique, l'énergie peut alors également être suffisamment élevée pour que certaines molécules forment des radicaux organiques. Les états excités et les espèces de radicaux organiques présents à la surface réagissent facilement avec l'ozone présent dans l'atmosphère, entraînant la formation d'espèces volatiles. Ces composés volatiles peuvent facilement se désorber de la surface laissant une surface vierge.



Figure 3-5 : UV/Ozone cleaner Ossila utilisé pour le traitement de surface des substrats [125]

Après cette phase de nettoyage commence le processus de réalisation des couches minces métalliques.

### 3.3. Processus de dépôt de couche mince conductrice

On désigne par "couche mince", une couche d'un matériau d'épaisseur allant de quelques nanomètres à quelques micromètres sur un substrat ou sur des couches de matériaux différents.

Il est possible de classer les techniques de dépôts existantes en deux grandes catégories :

- Par procédé chimique.
- Par procédé physique.

Les principales méthodes utilisées pour fabriquer des couches minces ont lieu sous vide et font appel aux techniques de dépôt en phase vapeur chimique (CVD : Chemical Vapor Deposition) [126] ou en phase vapeur physique (PVD : Physical Vapor Deposition) [127].

La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure 3-6.

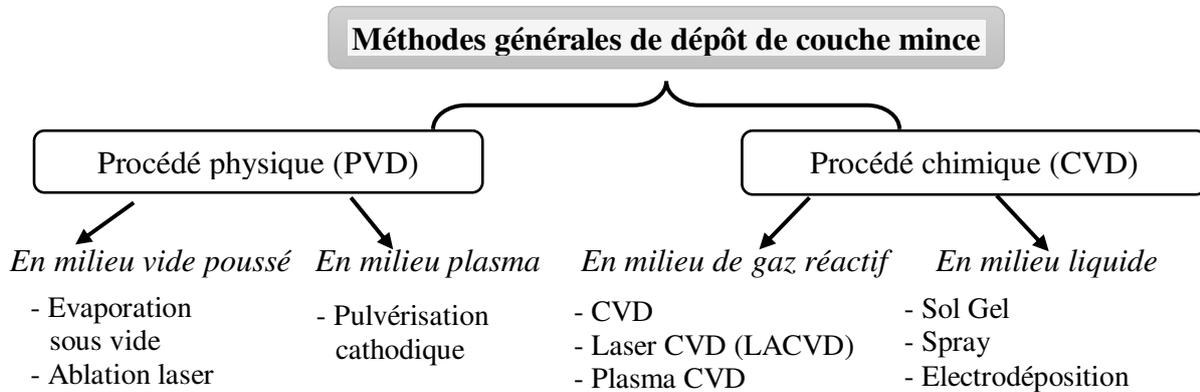


Figure 3-6: Présentation des principaux procédés de dépôt de couches minces

Ces procédés font appel à trois composants différents (figure 3-7)

- Une source : le matériau à déposer est concentré dans un creuset, une plaque métallique...
- Un milieu : c'est l'espace compris entre la source et le substrat, c'est donc le siège du phénomène de transfert de la matière. Cela peut être le siège de réactions chimiques intervenant entre les atomes du matériau à déposer et un gaz réactif [128]. Le milieu peut être de type passif ou actif :
  - Passif (vide ou basse pression, air à pression atmosphérique et atmosphère inerte ...).
  - Actif (plasma, gaz réactif et liquide...)
- Un substrat : c'est la pièce à revêtir, c'est ici qu'intervient le phénomène de condensation. Le dépôt sur le substrat est formé à partir d'espèces constituantes (atome, molécules, particules solides, particules liquides).

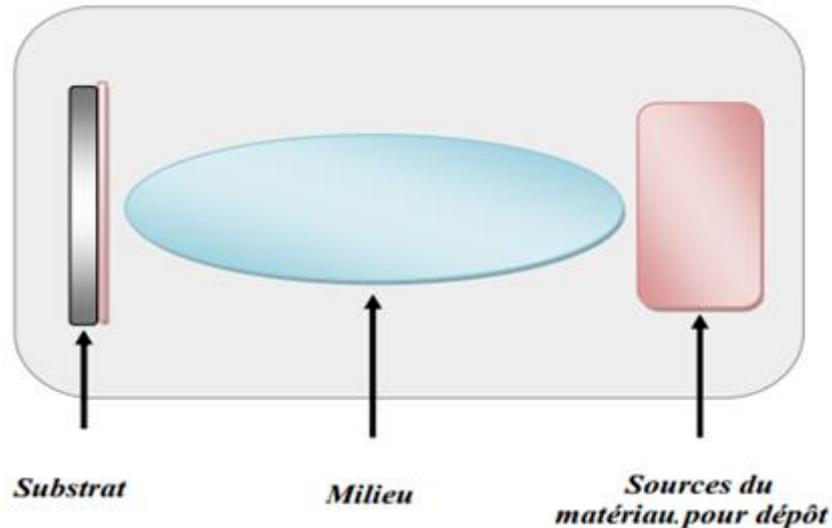


Figure 3-7 : Le procédé du dépôt des couches minces

Les méthodes chimiques se scindent en deux catégories avec :

- Les dépôts en solution (milieu liquide),
- Les dépôts en phase vapeur (milieu de gaz réactif).

Lors d'un dépôt chimique, un fluide précurseur (composé participant à une réaction qui produit un ou plusieurs autres composés) subit une réaction chimique sur la surface solide du substrat, laissant une couche solide. Puisque le fluide recouvre l'ensemble de la surface du solide, le dépôt s'effectue sur toute la surface. Un inconvénient majeur du CVD est le fait que les films sont généralement déposés à des températures élevées. Cela impose certaines restrictions sur le type de substrats qui peuvent être revêtus [129]. On peut citer comme exemples de techniques de dépôts chimiques le revêtement, le procédé sol-gel, l'enduction centrifuge (spin-coating), le dépôt chimique en phase vapeur (ainsi que la variante assistée par plasma), ou encore le dépôt de couche atomique.

Pour les méthodes physiques, on retrouve :

- Les techniques de dépôts classiques de la microélectronique comme la pulvérisation sous toutes ses formes (pulvérisation cathodique magnétron, pulvérisation cathodique réactive et co-pulvérisation),
- L'évaporation par faisceau d'électrons, par effet Joule, par laser ou bien par faisceau d'ions.

Un dépôt physique implique des procédés mécaniques, électromécaniques ou thermodynamiques pour produire une couche mince solide. Le matériau à déposer sur le substrat est placé dans un environnement tel que les particules qui le composent vont pouvoir, sous certaines conditions, s'échapper de sa surface. Le substrat, placé à une température plus basse, récupère de l'énergie de ces particules lorsqu'elles arrivent, ce qui permet la formation d'une couche solide à sa surface. L'ensemble de ce système est maintenu dans une chambre de dépôt sous vide pour plusieurs raisons : Premièrement, cela rend le mouvement des particules plus rapide, et deuxièmement, cela limite la présence intempestive de pollution dans la couche déposée comme par exemple des atomes ou des molécules non désirés présents dans l'atmosphère environnante. On peut citer comme exemples de ces méthodes de dépôt physique

l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, le dépôt laser pulsé, ou encore le dépôt électrohydrodynamique.

Dans le cadre des travaux présentés dans ce mémoire, deux méthodes de dépôts couches minces ont été utilisées de manière complémentaire pour la réalisation des antennes (figure 3-8). Elles ont été mises en œuvre au sein de la salle blanche de l'IETR sur le site de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université de Nantes. Ces deux techniques sont la pulvérisation cathodique (magnétron) et l'électrodéposition. Leur notoriété et leur développement préférentiel sont dus au fait qu'il s'agit de techniques ne nécessitant que des équipements standards de la micro-électronique.

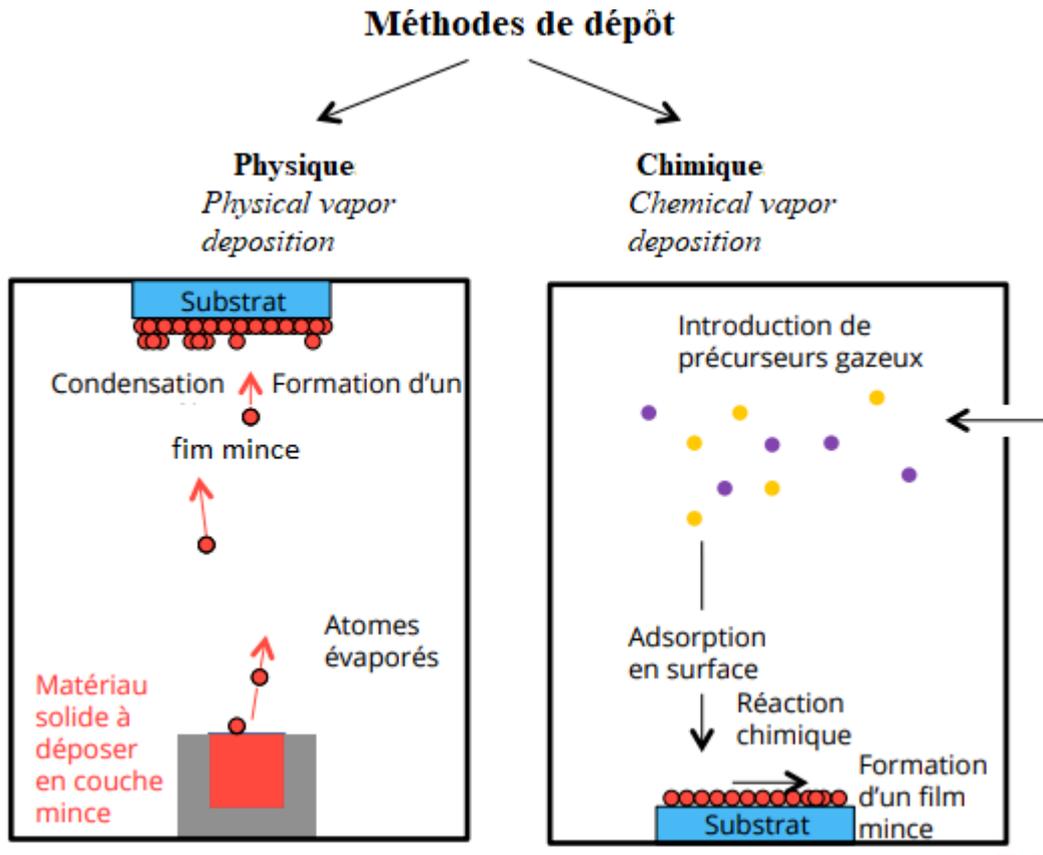


Figure 3-8 : Méthodes de dépôt de couche mince retenues

### 3.3.1. Procédé physique de pulvérisation cathodique

#### 3.3.1.1. Généralités

La pulvérisation cathodique est un processus de fabrication par dépôt de couches minces. Au niveau atomique, la pulvérisation cathodique est un processus par lequel des atomes sont éjectés d'un matériau source cible et déposés sur un substrat comme une plaque de Silicium, un panneau solaire ou un dispositif optique, en bombardant la cible par des particules de haute énergie. Développé en 1970 par Peter J. Clarke, le premier « pistolet à pulvérisation » a catapulté l'industrie des semi-conducteurs dans une nouvelle ère en permettant le dépôt précis et fiable de matériaux à l'échelle atomique en utilisant un flux de plasma chargé d'électrons et d'ions dans un environnement sous vide [130].

Le principe de cette technologie réside dans la création d'une décharge lumineuse entre deux électrodes en y appliquant une différence de potentiel. Cette décharge est appliquée dans une atmosphère raréfiée composée d'un gaz neutre. La neutralité (couche de valence complète), ainsi que le coût font de l'argon le candidat idéal [131]. Le processus de pulvérisation commence alors lorsqu'un substrat à revêtir est placé dans une chambre à vide contenant de l'argon, et qu'une charge négative est appliquée à un matériau source cible, provoquant l'éclat du plasma. Les électrons libres s'écoulent alors du matériau source cible et entrent en collision avec l'enveloppe électronique externe des atomes d'Argon, chassant une partie des électrons en raison de leur charge similaire. Les atomes de gaz inerte deviennent des ions chargés positivement attirés par le matériau cible chargé négativement à une vitesse très élevée, ce qui expulse les atomes de surface du matériau source cible. Ces particules traversent la chambre de dépôt sous vide et se déposent sous la forme d'un film mince de matériau sur la surface du substrat à revêtir. La pulvérisation n'a lieu que lorsque l'énergie cinétique des particules de bombardement est extrêmement élevée (2eV à 100 eV selon le type de source). Cela permet un dépôt de couche mince beaucoup plus pur et précis que ce qui peut être obtenu en faisant fondre un matériau source. Le rendement de pulvérisation peut être contrôlé par l'énergie et l'angle d'incidence des ions de bombardement, les masses relatives des ions et des atomes cibles, et l'énergie de liaison à la surface des atomes du matériau cible.

Plusieurs variantes de pulvérisation cathodique existent, notamment la pulvérisation cathodique par faisceau d'ions, assistée par ions, la pulvérisation cathodique réactive dans un environnement gazeux d'oxygène, le flux de gaz et la pulvérisation cathodique magnétron. La figure 3-9 présente le dispositif de principe de pulvérisation avec différentes sources.

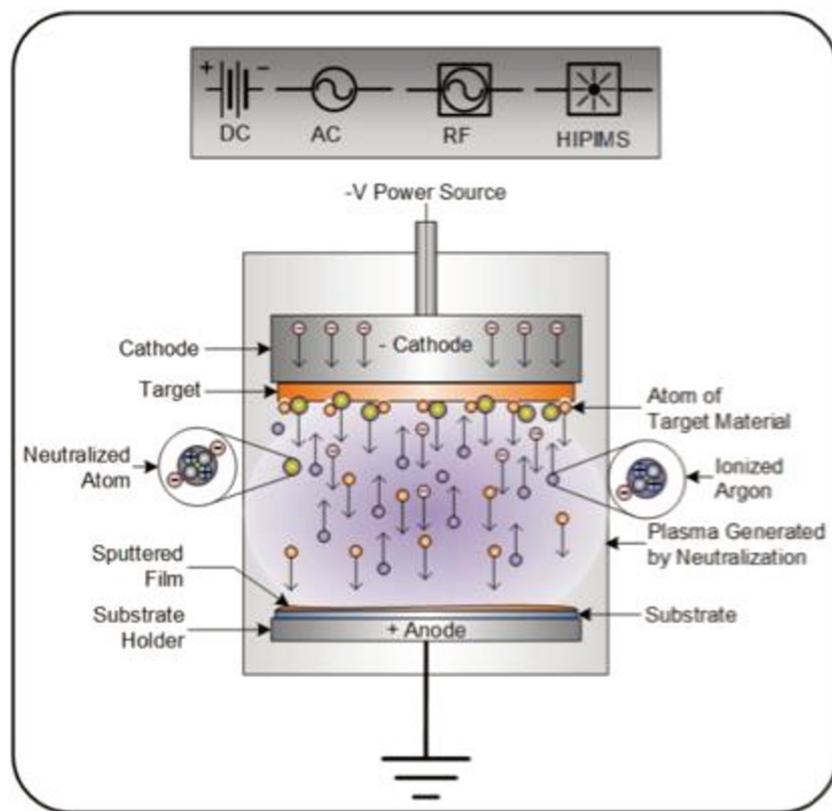


Figure 3-9 : Schéma du processus de pulvérisation cathodique [130]

### 3.3.1.2. Les différents types de pulvérisations cathodiques

Il existe plusieurs techniques de pulvérisation cathodique, nous vous présentons quelques-unes d'entre elles.

#### - La pulvérisation cathodique magnétron

John S. Chapin est crédité d'avoir inventé la première source de pulvérisation magnétron planaire (brevet déposé en 1974). Partant du principe que les ions sont des particules chargées, les champs magnétiques peuvent être utilisés pour contrôler leur vitesse et leur comportement [132].

Pour mettre en œuvre cette technique, on dispose d'une enceinte à vide ( $P= 5.10^{-5}$  mBar), d'une cathode sur laquelle est fixée la cible, d'une anode au niveau de laquelle on place un substrat recevant ce matériau. Le magnétron est constitué de deux aimants concentriques polarisés en sens inverse, générant un champ magnétique parallèle à la surface de la cible (figure 3-10). Ces aimants sont placés derrière la cathode pour contraindre les électrons sur le matériau cible afin d'éviter qu'ils ne bombardent aussi le substrat. Cela permet également des vitesses de dépôt plus importantes [133]. Le champ magnétique piège de manière efficace les électrons près de la surface de la cible augmentant fortement la densité du plasma à cet endroit. Les ions positifs  $Ar^+$  formés dans le plasma vont être accélérés vers la cathode polarisée négativement, conduisant à l'éjection d'atomes de la cible par pulvérisation. Les multiples collisions atomiques déplacent les atomes de la cible dans toutes les directions de l'espace. Ceux-ci vont ensuite diffuser dans l'enceinte et se condenser sur le substrat. Les magnétrons peuvent être alimentés en courant continu ou en radio fréquence.

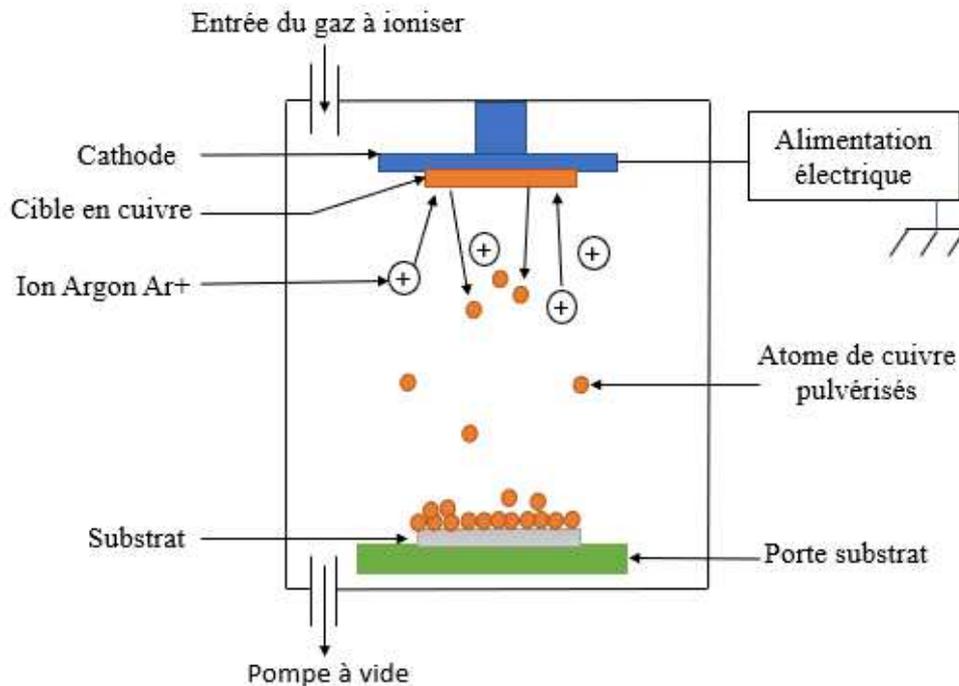


Figure 3-10 : Schéma de principe fonctionnel d'un dépôt par pulvérisation cathodique magnétron

#### - **La pulvérisation cathodique réactive** [134]

La pulvérisation cathodique réactive a pour objectif de permettre l'obtention de films de natures et de propriétés différentes de celles obtenues avec l'argon. Elle se caractérise par l'ajout, dans la chambre à vide, d'un gaz qui subit alors une réaction chimique avec le matériau cible avant d'entrer en contact avec les substrats à revêtir. Il est alors possible d'utiliser un gaz non inerte tel que l'oxygène ou l'azote soit à la place, soit (plus communément) en plus du gaz inerte (argon).

Des gaz comme l'azote ou l'oxygène, stables et inertes dans des circonstances normales, deviennent ionisés et réactifs dans l'environnement du plasma en raison des collisions à haute énergie. Le matériau cible, libéré dans la chambre également sous forme de gaz et exposé à un champ magnétique de haute intensité qui le transforme en ion négatif est attiré par le gaz non inerte réactif chargé positivement [135]. Lorsque cela se produit, le gaz réagit chimiquement avec le nuage d'atomes arrachés au matériau cible et crée un composé moléculaire qui devient le revêtement en film mince. Par exemple, une cible de silicium pulvérisée avec de l'oxygène gazeux va produire un film d'oxyde de silicium, ou avec de l'azote, un film de nitrure de silicium. Ces deux exemples sont largement utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs.

#### - **La co-pulvérisation** [136]

La co-pulvérisation est une technique qui permet de pulvériser deux ou plusieurs matériaux cibles à la fois. Elle est largement utilisée dans les industries du verre optique et souvent avec la pulvérisation magnétron réactive pour produire des films minces composés, tels que des alliages ou des composites. En utilisant la co-pulvérisation réactive de deux matériaux cibles tels que le silicium et le titane, par exemple, avec une double pulvérisation magnétron, l'indice de réfraction ou l'effet d'ombrage du verre peut être contrôlé avec soin et précision sur des applications allant des surfaces à grande échelle telles que le verre architectural des gratte-ciels aux lunettes de soleil, mais aussi aux panneaux solaires.

La pulvérisation cathodique se définit également par les caractéristiques de la source d'énergie. La qualité du dépôt réalisé, la vitesse, l'homogénéité, le type de cible dépendent du type de source utilisée. Ces différentes sources d'énergie sont discutées ci-dessous.

#### **3.3.1.3. Les différents types de sources d'alimentation de pulvérisation cathodique**

Il existe plusieurs types de sources d'énergie utilisées pour bombarder le matériau cible notamment la pulvérisation cathodique DC (Direct Courant) et RF (Radio Fréquence), la pulvérisation DC pulsée, MF (Moyenne fréquence) et les nouvelles techniques de pulvérisation HIPIMS (HIGH Power Impulse Magnetron Sputtering) ...

#### - **La pulvérisation DC** [137] [138]

La pulvérisation à courant continu est le type de pulvérisation le plus classique et le moins coûteux pour le dépôt de métaux et de matériaux cibles de revêtement électriquement conducteurs. La pression de la chambre est généralement comprise entre 1 et 100 mTorr. L'avantage majeur à l'utilisation d'une source continue est qu'elle est plus facile à contrôler qu'une source RF qui possède une alimentation coûteuse.

Par contre, sa principale limitation concerne le dépôt de matériaux non conducteurs car ceux-ci ont tendance à se charger avec le temps, ce qui peut entraîner la formation d'arcs ou l'empoisonnement du matériau cible donc l'arrêt complet de la pulvérisation. Pour surmonter

cette limitation, plusieurs technologies plus complexes ont été développées telles que la pulvérisation RF et la pulvérisation HIPIMS. Cependant, la simplicité relative de la source d'alimentation DC par rapport aux sources d'alimentation RF ou HIPIMS qui nécessitent un câblage et des coûts énergétiques plus élevés, continue d'en faire la solution à faible coût pour de nombreux types de dépôt de métal sous vide comme la pulvérisation d'or et d'autres revêtements électriquement conducteurs. Elle peut aussi être utilisée pour les substrats de grandes tailles.

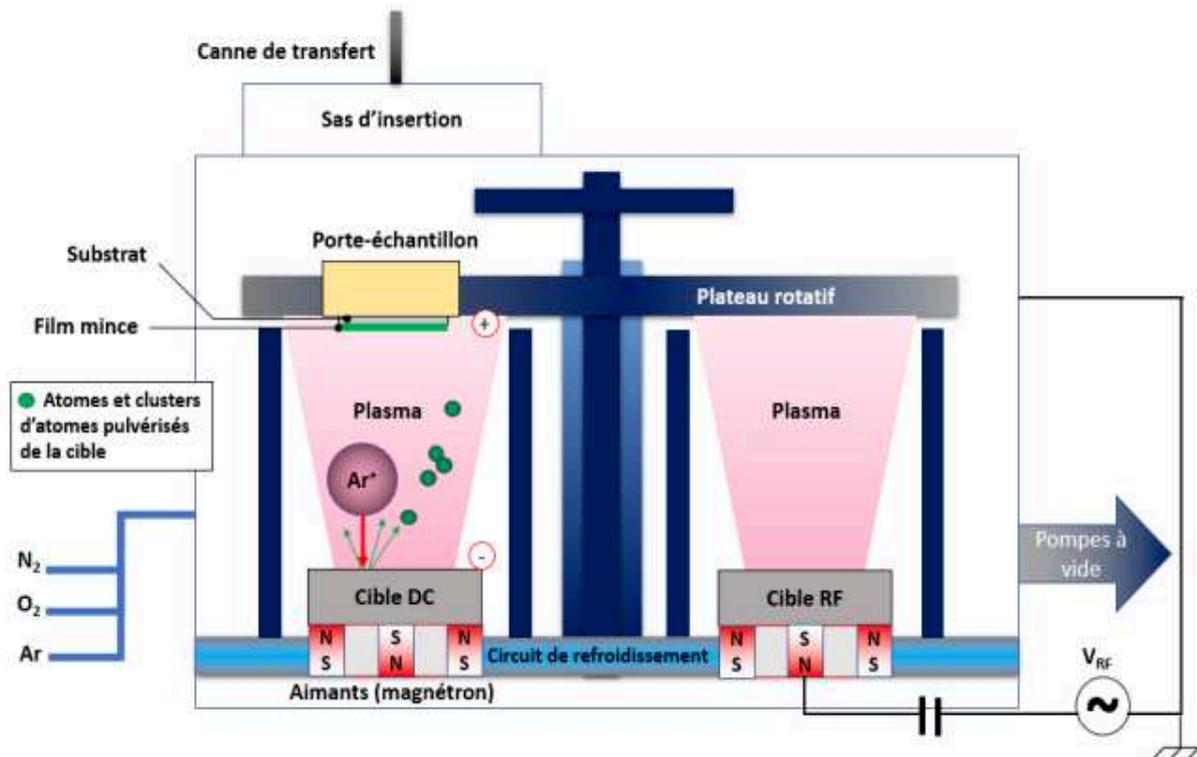


Figure 3-11 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique magnétron DC et RF [139]

Plusieurs méthodes ont donc été développées pour alterner ou pulser la source d'alimentation de pulvérisation afin de « nettoyer », ou neutraliser, la surface cible et ainsi l'empêcher de développer une charge positive.

### - La pulvérisation RF

La pulvérisation RF est la technique qui alterne le potentiel électrique du courant pour éviter l'accumulation des charges à la surface de la cible. Cette alternance permet de nettoyer la surface du matériau cible à chaque cycle. La pulvérisation RF implique deux processus. Dans le premier cycle, le matériau cible est chargé négativement. Cela se traduit par la polarisation des atomes, les atomes de gaz de pulvérisation sont attirés vers la source, où ils éliminent les atomes externes. En raison de la polarisation, les atomes sources et les ions de gaz ionisés restent sur la surface cible. Au deuxième cycle, la cible est chargée positivement. En raison de la polarisation inverse, cela provoque l'éjection d'ions de gaz et d'atomes sources. Ces ions et atomes sont accélérés vers le substrat pour former un dépôt [140].

La pulvérisation cathodique RF diffère de la pulvérisation cathodique DC par la tension mise en jeu, la pression dans l'enceinte, le modèle de dépôt de pulvérisation cathodique et le type idéal de matériau cible. Elle offre plusieurs avantages en fonction de l'application spécifique. Les plasmas RF ont tendance à se désamorcer dans toute la chambre avec un courant plus élevé à une pression plus faible (1-15 mTorr) plutôt que de se concentrer autour de la cathode ou du matériau cible comme avec la pulvérisation DC. La fréquence choisie par convention est de 13.56 MHz [141] [142]. Un autre avantage de la pulvérisation RF est qu'il n'y a pas d'effet d'anode qui disparaît lorsque le substrat à revêtir devient isolé et acquiert une charge comme avec la pulvérisation DC. Lorsque vous essayez de pulvériser de manière réactive un revêtement diélectrique avec une pulvérisation DC, l'anode peut être recouverte d'un revêtement isolant et disparaître. Ce phénomène est appelé effet « d'anode disparaissant ».

La pulvérisation RF utilise des ondes radio au lieu du courant continu, ce qui nécessite une tension beaucoup plus élevée pour obtenir les mêmes résultats de dépôt qu'avec le courant continu. Les densités d'électrons sont de  $10^9$  à  $10^{11}$   $\text{cm}^{-3}$  [140]. Elle est utilisée pour les substrats de petites tailles en raison de son coût élevé. Ces alimentations haute tension sont coûteuses et sont source de surchauffe.

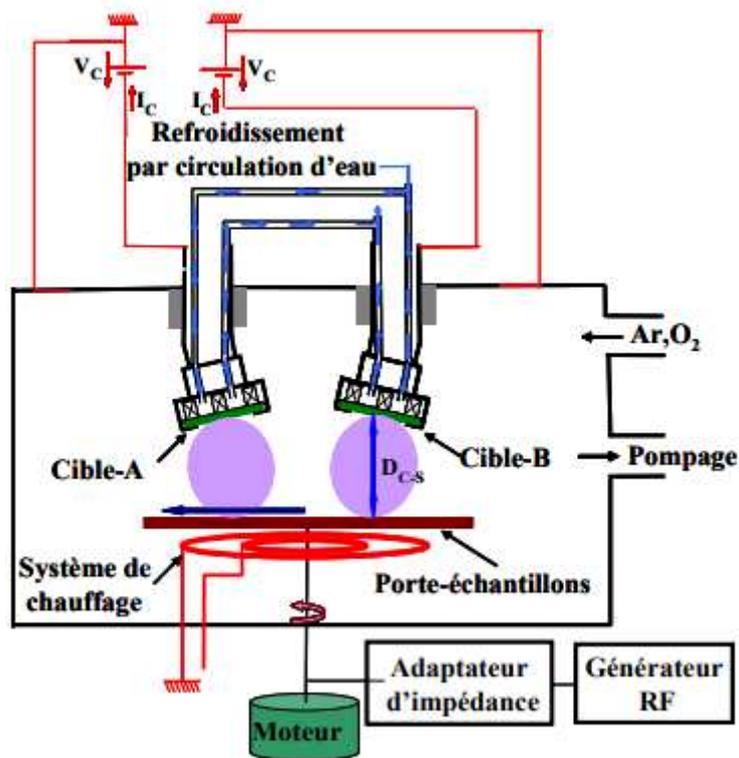


Figure 3-12: Schéma de principe de la pulvérisation cathodique magnétron RF [143]

- **La pulvérisation cathodique DC pulsée** [144] [138]

La pulvérisation DC pulsée, avec une gamme de fréquences variables de 40 à 200 kHz, est une technique de dépôt physique en phase vapeur avec une large gamme d'applications dans les industries des semi-conducteurs, des revêtements optiques et industriels. Elle est

particulièrement efficace pour la pulvérisation de métaux et de revêtements diélectriques. Elle est le plus souvent utilisée avec la pulvérisation réactive, notamment pour des matériaux diélectriques réputés "difficiles" comme l'alumine, le titane et la silice avec des taux (ou vitesse) de dépôts élevés qui sont impossibles à utiliser avec la pulvérisation DC directe seule. Les principaux avantages de la pulvérisation DC pulsée par rapport à la pulvérisation DC conventionnelle est qu'elle réduit ou élimine considérablement la formation d'arcs et, par rapport à la pulvérisation RF, à des fréquences de pulsation et des cycles de service optimaux, des taux de dépôt de couches minces plus élevés peuvent être obtenus sans les problèmes d'arc électrique qui entraînent des problèmes de contrôle qualité coûteux.

#### - **La pulvérisation HIPIMS**

En octobre 2001, une méthode appelée HIPIMS (HIgh-Power Impulse Magnetron Sputtering) a été introduite et a remporté le prix du brevet américain [138]. En effet, une limitation de la pulvérisation cathodique conventionnelle est liée au refroidissement de la cible puisque la plupart de la puissance électrique apportée se transforme en énergie thermique. Avec la pulvérisation HIPIMS, des courants instantanés très élevés peuvent être générés tout en maintenant un échauffement réduit de la cible du fait de l'utilisation d'impulsions de courtes durées (quelques dizaines de microsecondes à une fréquence inférieure au kHz). Des dépôts sur des substrats plus sensibles à la température peuvent alors être réalisés en raison du plasma plus froid. La méthode HIPIMS a été développée avec succès pour produire de hautes densités de plasma de l'ordre de  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  [145] et obtenir des plasmas métalliques hautement ionisés. La densité de puissance peut alors atteindre des niveaux de l'ordre de  $2800 \text{ W/cm}^2$ , à comparer à environ  $4 \text{ W/cm}^2$  pour des systèmes magnétrons conventionnels, ce qui engendre des dépôts plus denses que ceux réalisés par les techniques conventionnelles. Par exemple, la densité rapportée pour le film mince de carbone déposé par HIPIMS est de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  tandis que la densité rapportée pour le film mince déposé par pulvérisation magnétron DC est de  $2 \text{ g/cm}^3$  [138]. Dans ce cas, l'énergie des ions se situe entre 50 et 100eV à comparer à des ordres de grandeurs de 2eV à 10eV pour la/les technique(s) conventionnelle(s). Ces ions hautement énergétiques permettent de compacter la couche au fur et à mesure de sa croissance. De plus, les couches obtenues ont de meilleures propriétés d'adhérence du fait que les ions créés ont une énergie suffisante pour s'implanter légèrement dans la surface du substrat. La vitesse de dépôt s'avère généralement plus faible que celle obtenue conventionnellement à la même puissance [146]. Les débits sont typiquement de l'ordre de 25 à 35 % des débits conventionnels de pulvérisation magnétron DC [147].

Il y a deux principaux inconvénients avec la pulvérisation HIPIMS. L'un est qu'elle exige une puissance plus élevée pour des taux de dépôt équivalents que la pulvérisation magnétron conventionnelle. L'énergie requise pour des taux de dépôt équivalents par rapport à la pulvérisation magnétron conventionnelle se situe dans la plage de 30 à 80 % de plus. La formation d'arcs sur la cathode ou la surface cible est un autre problème [138].

## - **La pulvérisation cathodique MF [148]**

La pulvérisation cathodique moyenne fréquence est devenue la technique de dépôt en couche mince de choix pour de nombreux types de processus de dépôt physique en phase vapeur en raison de ses niveaux de puissance inférieurs par rapport à des sources d'alimentation plus compliquées et coûteuses comme la pulvérisation RF, d'une stabilité de processus améliorée, des taux de dépôt accrus qui permettent des revêtements personnalisables avec la co-pulvérisation de gaz réactifs, ainsi que pour surmonter l'effet "disparition de l'anode".

Cette technique est généralement utilisée pour déposer des revêtements non conducteurs en couches minces. C'est devenu un pilier des technologies de pulvérisation cathodique à couches minces, en particulier pour le dépôt de revêtements diélectriques sur des surfaces telles que des panneaux solaires, du verre optique tel que des miroirs de télescope ou des rouleaux de plastique. Elle remplace très souvent la pulvérisation RF pour les revêtements diélectriques car elle fonctionne dans la gamme kHz (entre 20 et 70 kHz, 40 kHz étant le plus couramment utilisé), plutôt que MHz, nécessitant des sources d'alimentation moins sophistiquées et coûteuses. Ces alimentations couvrent une large gamme de tensions (entre 300 V et 1200 V) et de puissance (de 25 à 300 kW). C'est un processus fréquemment utilisé avec la pulvérisation réactive.

### **Conclusion et choix**

Plusieurs types de pulvérisations cathodiques ont été présentés, chacun a ses avantages selon le besoin de réalisation et la disponibilité. Dans ces travaux, les pulvérisations cathodiques magnétron DC et RF sont les solutions qui ont été utilisées pour le dépôt des métallisations sur verre du fait de leur disponibilité au sein du laboratoire.

#### **3.3.1.4. Dépôt de couches minces de cuivre/titane par pulvérisation cathodique magnétron**

Pour la réalisation des antennes sur verre, nous avons choisi de déposer des couches minces de cuivre sur substrat de verre Borofloat 33 par pulvérisation cathodique magnétron. Les paramètres gouvernant le dépôt de couches minces par pulvérisation sont : la pression et la composition du gaz partiel, la puissance appliquée sur la cible, la tension de polarisation du porte-substrat, la densité de courant, l'angle d'incidence des particules de bombardement et la présence ou non de champs magnétiques.

Le métal utilisé pour fabriquer les antennes planaires à faible impact visuel est le cuivre grâce son faible coût et sa bonne conductivité. Cependant, le cuivre adhère peu à la surface du substrat de verre, alors une couche de titane de 5nm à 10nm d'épaisseur est déposée au préalable comme couche d'accrochage. Le titane au contraire s'oxyde très facilement au contact du substrat pour former des liaisons covalentes avec ce dernier et reste à l'état métallique à sa surface pour former des liaisons métalliques avec le cuivre. La bicouche titane/cuivre assure donc une bonne adhérence de l'ensemble. Les conditions de dépôt sont regroupées dans le Tableau 3.1. Le bâti de pulvérisation cathodique magnétron AC 450 de la société Alliance Concept est présenté figure 3-13.

Les travaux commencent d'abord par la mise sous vide et le nettoyage de l'enceinte. Durant tout le processus, le gaz utilisé est de l'argon. Avant la pulvérisation proprement dite, une pré-pulvérisation est faite et permet d'enlever la couche d'oxyde de cuivre présente à la surface de la cible de cuivre. Cette étape est nécessaire afin de pouvoir déposer du cuivre pur sur le substrat. Cette étape dure environ 3mn. La pulvérisation est ensuite effectuée dans les

mêmes conditions que la pré-pulvérisation mais le balayage est fait pour uniformiser la couche de dépôt sur toute la surface du substrat. Elle dure 20mn pour une couche d'environ 400nm.

La configuration technique de la machine permet de mettre quatre matériaux sur quatre cibles différentes avec deux sources : une source DC et une source RF. On peut donc attribuer un générateur à chaque cible (cuivre ou titane). Nous avons attribué le générateur DC pour le dépôt du titane et le générateur RF pour le cuivre. En effet, en général, le générateur DC est utilisé pour les métaux et le générateur RF pour les isolants et les métaux. Par contre, la vitesse de dépôt des métaux en RF est plus lente. On attribue donc le métal qui se dépose le plus vite au générateur RF, d'où le choix du cuivre en RF.

Si on fait le choix d'utiliser un seul générateur pour les deux cibles, par exemple le générateur DC, nous devons ouvrir la machine en cours de process et changer la cible de titane pour mettre à la place le cuivre, ce qui va casser le vide de l'enceinte et exposer notre échantillon à l'air. Une remise à l'air de l'enceinte pour changer une cible prend énormément de temps, il faut compter au minimum 3h pour remettre sous vide l'enceinte après son ouverture avant de pouvoir faire un nouveau dépôt. Le titane va s'oxyder au contact de l'air pour créer un oxyde de titane  $TiO_2$  de quelques nanomètres d'épaisseur, ce qui modifie la surface et ne permet pas une bonne accroche du cuivre par la suite.

| <b>Cible</b>              |                  |
|---------------------------|------------------|
| Nature                    | Cu / Ti          |
| Emplacement               | 1 / 4            |
| Type de dépôt             | RF / DC          |
| <b>Condition de dépôt</b> |                  |
| <b>Pompage</b>            |                  |
| Pression de pompage       | $5.10^{-5}$ mBar |

| <b>Pré Pulvérisation Ti/Cu</b> |  |
|--------------------------------|--|
| Puissance                      | 65W  |
| Pression de travail            | 5.10 <sup>-3</sup> mBar                        |
| Type de dépôt (DC ou RF)       | RF / DC  |
| Gaz 1                          | Ar   |
| Débit 1                        | 50sccm (Standard Cubic Centimeters per Minute) |
| Mouvement                      | Aucun  |

| <b>Pulvérisation Ti/Cu</b>      |                         |
|---------------------------------|-------------------------|
| Puissance                       | 65W                     |
| Pression de travail             | 5.10 <sup>-3</sup> mBar |
| Gaz 1                           | Ar                      |
| Débit 1                         | 50sccm                  |
| Gaz 2                           | Aucun                   |
| Débit 2                         | Aucun                   |
| Mouvement                       | Balayage 30° - 3rpm     |
| Temps (Ti)                      | 2min                    |
| Temps (Cu)                      | 15min                   |
| Vitesse de dépôt (Ti)           | 6nm/min                 |
| Vitesse de dépôt (Cu)           | 18nm/min                |
| Nom du programme (dépôt titane) | 1-IETR-STPEH-C4         |
| Nom du programme (dépôt cuivre) | 1-IETR-STEPH – RF-Cu    |

| <b>Amorçage RF C4 avec cathode DC C1</b>          |                        |
|---|------------------------|
| <b>Paramètre générateur DC cathode 4 cible Ti</b> |                        |
| Puissance   | 65W DC                 |
| Pression de travail                               | $5 \cdot 10^{-3}$ mBar |
| Gaz 1   | Ar                     |
| Débit 1   | 50sccm                 |
| Mouvement   | Aucun                  |
| Temps   | 30s                    |
| Cache   | Fermé                  |
| <b>Paramètre générateur RF cathode 1 cible Cu</b> |                        |
| Puissance   | 65W RF                 |
| Pression de travail                               | $5 \cdot 10^{-3}$ mBar |
| Gaz 1   | Ar                     |
| Débit 1   | 50sccm                 |
| Mouvement   | Aucun                  |
| Temps   | 30s                    |
| Cache   | Fermé                  |

*Tableau 3-3 : Paramètres de dépôt d'une couche de cuivre par pulvérisation cathodique*

Un autre avantage non négligeable d'utiliser le cuivre en RF est qu'on peut obtenir des films de cuivre épais d'une centaine de nm avec moins de contraintes car le film va mieux adhérer et le risque de décollement est moindre.



*Figure 3-13 : Bâti de pulvérisation cathodique magnétron AC450 de la société Alliance Concept*

Cette pulvérisation a permis de déposer des couches (titane + cuivre) d'épaisseur comprise entre 300nm à 500nm. L'objectif est d'obtenir une couche conductrice de cuivre d'environ 6 $\mu$ m. Il faut donc épaissir la couche de cuivre précédemment déposée par pulvérisation cathodique magnétron. La technique utilisée pour réaliser cet épaississement est l'électrodéposition.

### **3.4. Procédé chimique d'épaississement de la couche métallique par électrodéposition**

Le dépôt de cuivre est un procédé extrêmement ancien et bien connu, découvert par Michael Faraday, physicien anglais au XVI<sup>ème</sup> siècle. L'électrodéposition, (ou dépôt électrolytique) consiste à appliquer une fine couche d'un métal sur un métal différent pour modifier ses propriétés de surface [149]. Elle est appliquée dans de nombreuses industries afin de réaliser des métallisations, par exemple contre la corrosion. En effet, le dépôt électrolytique simple est maîtrisé et peut être réalisé à partir d'une large gamme d'électrolytes, les principaux étant le sulfate acide, le cyanure, le pyrophosphate et le fluoborate [150].

Dans le cadre de ces travaux, le bain à base de sulfate a été choisi car il est facile à mettre en œuvre et demande peu de maintenance.

#### **3.4.1.1. Principe**

Un courant électrique est établi à travers une solution électrolytique contenant des ions du métal à déposer, entre une électrode métallique et le substrat. Le dépôt métallique ne peut se réaliser que si une couche métallique adéquate (appelée « seed layer ») est déjà présente à la surface du substrat. Le dépôt va seulement s'effectuer sur les parties du substrat recouvertes de cette couche métallique initiale. Les épaisseurs obtenues avec cette technique vont de quelques  $\mu$ m à plusieurs centaines de  $\mu$ m. La vitesse de dépôt et l'uniformité des dépôts dépendent de la densité du courant, de la composition, de l'agitation et de la recirculation de l'électrolyte, du

type de source (continue, pulsée), etc. [151]. Les métaux les plus fréquemment utilisés pour l'électrodéposition sont l'étain, le cadmium, le chrome, le cuivre, l'argent, le plomb, le nickel, l'or et le zinc [152].

Le procédé d'électrodéposition s'effectue en plusieurs étapes. Les pièces sont nettoyées (dégraissage, décapage, etc.) dans différents bassins de compositions variables. Un rinçage à l'eau entre chaque phase est souvent nécessaire afin d'éviter la mise en contact de substances chimiques non compatibles et la contamination des bassins.

### 3.4.1.2. Montage et cellule expérimentale

La figure 3-14 représente le montage utilisé dans le cadre de cette étude. Ce montage est constitué d'une cellule électrochimique contenant l'électrolyte à base de sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  qui se dissout pour former une solution d'ions  $\text{Cu}_{(\text{aq})}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})}$ ) et d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Dans cette solution sont plongées deux électrodes connectées à une source d'électricité : un barreau en cuivre pur joue le rôle de l'anode et l'échantillon à recouvrir celui de la cathode. Il s'agit ici d'une plaque en verre métallisée avec une couche de cuivre par pulvérisation cathodique d'une épaisseur de l'ordre de 400 nm. Le montage comprend aussi un générateur servant à appliquer une tension pour que la réaction ait lieu et un agitateur afin d'homogénéiser la solution en maintenant les concentrations constantes.

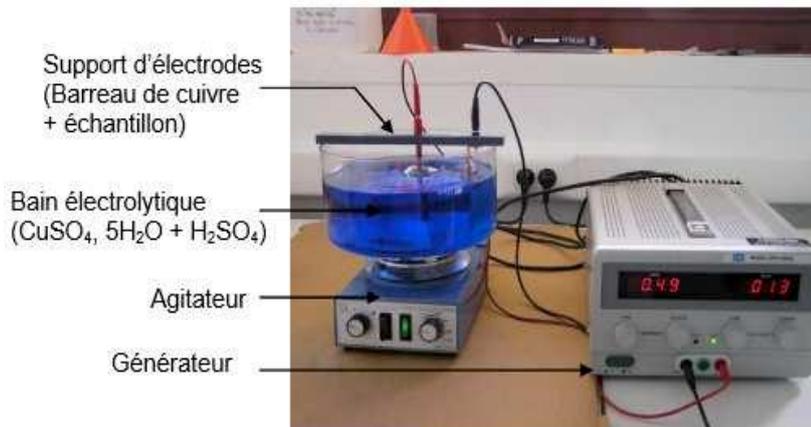
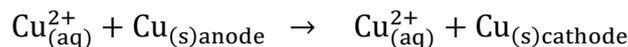


Figure 3-14 : Station d'électrodéposition de cuivre

Sous l'action du courant électrique (5V/0.5A pendant 10 min), le barreau de cuivre pur (pureté 99.995%, diamètre 6 mm, longueur 100 mm, de chez Neyco) est oxydé en cations. Les ions métalliques se déposent sur l'objet et forment une pellicule métallique. Le bilan de la réaction de l'électrolyse est :



La composition du bain électrochimique est résumée dans le tableau 3-2.

|          | Eau distillée | Sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) | Acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). |
|----------|---------------|---|---|
| Quantité | 0.58 L        | 112 g   | 105 mL  |

Tableau 3-4 : Composition du bain électrochimique

Le dépôt se fait sur la face 1 puis sur la face 2 sans protection, comme pour la pulvérisation.

La figure 3-15 montre l'échantillon avant et après électrodéposition.



*Figure 3-15 : Echantillon : (a) Observation de la couche de cuivre déposé par pulvérisation cathodique magnétron avant électrodéposition, et (b) Observation de la couche de cuivre déposé par pulvérisation cathodique magnétron après électrodéposition*

Cette étape d'électrodéposition nous a permis d'atteindre  $6,5\mu\text{m}$  d'épaisseur cuivre/titane déposé sur le substrat.

### **3.5. Mise en forme des antennes grillagées : Réalisation du maillage par photolithographie et gravure chimique par voie humide**

#### **3.5.1. La photolithographie**

##### **3.5.1.1. Principe et grandes étapes**

La photolithographie consiste à reproduire l'image d'un masque sur un substrat métallisé préalablement recouvert d'une résine photosensible. Cette couche subit une transformation chimique sous l'effet d'un rayonnement ultra-violet ; la zone insolée va voir sa solubilité augmenter ou diminuer suivant le type de résine ; cette phase est la révélation. La partie du substrat mise à nu pourra subir des traitements divers : gravure, dépôt, implantation d'ions... [153]

Les techniques de photolithographies peuvent être classées en lithographie par contact et en lithographie par projection (figure 3-16). Dans la lithographie par contact, le masque est placé contre la résine à insoler. Dans la lithographie par projection, une optique est intercalée entre le masque et le wafer [154].

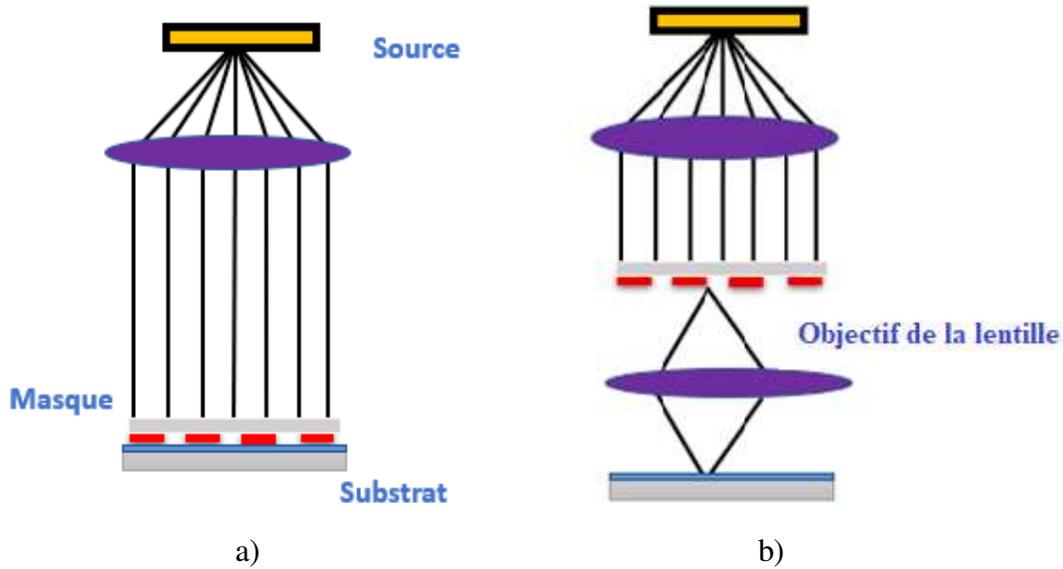


Figure 3-16 : Lithographie a) par contact b) par projection

### Génération d'un masquage

L'exposition des parties non protégées par le masque aux rayons UV crée des réactions au sein de la résine et engendre des modifications chimiques, les zones irradiées vont voir leur solubilité évoluer suivant le type de résine. Les solvants spécifiques contenus dans le développeur vont ensuite permettre d'éliminer la résine exposée ou non selon sa solubilité et ainsi mettre à nu la dernière couche mince déposée sur le substrat. Pour les résines à tonalité positive, la zone exposée est retirée lors du développement (partie opaque = partie protégée à la lumière), alors que pour les résines à tonalité négative, la partie exposée devient insoluble dans le développeur (partie opaque = partie exposée à la lumière) [155].

Lorsqu'une partie de la résine positive est exposée aux UV, celle-ci va devenir soluble lors du développement. La résine positive est donc idéale s'il faut graver des rubans. A contrario, exposer une partie de la résine négative aux UV rendra cette même partie moins soluble lors du développement. La résine négative est donc le meilleur choix lorsqu'il faudra uniquement obtenir des tranchées de résine sur le substrat (figure 3-17).

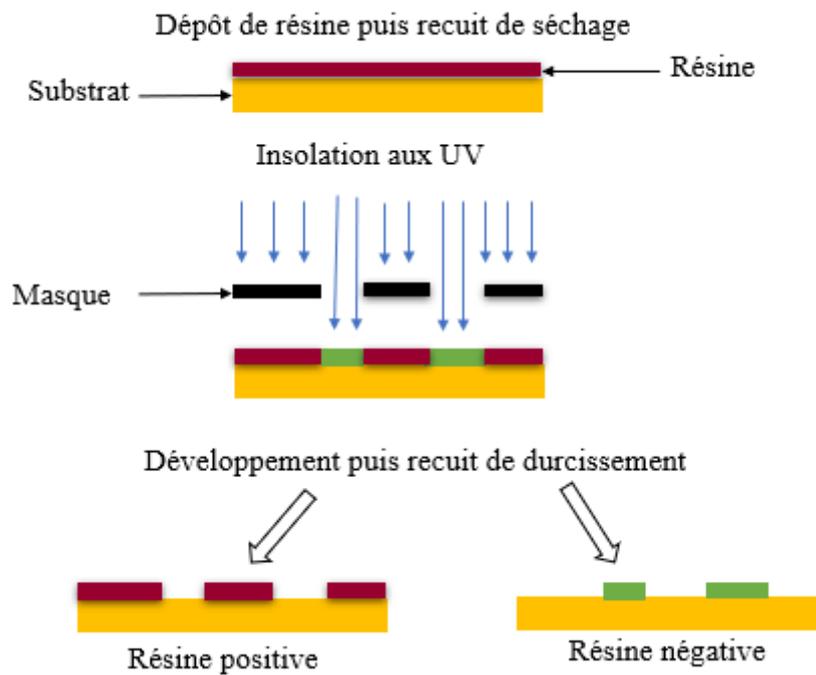


Figure 3-17 : Comportement des résines positives et négatives lors d'une lithographie

Une résine photosensible positive a été utilisée dans le cadre des travaux décrits dans ce manuscrit, elle est composée de trois matériaux :

- Une matrice, qui procure à la résine ses propriétés mécaniques et physiques, c'est la matrice qui détermine la vitesse de dissolution de la résine.
- Un solvant, qui détermine la viscosité de la résine, et par donc son épaisseur après enduction sur le substrat.
- Un composé photoactif, peu soluble, dans le développeur et qui explique la nécessité d'insoler la résine avant de la développer.

Le composé actif de la résine positive est la diazonaphthoquinone ( $C_{10}H_6N_2O$ ) principalement active dans le proche UV, c'est-à-dire pour des longueurs d'onde comprises entre 300nm et 450nm. Une fois insolée, la diazonaphthoquinone va réagir avec l'eau présente dans l'atmosphère pour produire des molécules de diazote et un acide carboxylique (figure 3-18).

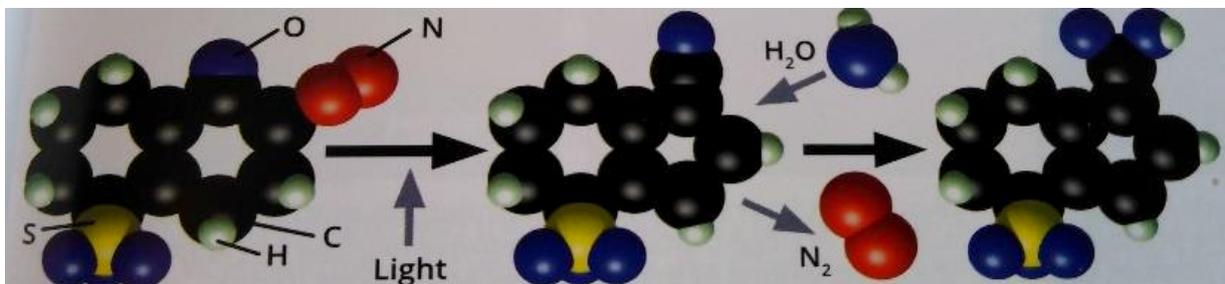


Figure 3-18 : Réaction dans une résine positive après exposition UV

L'étape suivante, dans le cas d'une gravure, va être d'éliminer la couche de résine et de métal du substrat dans toutes les régions non recouvertes de résine, les motifs du masque seront

alors reproduits. Les photorésines doivent donc posséder deux qualités essentielles, offrir une bonne réponse à l'exposition radiative afin d'assurer la reproduction fidèle et précise de l'image du masque et protéger efficacement le substrat durant la gravure ou l'implantation, ce qui implique une certaine résistance aux agents utilisés (acides, plasmas...). Dans le cas de la gravure chimique, la résine doit donc posséder une épaisseur suffisante.

La résistance de la résine à la gravure définit sa capacité à supporter le procédé de gravure sans être détériorée. Les résines doivent développer une bonne résistance à la gravure pour remplir pleinement leur rôle. Si cette résistance est généralement bonne dans le cas des gravures humides, il n'en est pas de même pour les gravures sèches, beaucoup plus agressives.

### Dépôt de résine

Le dépôt de résine, est réalisé par enduction centrifuge (spin coating). Le procédé comprend cinq étapes principales [156] :

- Dépôt de la résine sur la plaquette immobile ou en rotation à faible vitesse (1500 tr/min). Le second mode offre l'avantage d'homogénéiser le volume de résine au centre du substrat (diamètre, épaisseur) et d'éliminer aussitôt le surplus de résine,
- Répartition de la résine sur la totalité de la surface de la plaquette par mise en rotation (20 000 tr/min). L'évaporation rapide du solvant diminue sensiblement la viscosité de la résine dont dépend directement l'épaisseur du film. Il est par conséquent nécessaire de veiller à ce que le délai d'étalement de la résine soit court,
- Augmentation de la vitesse de rotation afin d'éliminer le surplus de résine, puis rotation à vitesse constante afin d'établir l'épaisseur de la résine ; l'épaisseur de résine est assujettie à la vitesse de rotation, entre 2000 et 7000 tr/min.
- Rotation durant un temps déterminé pour permettre l'évaporation du solvant. Durant la rotation à grande vitesse, la plus grande partie du solvant contenu s'évapore pour finir par produire un film solide. La qualité du film dépend essentiellement de la présence ou non de défauts (comètes, poussières, manques, etc.) et de l'uniformité de son épaisseur (variations d'épaisseur, symétrie, etc.).

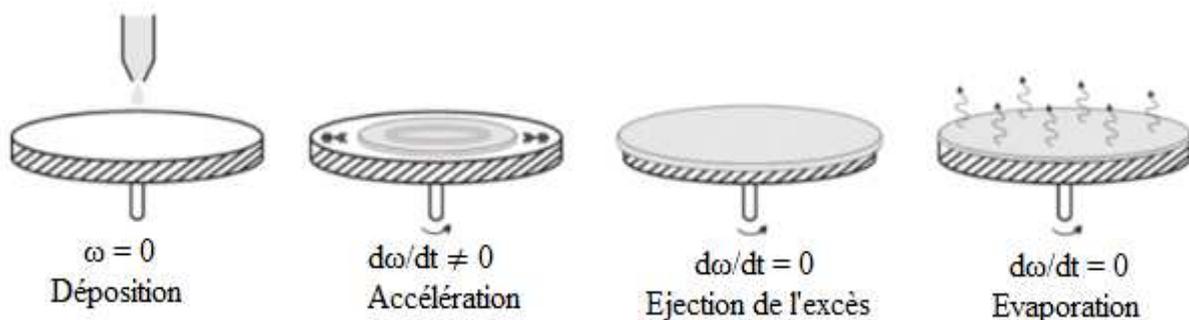


Figure 3-19 : Schéma simplifié du procédé d'enduction centrifuge [157]

Il existe une autre technologie (slit coating) utilisée pour déposer la résine sur les très grands substrats, comme ceux des écrans plats génération 5 et au-dessus (1100 mm×1250-1300 mm et plus). Puisqu'il est pratiquement difficile de faire tourner rapidement sur eux-mêmes les substrats de grandes dimensions, une résine plus visqueuse est utilisée. Elle est distribuée sur le substrat par une série de micro-buses disposées sur un axe qui se déplace le long du substrat. Cette méthode d'application a l'avantage de consommer moins de résine que l'enduction centrifuge. Enfin, une méthode hybride (slit/spin), combinant l'application par

micro-buses et une planarisation par centrifugation, est utilisée jusqu'à la génération 6 (1500 mm×1800 mm).

### Cuisson après dépôt [156]

Cette étape succède immédiatement au dépôt de la résine. Elle assure l'élimination rapide d'une partie des solvants et la polymérisation de la matrice. Le taux de solvant passe ainsi de 20 - 30 % après le premier séchage à 4 - 7 %. Le taux de solvant résiduel influe notamment sur le développement : plus ce taux est faible et plus la dissolution de la résine est rapide.

Le chauffage peut s'effectuer selon différents modes. Le plus employé utilise un système de plaques chauffantes (hot-plates) sur lesquelles sont disposés les substrats. La température est d'environ 110 °C, la durée du cycle est très courte (30s - 60s) et ajustée pour atteindre le taux de solvant désiré. Le principe de chauffage par hot-plate se décline en deux variantes : celle par contact, où la transmission de chaleur se fait par conduction, et celle par proximité, où cette fois la plaquette reste positionnée à faible distance de la hot-plate, la transmission se faisant par convection.

#### 3.5.1.2. Etapes pratiques de réalisation des antennes

**Etape 1 :** Le substrat verre est nettoyé dans un bain d'acétone aux ultrasons puis dans un bain d'éthanol. Il subit par la suite une déshydratation à 100°C sur une plaque chauffante pendant 5 min.

**Etape 2 :** Trois vitesses croissantes imposent à la résine trois accélérations et rendent la surface de la résine la plus homogène possible.



Figure 3-20 : Spin-coater pour enduction de la résine

L'enduction de la résine photosensible positive (Shipley S1828G2) se passe donc en 3 étapes suivant le cycle ci-dessous figure 3-21), sur une durée totale de 33s. Le tableau résume ces différentes étapes.

| Etape n° | Vitesse d'accélération (tr/min) | Temps d'accélération (seconde) | Temps de stabilisation (seconde) |
|----------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 1        | 0 à 1000                        | 1                              | 1                                |
| 2        | 1000 à 1500                     | 1                              | 1                                |
| 3        | 1500 à 2000                     | 1                              | 28                               |

Tableau 3-5 : Étapes d'enduction de la résine photosensible positive (Shipley S1828G2)

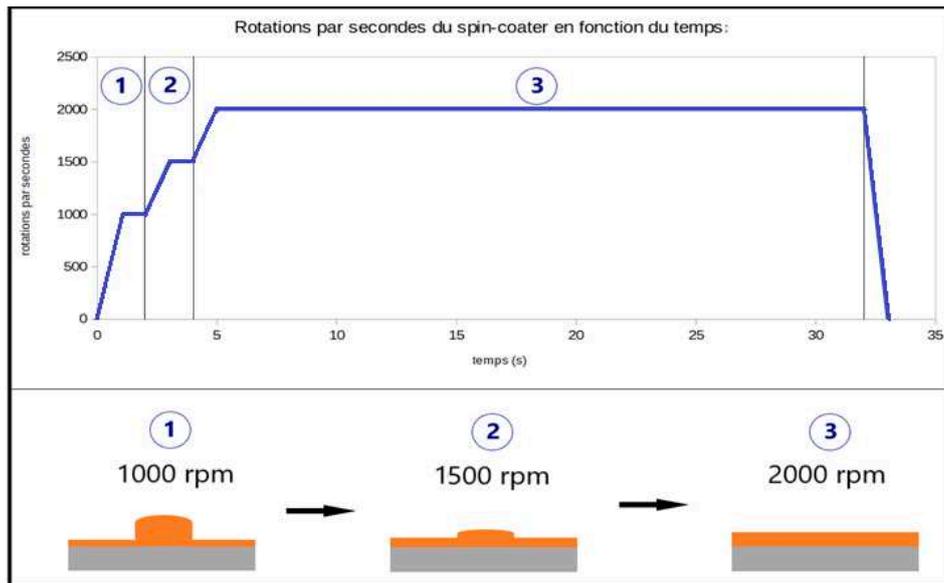
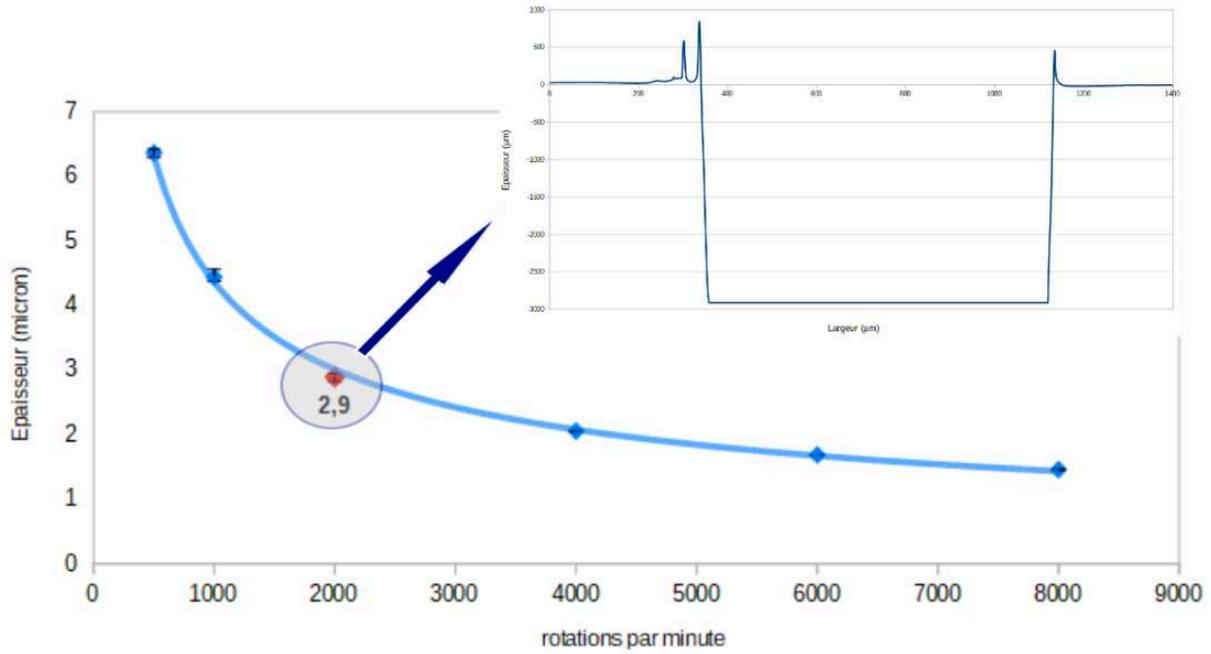


Figure 3-21 : Rotation par seconde du spin-coater en fonction du temps

En faisant varier la vitesse de rotation du palier 3, il est alors possible d'étalonner l'épaisseur de la résine positive S1818G2 en fonction de la vitesse de rotation (figure 3-22).



*Figure 3-22: Variation de l'épaisseur de la résine S1818G2 en fonction de la vitesse de rotation du spin coater – mesure profilométrique de la résine (épaisseur de 2,9 $\mu$ m à 2000tr/min)*

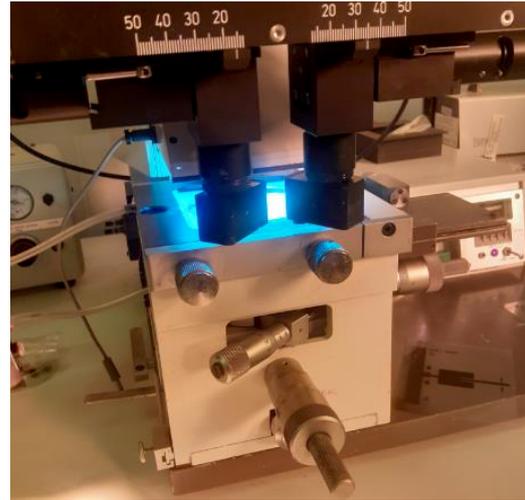
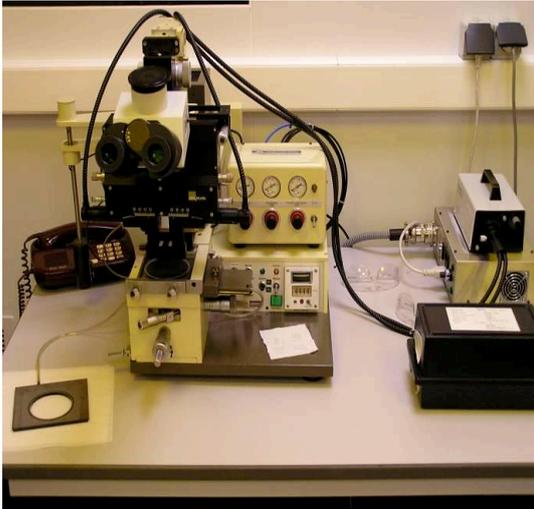
**Étape 3 :** Recuit de la résine à 100°C sur plaque chauffante pendant 3 min. Cette étape provoque l'évaporation du solvant organique et une meilleure adhésion de la résine pour la protection du cuivre lors de la gravure.



*Figure 3-23 : Recuit de la résine sur plaque chauffante à 100°C après son enduction*

Remarque : Les étapes 2 et 3 sont reprises pour la face 2.

**Étape 4 :** Une insoleuse aligneur de masque MJB3 de Karle Zuss permet d'aligner le substrat et le masque et ensuite d'insoler la résine par rayonnement ultraviolet (UV). La durée d'exposition aux UV est de 35s. (figure 3-24).

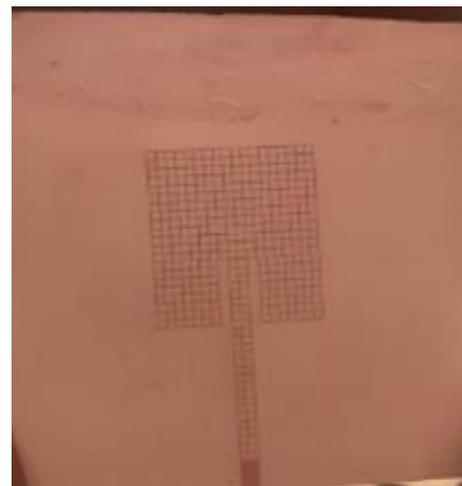


*Figure 3-24 : Aligneur de masque MJB3 Karl Suss pour insolation UV des résines photosensibles non masquées*

**Etape 5 :** L'échantillon est plongé dans une solution développeur MF351 dilué à l'eau déionisée (EDI) pendant 45s puis rincé à l'eau déionisée.



a)



b)

*Figure 3-25 : L'échantillon a) dans la solution développeur MF351 b) à la sortie de la solution développeur, dissolution de la résine, motif visible*

Une gravure chimique des couches minces de cuivre et de titane est ensuite réalisée de manière sélective. La résine sert à protéger les parties métalliques que l'on souhaite laisser intactes. Les deux procédés (photolithographie et gravure) permettent de transférer la géométrie des antennes à la surface du substrat.

### 3.5.2. Gravure chimique

#### 3.5.2.1. Généralités

Dans le cas de la métallisation de substrat par couche mince, la gravure est réalisée par le biais d'un agent chimique liquide (gravure "humide") ou d'un plasma (gravure "sèche") qui enlève la couche de la métallisation dans les zones qui ne sont pas protégées par la résine photosensible. Des techniques de gravure sèche sont généralement utilisées dans la fabrication de semi-conducteurs car elles peuvent être rendues anisotropes, afin d'éviter une sous-gravure importante du motif de résine photosensible. Ceci est essentiel lorsque la largeur des caractéristiques à définir est similaire ou inférieure à l'épaisseur du matériau à graver (c'est-à-dire lorsque le rapport d'aspect approche l'unité). Les procédés de gravure humide sont généralement de nature isotrope, ce qui est souvent indispensable pour les systèmes micro électromécaniques [158].

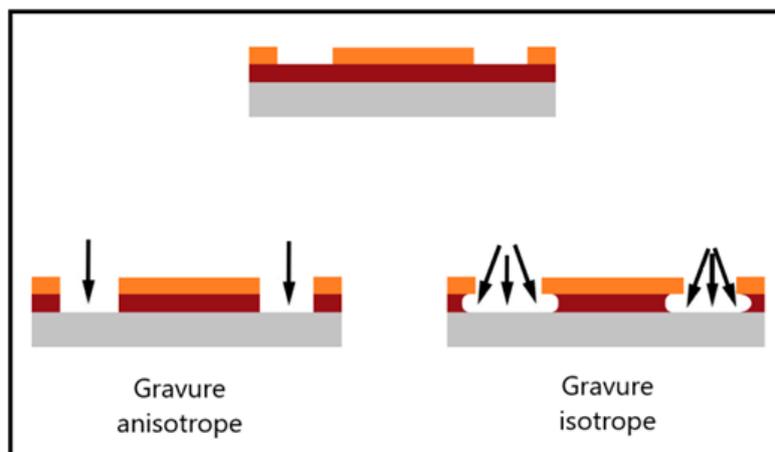


Figure 3-26: Différence entre la gravure isotrope et la gravure anisotrope [158]

Dans le tableau 3-4 suivant, les deux types d'étapes sont comparés ; il met en évidence les points forts et les points faibles relatifs.

|                           | <b>Gravure humide</b> | <b>Gravure sèche</b>     |
|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Sélectivité               | Élevée                | Faible                   |
| Coût de la gravure        | Faible                | Élevé                    |
| Durée                     | Importante            | Faible                   |
| Technologie submicronique | Difficile             | Aisée                    |
| Anisotropie               | Non                   | Oui                      |
| Défauts spécifiques       | Effet galva           | Dommages par rayonnement |
| Coût environnement        | Élevé                 | Faible                   |
| Consommation de produits  | Élevée                | Faible                   |
| Contrôle                  | Difficile             | Assez bon                |

Tableau 3-6 : Comparaison des propriétés des gravures humide et plasma [159]

### 3.5.2.2. Étapes pratiques

#### Étape 6 :

Dans ces travaux, la méthode de gravure humide a été choisie pour sa disponibilité et son faible coût. La gravure du bicouche métallique cuivre/titane s'est passée en deux étapes car les métaux ne se gravent pas avec les mêmes produits chimiques.

Dans un premier temps nous devons mettre en forme la couche supérieure en cuivre par gravure chimique humide avec l'aide d'une solution de perchlorure de fer. L'échantillon est plongé dans ce bain pendant une durée 4 minutes pour une épaisseur de 6µm de cuivre. Suite à la gravure, l'échantillon est rincé à l'eau.



a)



b)

*Figure 3-27 : L'échantillon a) dans la solution de perchlorure de fer b) à la sortie de la solution de perchlorure de fer, gravure du cuivre de face 1, motif visible*

Après la mise en forme de la couche de cuivre, nous procédons à la mise en forme de la couche de titane. Pour rappel cette couche de titane de quelques nanomètres sert de couche d'accrochage entre le cuivre et le substrat. Pour cela, nous utilisons une solution de gravure d'acide fluorhydrique (HF à 3%) dilué pendant une durée durant 30s. La gravure est rapide en raison de la faible épaisseur de la couche de titane (10nm à 20nm), il faut donc rincer rapidement à l'eau pour stopper la gravure afin d'éviter que l'acide fluorhydrique n'attaque le quartz et ne détériore sa transparence du substrat.

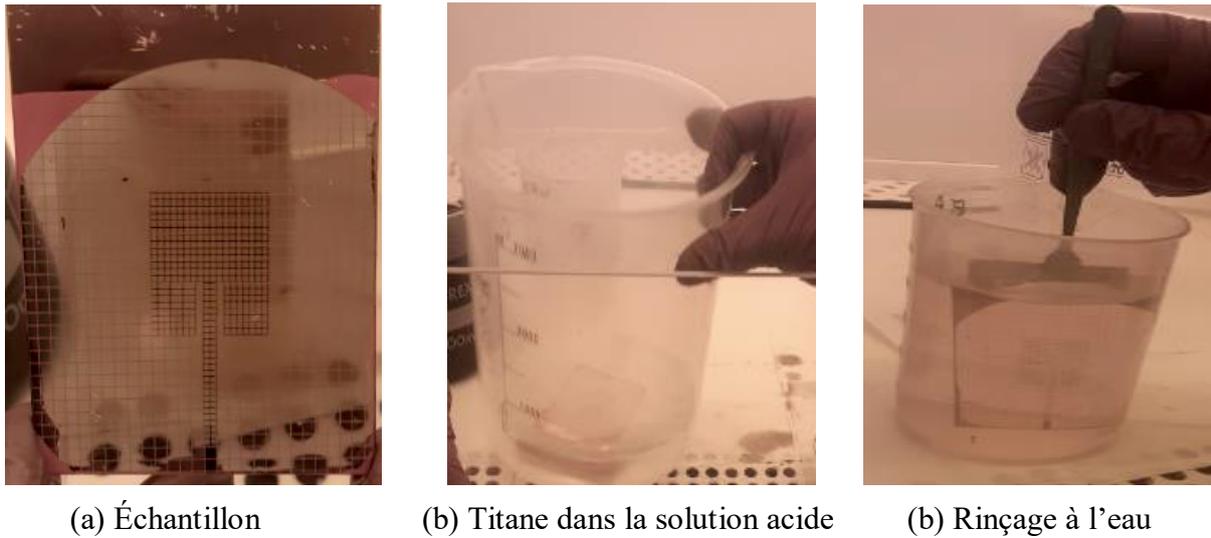


Figure 3-28 : Étapes de gravure de la couche mince de titane à base d'acide fluorhydrique

**Etape 7 :** Il faut enfin supprimer la résine en plongeant l'échantillon dans un bain d'acétone durant 1min et rincer à l'éthanol pour nettoyage également pendant 1min. Après séchage, la géométrie souhaitée est transférée du masque à l'échantillon.

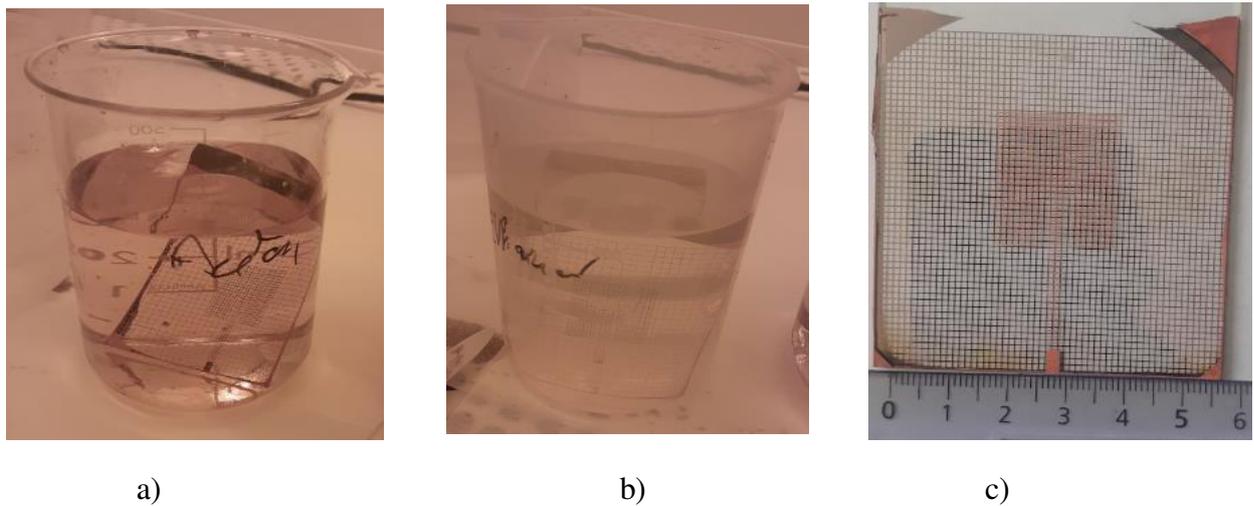


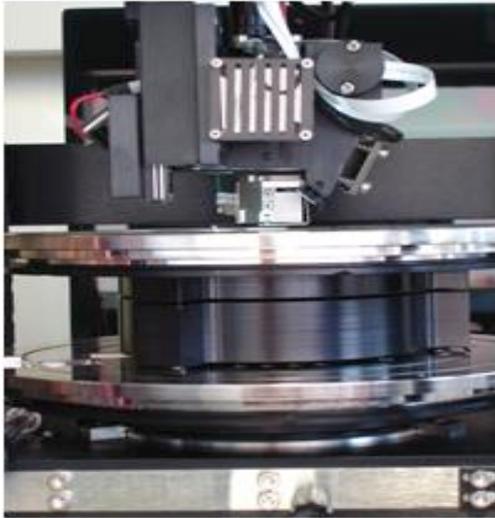
Figure 3-29 : L'échantillon a) dans la solution d'acétone pour enlever la résine b) rincer dans la solution d'éthanol, c) échantillon final, faces 1 et 2 réalisées.

Remarque : Chacune des étapes est reprise pour la réalisation de la face 2 si nécessaire

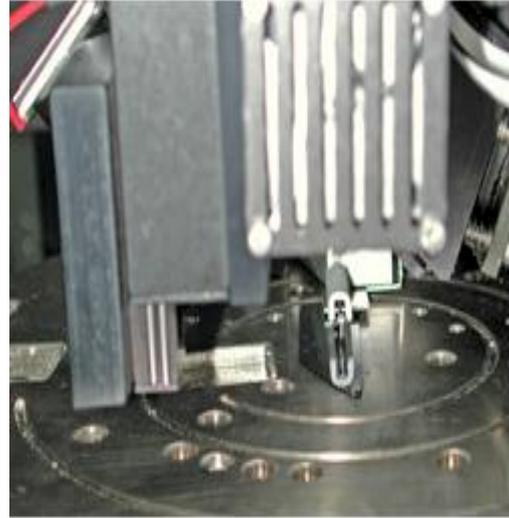
### 3.6. Mesures d'épaisseur de la couche de cuivre par profilométrie

Le profilomètre DEKTAK 8 BRUKER (figure 3-30), disponible à l'Institut des Matériaux J. Rouxel de Nantes permet :

- La mesure d'épaisseurs de couches minces de quelques nm à 1 mm ;
- La mesure de rayons de courbure de surface ;
- La mesure de rugosité ;
- La mesure de contraintes résiduelles de film, par l'analyse de la courbure d'échantillons avant et après dépôt du film...



a)



b)

Figure 3-30 : Profilomètre DEKTAK 8 BRUKER a) Vue de la platine porte-échantillon b) Vue de la tête de mesure

La zone de l'antenne où a été réalisée la mesure de l'épaisseur de métallisation est située sur la métallisation du plan de masse et indiquée en figure 3-31.

Zones de balayage du stylet

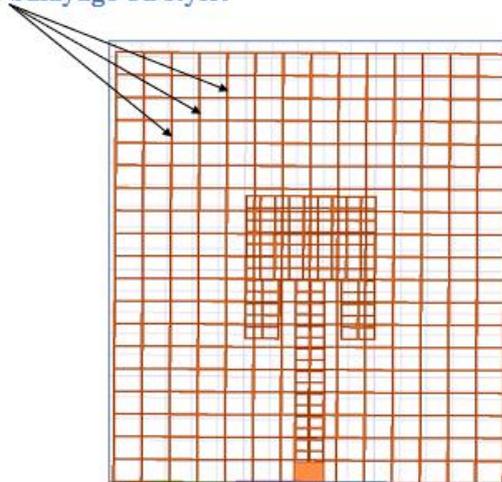


Figure 3-31 : Zone de mesure de l'épaisseur de métallisation

On remarque, grâce au relevé profilométrique, que l'épaisseur de la couche de cuivre + titane est de l'ordre de  $6\mu\text{m}$  et que les métallisations ont une largeur de  $100\mu\text{m}$ .

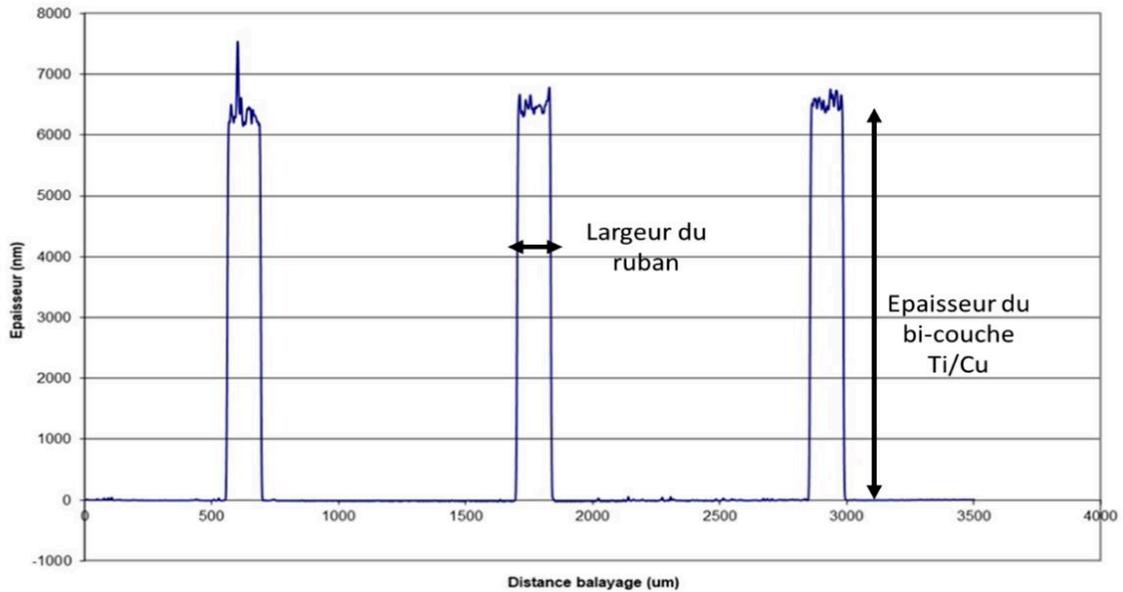


Figure 3-32 : Relevé de mesures de l'épaisseur du cuivre par profilométrie

### 3.7. Soudure des connecteurs sur le patch

Pour pouvoir mesurer ces antennes, il est finalement nécessaire de les connecter. Dans le cas d'antennes à couches minces, la soudure des connecteurs est un défi. En effet, à chaud, les couches minces fondent et se décollent du substrat, nous avons donc opté pour la soudure à froid avec une colle conductrice (référence : Adhésif CW2400 seringue 14g de marque Chemtronic). Cependant, cette soudure à froid peut présenter des inconvénients tels que la désadaptation au niveau de la ligne d'alimentation (élargissement de la ligne au moment du dépôt ou effet de superstrat sur la ligne qui change plus ou moins localement son impédance caractéristique).

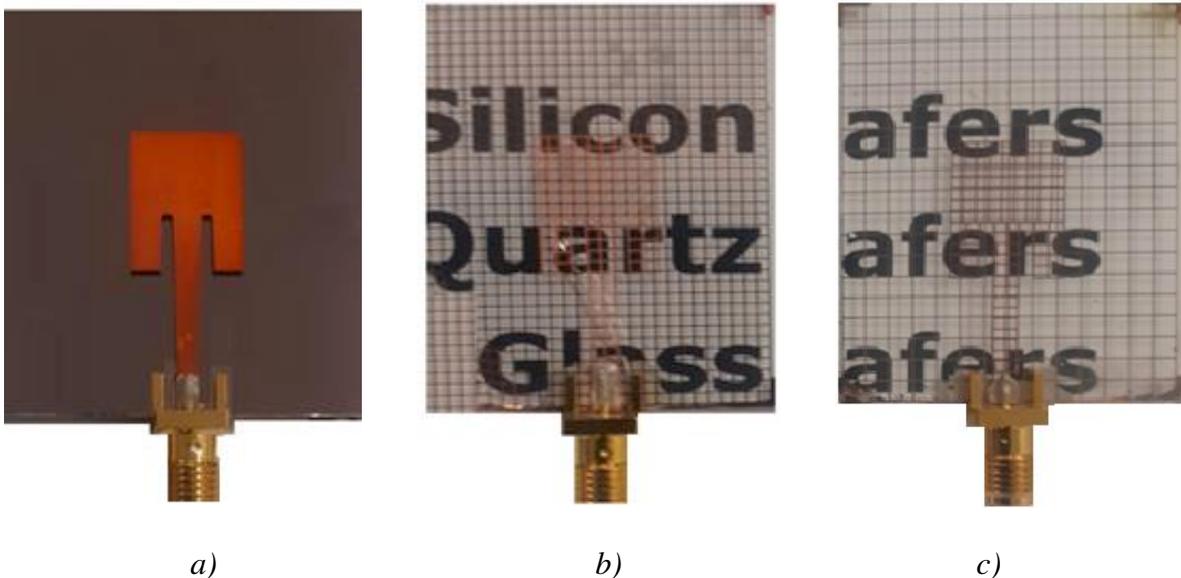


Figure 3-33 : Photo des antennes réalisées : a) Antenne opaque b) Antenne grillagée 1 et c) Antenne grillagée 2

### **3.8. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes technologies de dépôt de couches minces. La pulvérisation cathodique magnétron est celle qui a été utilisée dans ces travaux. Elle a permis de faire un dépôt de cuivre de 400nm à 500nm d'épaisseur sur 10nm de titane et sur verre Borofloat 33 d'épaisseur 1,1 mm, de permittivité diélectrique 4,5 et de tangente de perte de 0,012. Ensuite la couche de cuivre a été épaissie par électrodéposition jusqu'à atteindre 6.5  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. A partir de là, des antennes opaques et des antennes à faible impact visuel ont été réalisées par photolithographie et gravure chimique.

Les techniques des mesures des paramètres des antennes ainsi que les résultats de mesures sont détaillées dans le chapitre suivant du document.

# Chapitre 4

## Mesure et modélisation de prototypes d'antennes patch

Plusieurs prototypes d'antennes ont été réalisés avec la technique décrite dans le chapitre précédent. Une antenne, dite de référence, dont les métallisations sont laissées opaques, doit permettre de quantifier l'effet du grillage de manière indépendante de la technologie de réalisation. Deux prototypes d'antennes grillagées sur les deux plans de métallisation, avec des pas de maillage différents, ont également été réalisés afin de caractériser l'impact du maillage sur la réponse de l'antenne. Une fois les antennes réalisées, elles ont été mesurées. Comme ce sont des antennes pour lesquelles l'impact visuel est un paramètre important, deux types de mesures ont été faites, d'une part la réponse en fréquence et le rayonnement, d'autre part la transparence optique, à l'aide d'un spectrophotomètre UV/ visible.

### 4.1. Description et dimensionnement des antennes

#### 4.1.1. Caractéristiques de réalisation de l'antenne opaque

Une première antenne patch, pour partie opaque, c'est-à-dire constituée d'un dépôt métallique de cuivre plein déposé sur du verre, a été réalisée afin de servir de référence et ainsi permettre de comparer ses performances à celles d'antennes à faible impact visuel. Le substrat diélectrique choisi est du verre Borofloat 33, de permittivité relative  $\epsilon_r=4.5$ , de tangente de perte 0.012 et d'épaisseur  $h=1.1\text{mm}$ . L'épaisseur de cuivre déposé sur les deux faces du verre est d'environ  $6.5\mu\text{m}$  (figure 4-1 et tableau 4-1). Nous sommes limités par le process de lithographie UV disponible. Il faut que l'antenne rentre dans un cercle de diamètre 3 pouces pour cette technique utilisée.

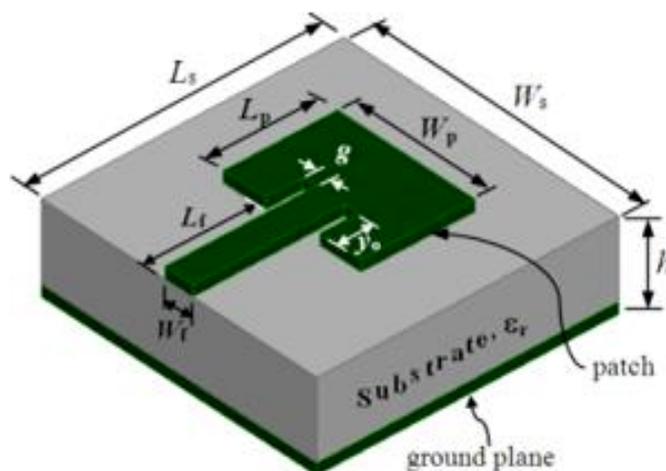


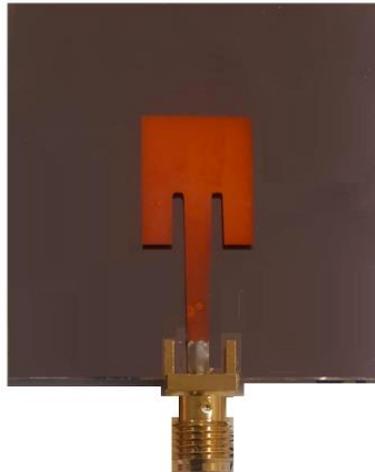
Figure 4-1 : Antenne patch microruban

$L_f$  et  $W_f$  sont les longueur et largeur de la ligne d'alimentation,  $L_p$  et  $W_p$  celles du patch.  $L_s$  et  $W_s$ , celles du substrat,  $h$ , l'épaisseur du substrat,  $y_0$  et  $g$  les dimensions des évidements.

|                | Antenne      | Plan de masse | Ligne d'alimentation | Substrat     | Évidement   |
|----------------|--------------|---------------|----------------------|--------------|-------------|
| Longueur (mm)  | 24 ( $L_p$ ) | 60 ( $L_s$ )  | 24 ( $L_f$ )         | 72 ( $L_s$ ) | 9 ( $y_0$ ) |
| Largeur (mm)   | 20 ( $W_p$ ) | 60 ( $W_s$ )  | 2.3 ( $W_f$ )        | 60 ( $W_s$ ) | 1.3 (g)     |
| Épaisseur (mm) | 0.0065       | 0.0065        | 0.0065               | 1.1 (h)      | 0.0065      |

*Tableau 4-1 : Dimensions de l'antenne*

La figure 4-2 présente l'antenne opaque réalisée. Elle fonctionne autour de 2.99 GHz.



*Figure 4-2 : Face supérieure de l'antenne opaque réalisée sur substrat Borofloat 33*

#### **4.1.2. Les antennes à faible impact visuel**

Pour estimer les performances pouvant être atteintes pour des antennes maillées réalisées avec la technologie présentée au chapitre 3, deux antennes de mêmes dimensions que celles de l'antenne opaque (maillage sur la surface rayonnante et sur le plan de masse), ont été conçues, réalisées et leurs résultats de mesure comparés à ceux de l'antenne opaque utilisée comme référence (voir tableau 4-2).

Les antennes 2 et 3 diffèrent entre elles par le pas de grille de leur plan de masse. Ce choix vient de l'objectif d'améliorer la transparence en modifiant le maillage de la métallisation la plus large et qui présente théoriquement une équipotentielle. La forme du maillage est rectangulaire pour mieux l'adapter aux dimensions de l'antenne.

Pour fixer les dimensions du grillage, nous avons d'une part tenu compte de la technologie disponible au laboratoire. Le choix est donc porté sur des largeurs de grille d'environ  $100\mu\text{m}$  (masques en plastiques). D'autre part, la largeur du gap entre les grilles dépend alors de la transparence et de la résistance par carré souhaitées. Les maillages diffèrent peu à cause du respect des dimensions de l'antenne.

|   | Antenne 1 | Antenne 2 (Maillée) | Antenne 3 (Maillée) |
|---|-----------|---------------------|---------------------|
| Plan de masse (60mm x 72 mm)                                |           |                     |                     |
| Pas $p_x/p_y$ ( $\mu\text{m}$ )                             | 0         | 1123/1050           | 2115/2140           |
| Largeur de grille $s$ ( $\mu\text{m}$ )                     | 0         | 100                 | 100                 |
| Resistance par carré $R_{sx}/R_{sy}$ ( $\Omega/\text{sq}$ ) | 0.0026    | 0.029/0.027         | 0.055/0.0556        |
| Transparence T(%)   | 0         | 75.82%              | 83.55%              |
| Ligne d'alimentation  |           |                     |                     |
| Pas $p_x/p_y$ ( $\mu\text{m}$ )                             | 0         | 1060/1100           | 1060/1100           |
| Largeur de grille $s$ ( $\mu\text{m}$ )                     | 0         | 100                 | 100                 |
| Resistance par carré $R_{sx}/R_{sy}$ ( $\Omega/\text{sq}$ ) | 0.0026    | 0.0275/0.0286       | 0.0275/0.0286       |
| Transparence T(%)   | 0         | 75.74%              | 75.74%              |
| Élément rayonnant (24mm x 20mm)                             |           |                     |                     |
| Pas $p_x/p_y$ ( $\mu\text{m}$ )                             | 0         | 1150/1105           | 1150/1105           |
| Largeur de grille $s$ ( $\mu\text{m}$ )                     | 0         | 100                 | 100                 |
| Resistance par carré $R_{sx}/R_{sy}$ ( $\Omega/\text{sq}$ ) | 0.0026    | 0.03/0.0287         | 0.03/0.0287         |
| Transparence T (%)  | 0         | 76.40%              | 76.40%              |

Tableau 4-2 . Paramètres de maillage et caractéristiques théoriques des antennes ( $p_x$  et  $p_y$  sont les dimensions du pas rectangulaire suivant les directions  $ox$  et  $oy$ ).



a)

b)

Figure 4-3 : Photographie des antennes grillagées : a) Antenne 2 b) Antenne 3

On observe sur la figure 4-3 que l'antenne 3 est plus transparente que l'antenne 2.

## 4.2. Simulation d'antenne grillagée à partir d'antenne pleine sur HFSS à 5.4 GHz.

La simulation électromagnétique de l'antenne opaque est relativement simple. Par contre, celle de l'antenne grillagée s'avère un peu plus complexe, du fait du design à réaliser, et prend énormément de temps de simulation et de ressources mémoires. Elle nécessite un PC performant (30 h sur ordinateur 8 CPU 2,4 GHz, 50 Go de RAM). Il est donc intéressant de voir dans quelle mesure il est possible de simuler une antenne grillagée par une antenne opaque dont certaines caractéristiques devront être modifiées pour tenir compte de la différence de structure. Pour relever ce défi, une méthode de simulation a été initiée en modifiant les paramètres diélectriques du substrat et l'épaisseur du métal. Nous avons réduit la taille de l'antenne pour diminuer le temps de simulation, par conséquent la fréquence de résonance passe de 3 GHz à 5,4GHz.

Avec la même permittivité, la fréquence de résonance de l'antenne à métallisation pleine ( $f_{r\_pleine}$ ) est supérieure à la fréquence de résonance de l'antenne grillagée ( $f_{r\_grillagée}$ ), il faut donc une permittivité plus élevée pour l'antenne pleine pour que  $f_{r\_pleine}$  soit égale à  $f_{r\_grillagée}$ . La fréquence varie inversement à la racine carrée de la permittivité relative. Par conséquent, par principe d'équivalence, il y aura égalité entre les fréquences de résonance si :

$$\frac{f_{r\_pleine}}{\sqrt{\epsilon_{r\_pleine}}} = \frac{f_{r\_grillagée}}{\sqrt{\epsilon_{r\_grillagée}}} \quad (4-1)$$

$$\text{Alors } \epsilon_{r\_pleine} = \left( \frac{f_{r\_pleine}}{f_{r\_grillagée}} \right)^2 \epsilon_{r\_grillagée} = k \cdot \epsilon_{r\_grillagée} \quad (4-2)$$

Pour avoir des gains proches, le principe est de modifier l'épaisseur de métallisation de l'antenne pleine afin d'avoir la même résistance par carré que l'antenne grillagée. Connaissant le pas de grillage  $p$ , la largeur de grille  $s$  et l'épaisseur  $e$  du conducteur, on calcule la résistance par carré de l'antenne grillagée  $R'_s$  à partir de celle de la couche pleine  $R_s$  de même épaisseur  $e$  et de conductivité  $\sigma$  [70].

$$R_s = \frac{1}{e \cdot \sigma} \quad (4-3)$$

$$R'_s = \frac{p}{s} R_s = \frac{p}{s} \frac{1}{e \cdot \sigma} \quad (4-4)$$

Par la suite on considère cette résistance  $R'_s$  comme étant celle de l'antenne couche pleine alors :

$$R'_s = \frac{1}{e' \cdot \sigma} \quad (4-5)$$

Ensuite, on peut calculer la nouvelle épaisseur  $e'$  qui correspond à l'épaisseur du patch opaque à simuler pour représenter au plus près le comportement de l'antenne grillagée.

$$e' = \frac{s}{p} \cdot e \quad (4-6)$$

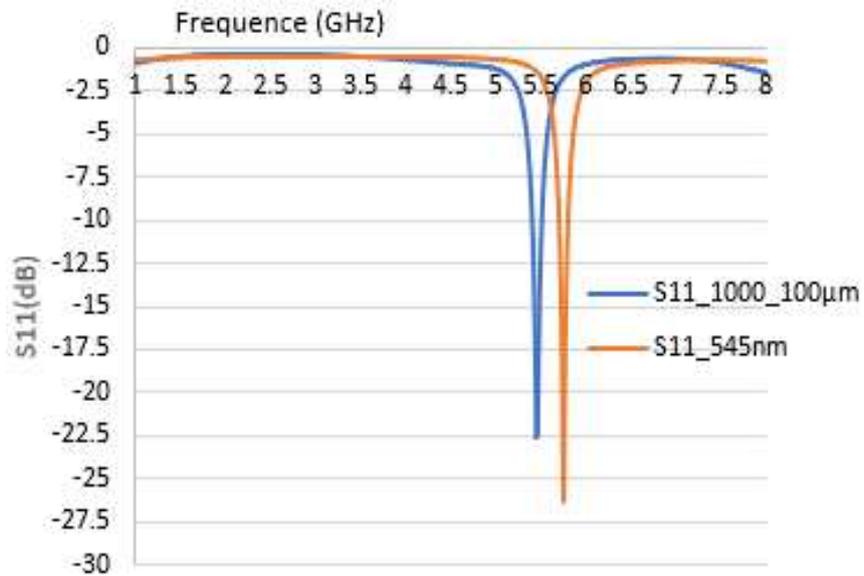
Le design du patch plein est alors simulé sur HFSS avec cette nouvelle épaisseur  $e'$  de cuivre. Les dimensions sont ajustées de manière à obtenir un coefficient de réflexion ( $S_{11} < -10$  dB). Ensuite on augmente  $e'$  à  $e$  et puis on procède au grillage de l'antenne opaque d'épaisseur  $e$ . Nous obtenons alors une antenne grillagée d'épaisseur  $e$  de même résistance par carré que l'antenne opaque d'épaisseur  $e'$ .

Une série de simulations a été effectuée sur HFSS. Le tableau 4-3 comporte les valeurs de la fréquence de résonance de l'antenne et du gain obtenues par simulation des antennes grillagées et pleines correspondantes en fonction de la permittivité relative du substrat.

| <b>Echantillon</b>         | <b>1</b>                 |        |        | <b>2</b>                 |        |        | <b>3</b>  |             |             |
|----------------------------|--------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|---|-------------|-------------|
| Métallisation des antennes | 1000 $\mu$ m/100 $\mu$ m | Pleine | Pleine | 2000 $\mu$ m/100 $\mu$ m | Pleine | Pleine | 1000 $\mu$ m/100 $\mu$ m_2000 $\mu$ m/100 $\mu$ m | Pleine      | Pleine      |
| Epaisseur de dépôt         | 6 $\mu$ m                | 545nm  | 545nm  | 6 $\mu$ m                | 285nm  | 285nm  | 6 $\mu$ m   | 545nm/285nm | 545nm/285nm |
| $\epsilon_r$               | 4.5                      | 4.5    | 5.07   | 4.5                      | 4.5    | 5.08   | 4.5   | 4.5         | 5.05        |
| fr(GHz)                    | 5.45                     | 5.76   | 5.45   | 5.42                     | 5.76   | 5.42   | 5.42  | 5.76        | 5.42        |
| G(dB)                      | 3.58                     | 3.97   | 3.56   | 4.09                     | 4.15   | 3.91   | 4.02  | 4.07        | 4.01        |
| k                          | 1.12                     |        |        | 1.13                     |        |        | 1.13  |             |             |
| $k \times \epsilon_r$      | 5.04                     |        |        | 5.08                     |        |        | 5.08  |             |             |

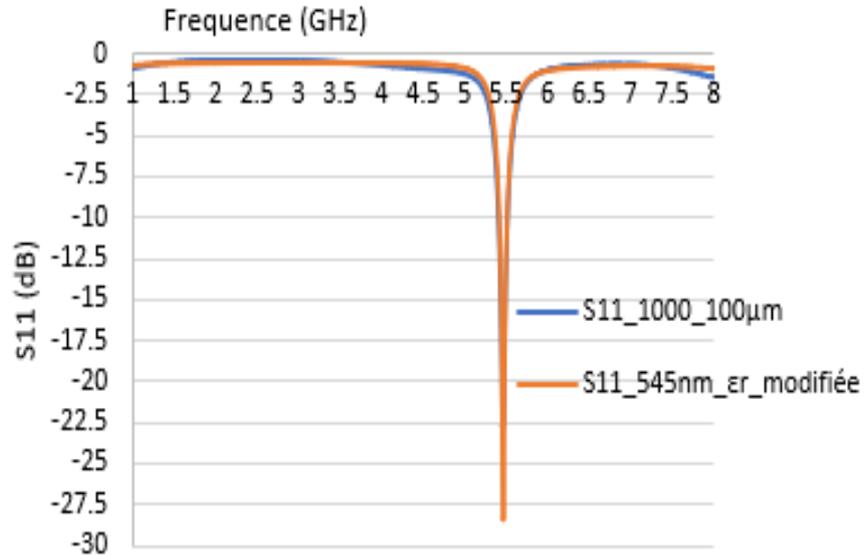
*Tableau 4-3 : Valeurs de la fréquence de résonance et du gain obtenues par simulation des antennes grillagées et pleines correspondantes effectuées sur HFSS.*

Les figures 4-4 à 4-9 présentent les réponses en fréquence et les gains obtenus par simulation des antennes grillagées d'épaisseur de métallisation  $6\mu\text{m}$  et pleines correspondantes selon le pas de maillage effectuées sur HFSS.



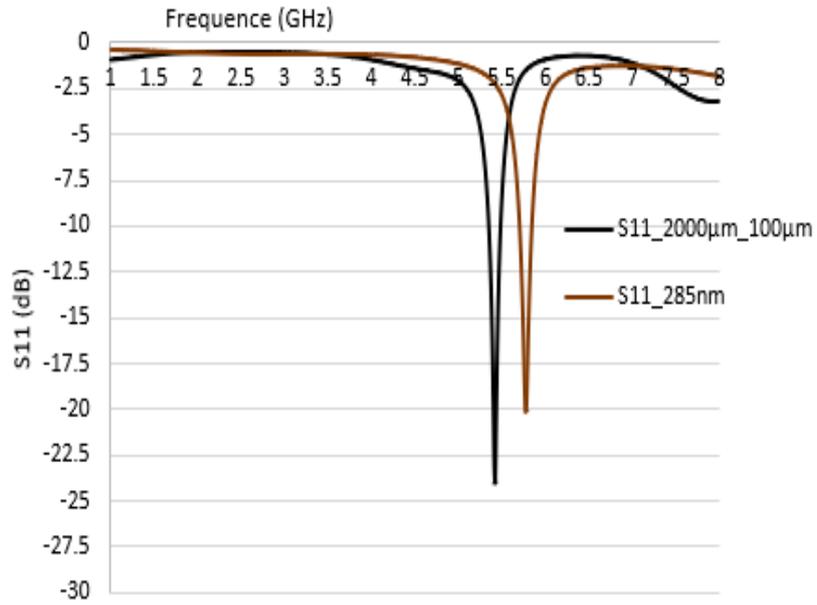
a)

Pour retrouver la même fréquence de résonance, il faut augmenter la permittivité relative de l'antenne pleine à 5.07 (figure 4-3 b))

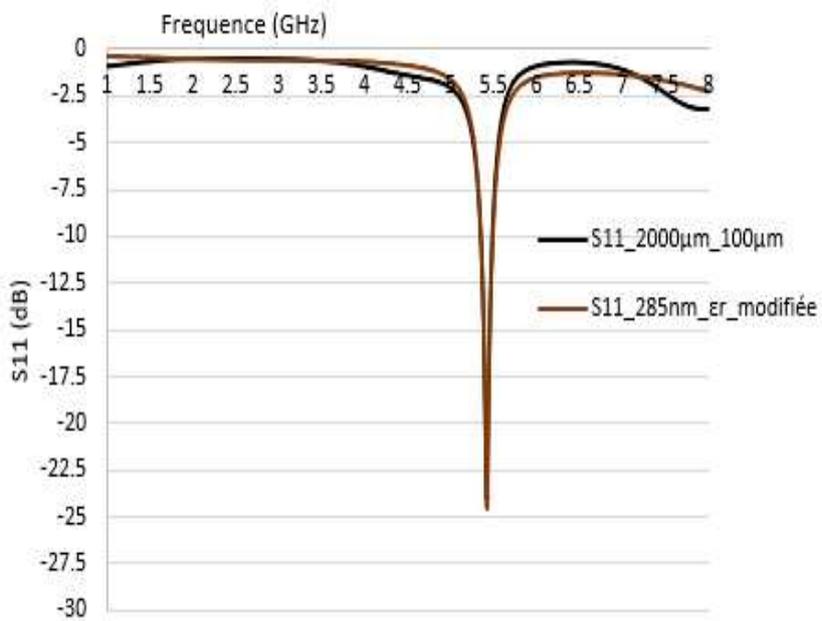


b)

Figure 4-4 : Réponses en fréquence d'antenne grillagée ( $p=1000\mu\text{m}/s=100\mu\text{m}$ ) d'épaisseur  $6\mu\text{m}$  et l'antenne opaque correspondante d'épaisseur  $545\text{nm}$  a) Même  $\epsilon_r = 4.5$   
b)  $\epsilon_{r\_modifié} = 5.07$

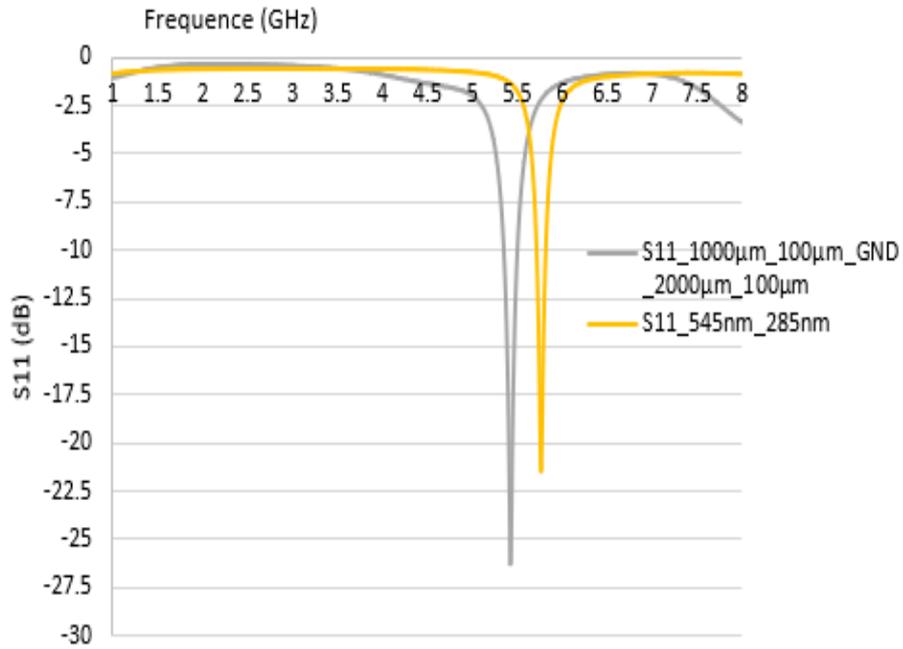


a)

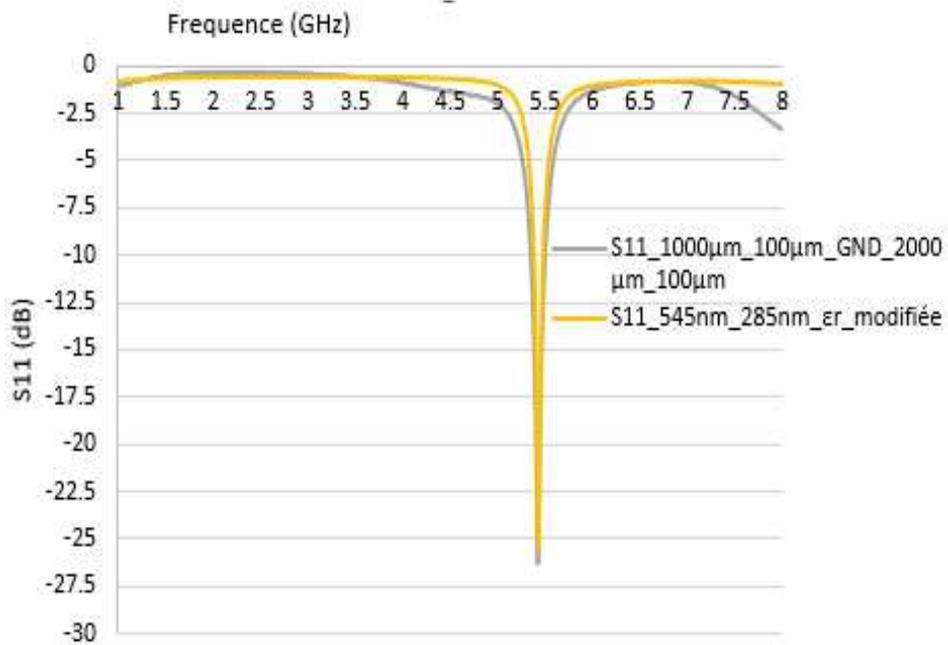


b)

Figure 4-5 :  $S_{11}$  antenne grillagée ( $2000\mu\text{m}/100\mu\text{m}$ ) d'épaisseur  $6\mu\text{m}$  et l'antenne opaque correspondante d'épaisseur  $285\text{nm}$  a)  $\epsilon_r = 4.5$  b)  $\epsilon_{r\_modifié} = 5.08$



a)



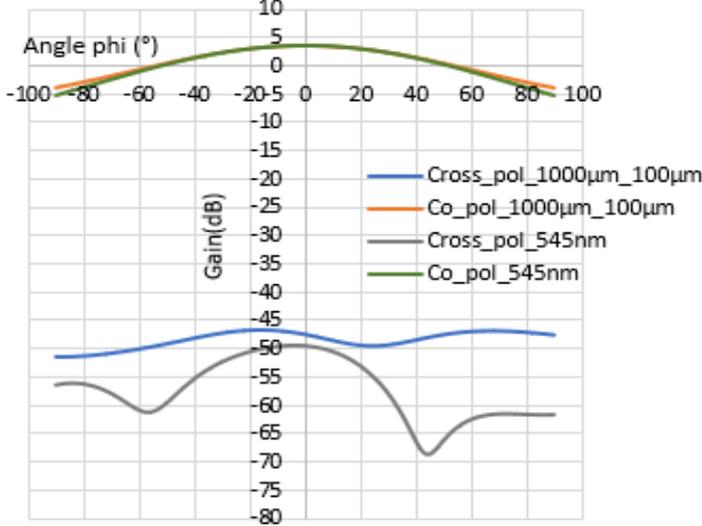
b)

Figure 4-6 :  $S_{11}$  antenne grillagée  $1000\mu\text{m}_100\mu\text{m}_\text{GND}_2000\mu\text{m}_100\mu\text{m}$  d'épaisseur  $6\mu\text{m}$  et l'antenne opaque correspondante d'épaisseur  $545\text{nm}_285\text{nm}$  a)  $\epsilon_r = 4.5$

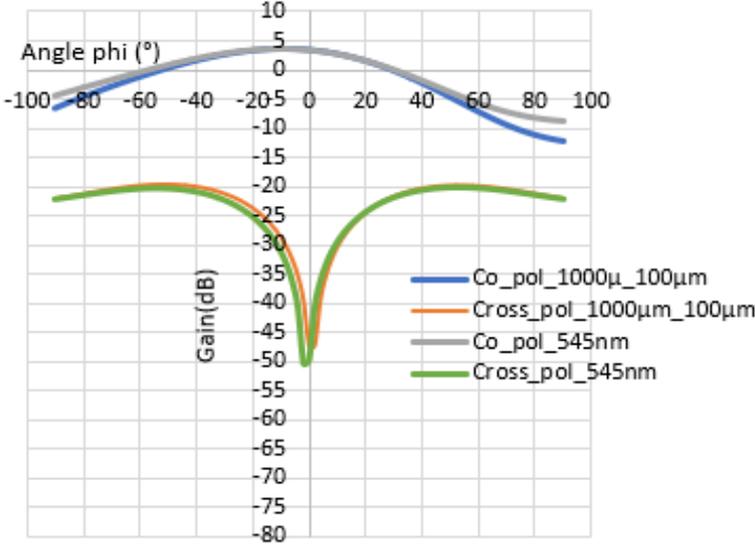
b)  $\epsilon_{r\_modifié} = 5.05$

On retrouve des courbes de  $S_{11}$  bien adaptées. Il existe dans certains cas une différence de l'ordre de 0.6% entre la valeur de la permittivité diélectrique du substrat et celle à prendre

en compte dans la simulation pour l'antenne pleine correspondante. Cela est causé par le fait le grillage n'est pas uniforme sur toute la surface du patch (élément rayonnant et plan de masse).

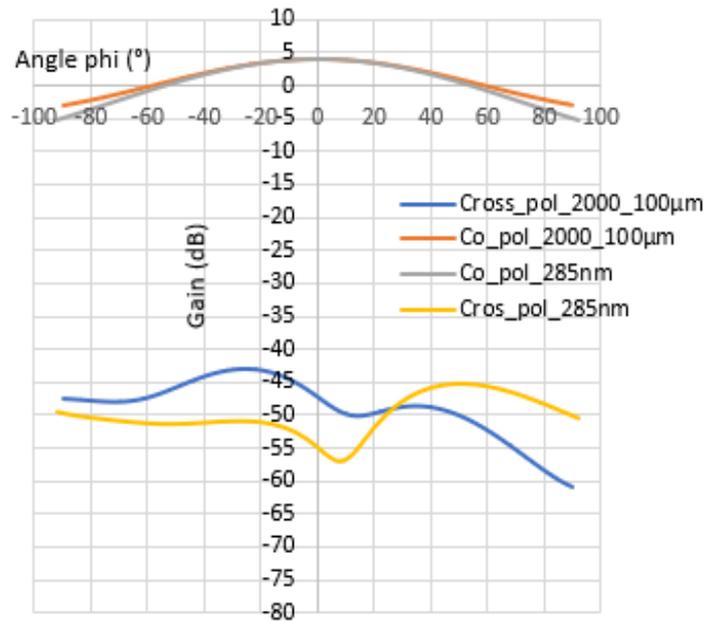


a) Plan E

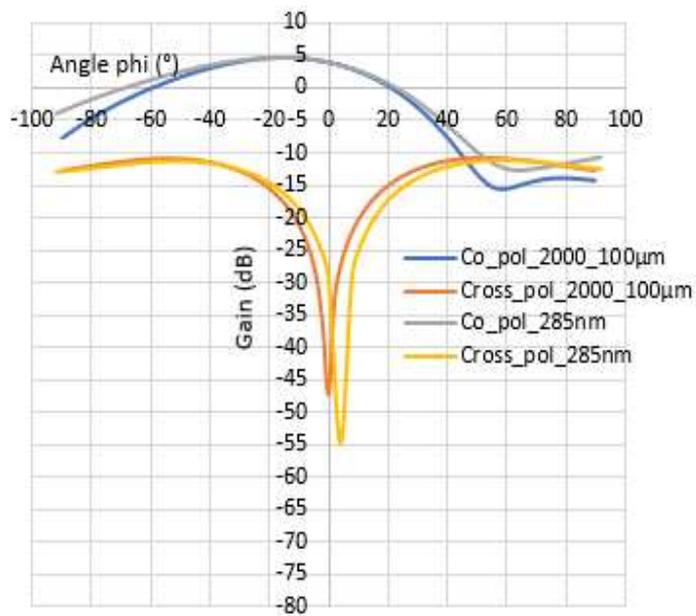


b) Plan H

Figure 4-7: Diagrammes de rayonnement simulés sous HFSS de l'antenne grillagée ( $p=1000\mu\text{m}/s=100\mu\text{m}$ ), d'épaisseur  $6\mu\text{m}$  et de l'antenne opaque correspondante d'épaisseur  $545\text{nm}$  à  $5.45\text{GHz}$

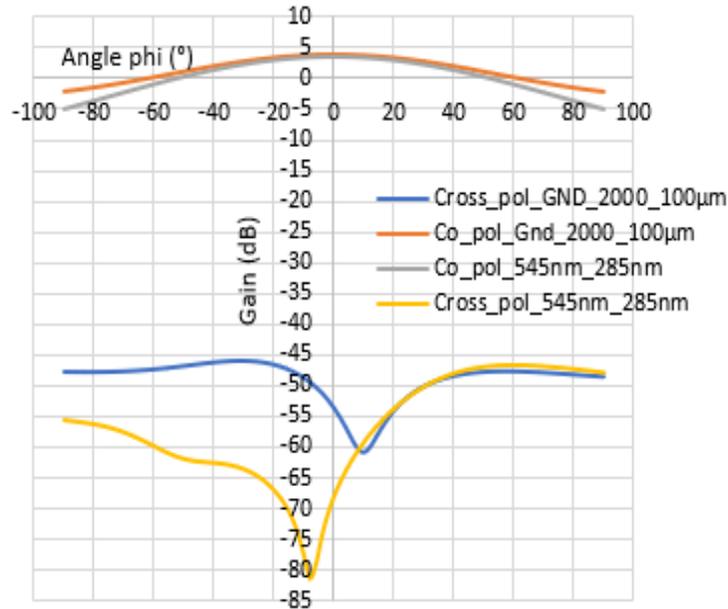


a) Plan E

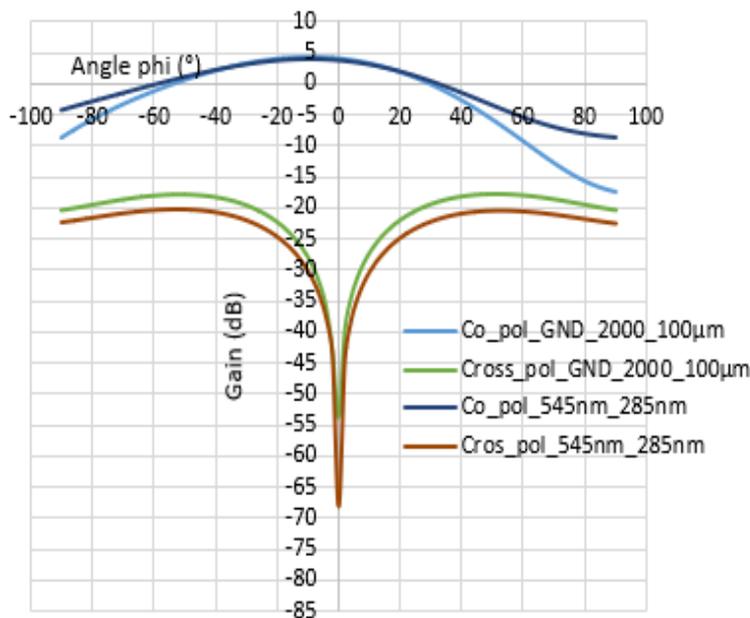


b) Plan H

Figure 4-8 : : Diagrammes de rayonnement simulés sous HFSS de l'antenne grillagée (2000μm/100μm), d'épaisseur 6μm et de l'antenne opaque correspondante d'épaisseur 285nm à 5.42GHz



a) Plan E



b) Plan H

Figure 4-9 : Diagrammes de rayonnement simulés sous HFSS de l'antenne grillagée (métallisation supérieure :  $1000\mu\text{m}/100\mu\text{m}$  et plan de masse  $2000\mu\text{m}/100\mu\text{m}$ ), d'épaisseur  $6\mu\text{m}$  et de l'antenne opaque correspondante d'épaisseur  $545\text{nm}_\text{GND}_285\text{nm}$  à  $5.42\text{GHz}$

Ces courbes montrent que le gain de l'antenne grillagée et celui de l'antenne opaque correspondante sont proches.

Au regard de ces courbes, les antennes grillagées pourraient être simulées à partir d'une antenne pleine correspondante connaissant la permittivité diélectrique du substrat diélectrique en le multipliant par un coefficient  $k$  et l'épaisseur de métallisation. Cependant, cette étude doit être étendue à d'autres types de structures d'antennes et de substrats ayant des paramètres diélectriques différents de cette configuration.

### **4.3. Méthodes et moyens de mesure des échantillons réalisés**

Après la réalisation des antennes, il faut mesurer différentes caractéristiques dimensionnelles, optique, électriques et électromagnétiques (épaisseur des couches minces déposées, transparence optique, paramètres S, gain et diagrammes de rayonnement...). Quelques méthodes utilisées pour ces mesures sont décrites ici.

#### **4.3.1. Méthode de mesure de la résistivité et de la résistance par carré**

La résistivité électrique est une propriété de base qui quantifie l'opposition d'un matériau au flux de courant. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment le dopage du matériau, et de facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité.

La mesure de la résistivité ou de la résistance par carré est nécessaire afin d'évaluer les pertes ohmiques en régime continu. Une résistivité élevée du matériau peut affecter les caractéristiques électriques et électromagnétiques des antennes. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la résistivité d'un matériau qui dépendent de sa nature, de l'ordre de grandeur de la résistance ohmique, de la forme et de l'épaisseur du matériau. L'une des plus courantes pour mesurer la résistivité de certains matériaux minces et plats, tels que les semi-conducteurs ou les revêtements conducteurs, utilise la méthode 4 pointes [160]. Cette méthode se subdivise en deux : la méthode des quatre pointes colinéaires [161] et la méthode des quatre pointes de Van der Pauw [162].

##### **Méthode d'une sonde à quatre pointes colinéaires**

La méthode utilisant une sonde à quatre pointes est utilisée exclusivement pour les mesures de résistivité telles que proposé par Wenner en 1916 pour mesurer la résistivité de la terre [161].

La technique de la sonde à quatre points consiste à mettre en contact quatre sondes équidistantes avec un matériau de résistivité inconnue. Un courant continu est imposé entre les deux sondes extérieures et un voltmètre mesure la différence de potentiel entre les deux sondes intérieures. La résistivité est calculée à partir de facteurs géométriques, du courant de source et de la mesure de tension. Outre une sonde colinéaire à quatre points, l'instrumentation utilisée pour ce test comprend une source de courant continu et un voltmètre.

Plusieurs hypothèses sont nécessaires à l'obtention du résultat. Ainsi, les résistances de contact entre pointes et échantillon sont considérées négligeables, le diamètre de contact entre pointe et échantillon est négligé par rapport à la distance entre les pointes, la conductivité du matériau est supposée isotrope et homogène et le courant uniformément réparti à travers la section de l'échantillon. Pour cela, le réseau de sondes est plutôt placé au centre du matériau (Figure 4-10).

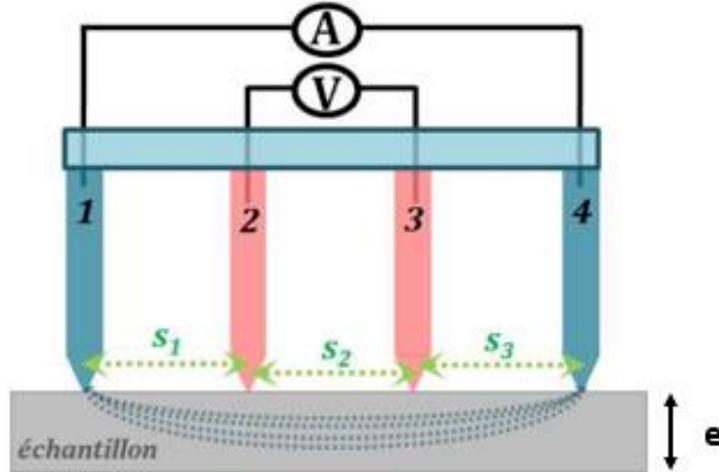


Figure 4-10 : Représentation schématique de la méthode de mesure par sonde à 4 points alignées [163]

L'utilisation de quatre points (au lieu de deux) permet de minimiser l'impact des résistances de contact parasites [163]. Les deux sondes externes (1 et 4) sont utilisées pour générer le courant  $I$  et les deux sondes internes (2 et 3) sont utilisées pour mesurer la chute de tension  $V$  résultante à travers la surface de l'échantillon. La résistivité  $\rho$  est calculée de la manière suivante [164]:

$$\rho = \frac{V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_3} - \frac{1}{s_1+s_2} - \frac{1}{s_2+s_3}\right)} \quad (4-7)$$

avec  $s_1, s_2, s_3$ , les espacements entre les points.

Quand  $s_1 = s_2 = s_3 = S$ , l'équation devient :

$$\rho = \frac{V}{I} 2\pi S \quad (4-8)$$

### Méthode des quatre points de Van der Pauw

En ce qui concerne la mesure de la résistivité pour les couches minces, la méthode "4 points de Van der Pauw" [162] est mieux adaptée. On mesure alors  $\frac{\Delta V}{I}$  (entre les points 2 et 3), afin de déterminer  $\rho$  ou  $R$ .

Dans le cas qui nous intéresse, la couche mince conductrice est déposée sur un substrat isolant, l'ensemble peut alors être considéré comme bidimensionnel tant que l'épaisseur est petite devant la distance  $s$  entre les pointes.

Le courant injecté  $I$  diffuse radialement dans la couche. Il en résulte que la densité de courant radiale à une distance  $r$  de la source est donnée par :

$$J = \frac{I}{2\pi r e} \quad (4-9)$$

La différence de potentiel entre les pointes intermédiaires est donnée par la loi d'Ohm :

$$V'_{32} = \Delta V = \int_s^{2s} -\frac{\rho I}{2\pi r e} dr = -\frac{\rho I}{2\pi e} \ln 2 \quad (4-10)$$

Avec  $s$ , l'espacement entre deux pointes, supposé identique entre une pointe et la suivante.

En sommant ces deux contributions (théorème de superposition) la résistivité a pour expression :

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} e \frac{\Delta V}{I} = 4.53. e \frac{\Delta V}{I} \quad (4-11)$$

Connaissant l'épaisseur du film, il est donc possible de mesurer la résistivité en mesurant la tension et le courant. On en déduit la résistance par carrée  $R_s$  (en  $\Omega/\text{carré}$ ) par :

$$R_s = \frac{\rho}{e} \quad (4-12)$$

En conclusion, une sonde colinéaire à quatre pointes, associée à un analyseur de paramètres, permet de déterminer la résistivité de matériaux minces et plats tels que les semi-conducteurs ou les revêtements conducteurs. Il est important de prendre en compte les sources potentielles d'erreur, comme le courant de fuite et les facteurs environnementaux tels que la lumière et la température.

#### 4.3.2. Transparence optique ou transmittance

La transparence optique des échantillons a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre Perkin UV-Vis-NIR Elmer Lambda 1050 (figure 4-11).

Un faisceau lumineux dont la longueur d'onde peut aller de l'UV jusqu'au proche IR (NIR) est envoyé sur l'échantillon à analyser. Selon la configuration utilisée, une partie de ce rayonnement va être analysée suite à son absorption ou à sa réflexion (diffuse ou spéculaire) par le matériau. Cette technique permet de multiples analyses comme la mesure de la largeur de la bande interdite (gap optique) dans des matériaux semi-conducteurs, des dosages en solution, des mesures colorimétriques, l'analyse de centres colorés dans des matrices inorganiques par exemple.



Figure 4-11 : Spectrophotomètre Perkin Elmer lambda 1050 [165]

Le spectrophotomètre est équipé de trois modules qui permettent des mesures complémentaires :

- un module « 3DWB det » équipé de 3 détecteurs (PMT (photomultiplier tube) InGaAs. PbS) qui permet des mesures d'absorption/transmission de 175 nm à 3300 nm ;
- un module « 150 mm InGaAs Int.sphere » équipé de deux détecteurs (PMT et InGaAs) et d'une sphère d'intégration de 150 mm qui permet des mesures de réflexion diffuse de 250 nm à 2500 nm ;
- un module « URA » équipé de deux détecteurs (Si. PbS) qui permet des mesures de réflexion spéculaire absolue de 250 à 3200 nm pour des angles de 8° à 70°.

Pour les échantillons mesurés, cet appareil a été utilisé en mode transmission, en utilisant le module 3DWB. Deux lampes ont été utilisées : la lampe deutérium pour la gamme UV de 250 à 320nm et une lampe tungsten de 320 jusqu'à 850nm. Le détecteur utilisé est un PMT qui couvre toute la gamme désirée pour les mesures. Les deux autres détecteurs un InGaAs et un PbS, permettent d'aller plus loin dans le proche IR.

Pour les antennes grillagées, la différence entre transparence optique théorique et expérimentale peut être due à un défaut de l'alignement entre les plans de métallisation supérieur et inférieur, ce qui a un impact direct sur la transparence optique de l'antenne (figure 4-12). En effet, avec un alignement parfait des bandes métalliques des deux couches de maillages, la transparence optique de l'antenne est optimale comme le montre la figure 4c car la surface recouverte d'une métallisation est minimisée. Dans la réalité, les deux couches de maillage ne peuvent pas être alignées précisément sur toute la longueur du substrat car, d'une part, les pas sont légèrement différents à certains endroits du design entre le patch, la ligne d'alimentation et le plan de masse pour respecter les dimensions de l'élément rayonnant. D'autre part, le maillage n'est pas symétrique sur l'antenne, il démarre dans un angle de l'antenne et s'étend pour respecter au mieux les dimensions de l'antenne. Dans les cas où des transparences optiques plus élevées sont requises, il est possible d'utiliser des mailles plus grandes à condition que l'épaisseur de la couche conductrice soit suffisamment importante pour conserver la même résistance par carré [69].

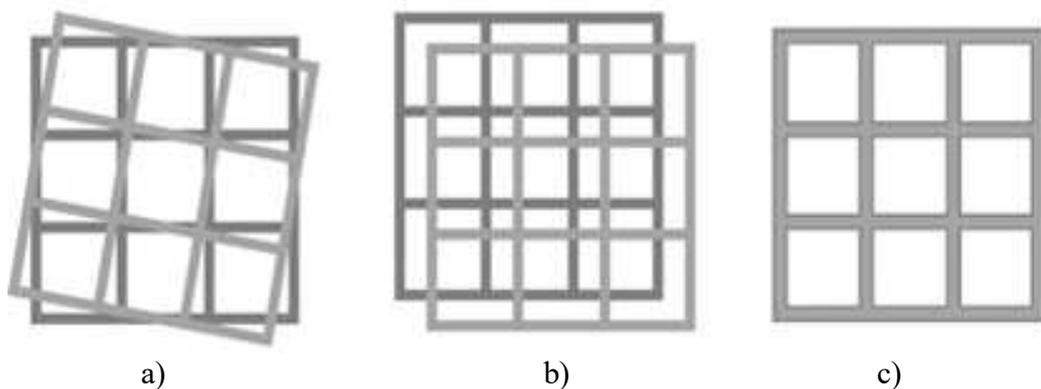


Figure 4-12 : Exemples de trois positions géométriques différentes des motifs maillés  
a) Rotation d'un motif maillé ; b) Translation d'un motif maillé c) Alignement parfait des motifs maillés [166]

### 4.3.3. Mesure des paramètres S

Les paramètres S sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (Rohde & Schwarz ZNB 20) pouvant faire de mesures en 100 kHz et 20 GHz (Figure 4-13).



Figure 4-13 : Mesures sur analyseur de réseau vectoriel

L'antenne est connectée à un port du VNA via un câble coaxial.

#### 4.3.4. Mesure du diagramme de rayonnement

La mesure du diagramme de rayonnement des antennes a été réalisée dans la chambre anéchoïque de l'IETR du site de Nantes (figure 4-14). Il s'agit d'une cage de Faraday couverte d'absorbants électromagnétiques associée à un analyseur de réseau vectoriel. La cage de Faraday isole le dispositif sous tests des ondes électromagnétiques extérieures. Les absorbants atténuent progressivement les ondes électromagnétiques émises à l'intérieur de la chambre et empêchent ainsi toute réverbération parasite en direction du dispositif sous test notamment. L'antenne à mesurer est placée en vis-à-vis d'une antenne de référence.

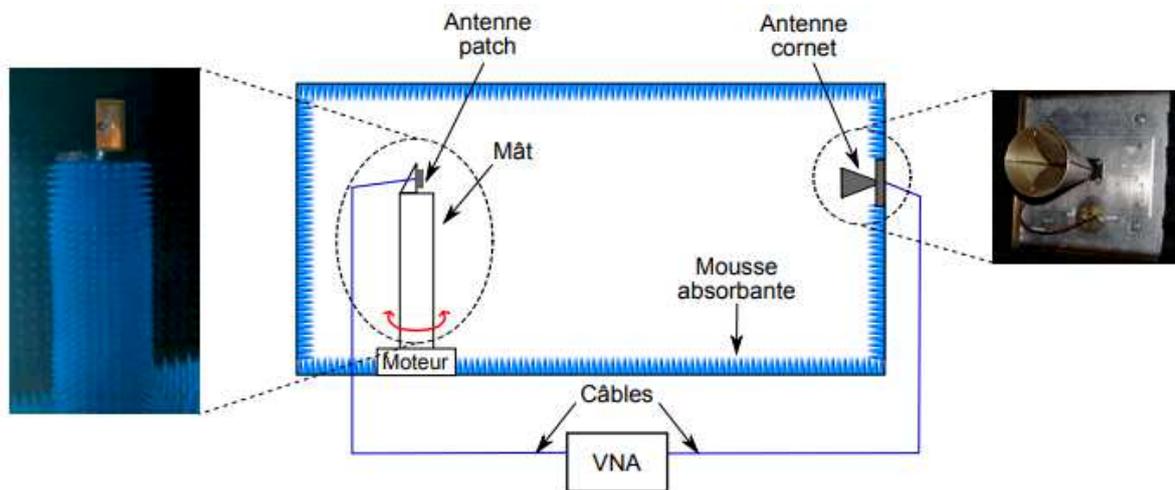


Figure 4-14: Principe de mesure en chambre anéchoïque

Les mesures sont faites suivant les plans E et H (figure 4-15)

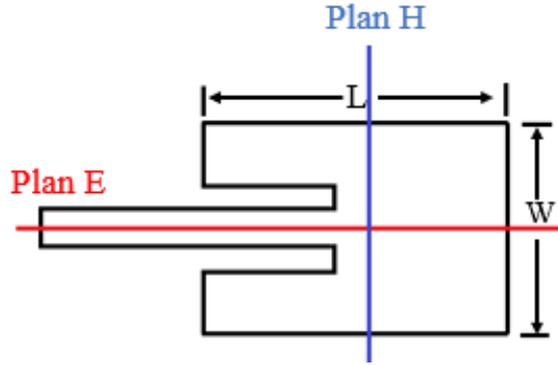


Figure 4-15 : Définition des plans E et H

On mesure les paramètres de transmission  $S_{21}(\theta, \varphi)$  entre ces deux antennes en fonction de l'orientation relative de l'antenne ( $\theta, \varphi$ ) par rapport à l'antenne d'émission, dans les plans vertical et horizontal. Ensuite, ayant fait une mesure de transmission  $S_{21ref}$  entre deux antennes de références identiques ou dont les caractéristiques électromagnétiques sont connues, il est possible de déterminer le gain de l'antenne à mesurer  $G_{AUT}(\theta, \varphi)$  à partir du gain des antennes de référence  $G_{ref}$ .

$$G_{AUT(dB)}(\theta, \varphi) = S_{21(dB)}(\theta, \varphi) + G_{ref(dB)} - S_{21ref(dB)} \quad (4-13)$$

Cette équation n'est valable qu'en visibilité directe.

#### 4.4. Performances électriques et optiques des antennes

##### 4.4.1. Mesure de la transparence optique des antennes grillagées

La transparence optique de chaque antenne a été mesurée dans le visible. Elle a été déterminée sur le plan de masse seul, puis sur la double couche de métallisation formée par l'élément rayonnant et le plan de masse.

##### Transparence de l'Antenne 2

La figure 4-16 présente la transparence mesurée sur le plan de masse de l'antenne à plan de masse le moins transparent (Antenne 2). Les positions HG, HD, BG et BD correspondent approximativement aux endroits où sont faites les mesures.

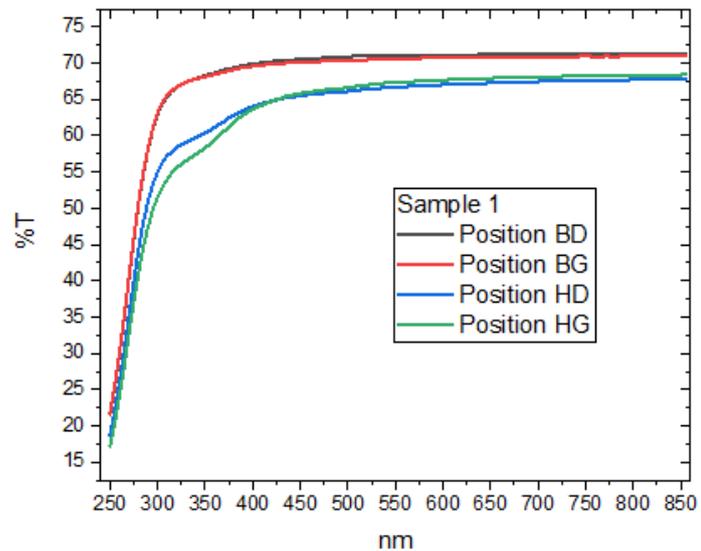
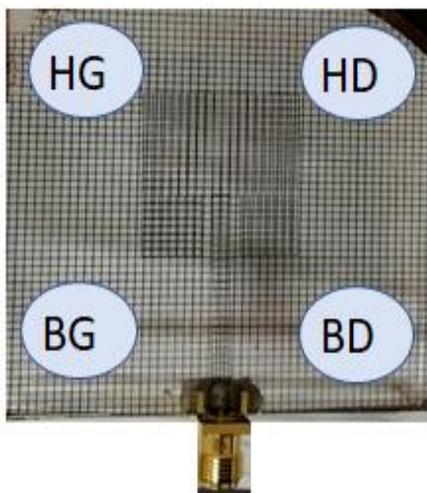


Figure 4-16 : Mesure de transparence du plan de masse de l'antenne 2

Elle est d'environ 71% au maximum et diminue sur les points de mesure HD et HG probablement du fait des résidus laissés par la gravure incomplète du cuivre qui apparaît par endroit. Ces résidus sont des conséquences du type gravure utilisé (gravure humide). Cette valeur est légèrement inférieure à sa valeur théorique qui est d'environ 76%. Par ailleurs, la chute de transparence à partir de 350nm correspond à une absorption dans le substrat de verre.

Pour ce qui est de la transparence de l'élément rayonnant sur le plan de masse, la mesure a été faite sur deux zones (rouge et noire, figure 4-17).

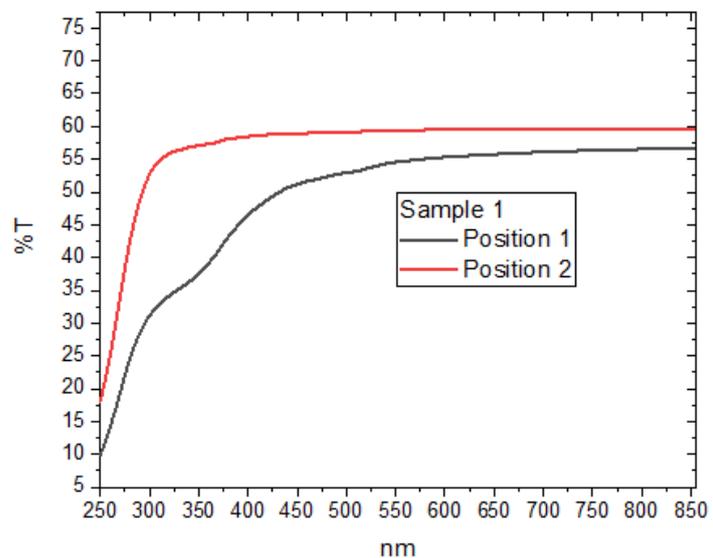
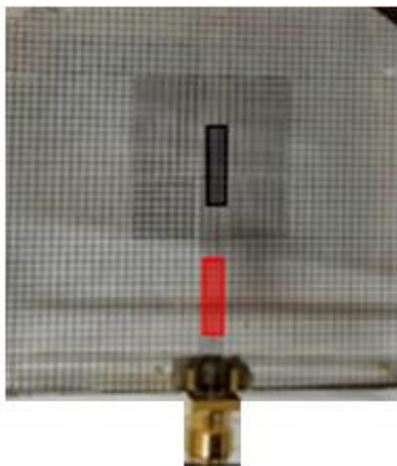


Figure 4-17 : Mesure de transparence de l'élément rayonnant et du plan de masse superposés sur l'antenne 2.

Les niveaux de transparence obtenus sont assez différents, deux explications sont possibles :

- La transparence est affectée en plusieurs endroits par des défauts d'alignement des masques l'un par rapport à l'autre. Dans ce cas, la position rouge présente un maillage qui se superpose mieux au maillage de l'autre face que la seconde position ;

- Le faisceau lumineux (représenté approximativement par les rectangles rouge et noir) a comme dimensions environ 10mm\*2mm. Il ne semble pas déborder visuellement l'antenne mais si c'est le cas, une partie de ce faisceau pourrait ne rencontrer que le maillage de l'autre face et donc être un peu moins atténué.

Néanmoins, la valeur maximale de transparence atteint malgré tout 60%.

### Transparence de l'Antenne 3

Les mêmes mesures ont été faites sur la seconde antenne grillagées (Antenne 3). La figure 4-18 présente la transparence de son plan de masse.

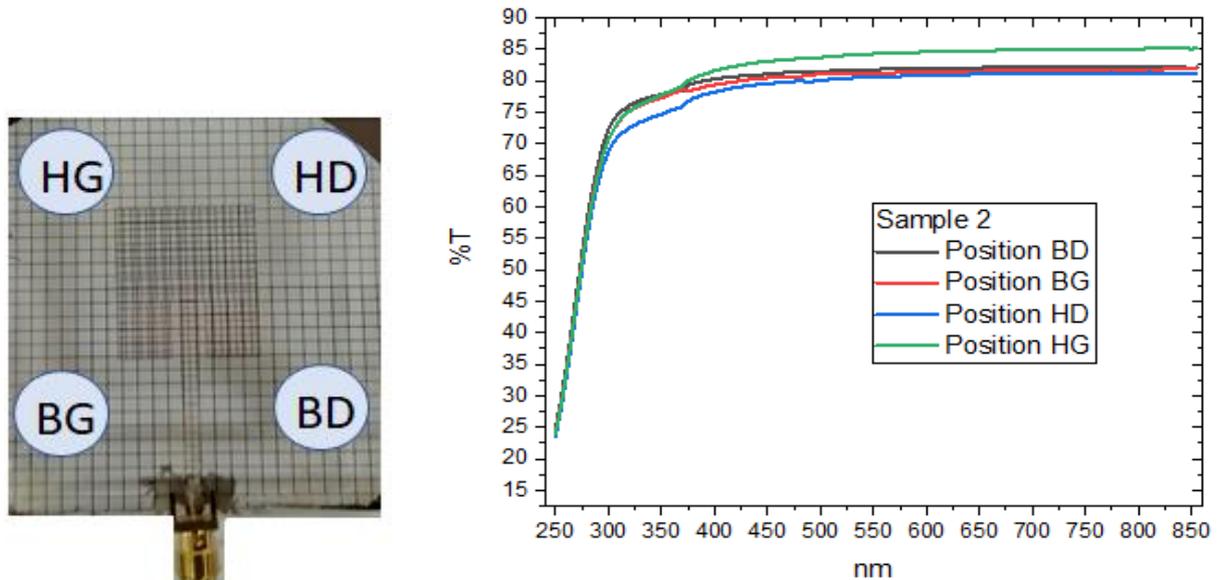


Figure 4-18 : Mesure de transparence du plan de masse de l'antenne 3.

Une transparence d'environ 85% a été mesurée sur le plan de masse seul de l'antenne grillagée à plan de masse le plus transparent. Cette valeur est légèrement supérieure à la valeur théorique qui est d'environ 83.5%. Cela peut être justifié, cette fois-ci, par l'existence de zones de sur-gravure, qui diminuent les largeurs des métallisations. Pour ce cas, celles-ci sont légèrement inférieures à 100µm (entre 90µm et 95µm). Dans ce cas, on retrouve des résultats assez semblables quelle que soit la position choisie sur le plan de masse, dans la mesure où les zones de résidus sont alors beaucoup plus réduites.

La figure 4-19 présente la transparence de l'antenne superposée sur le plan de masse.

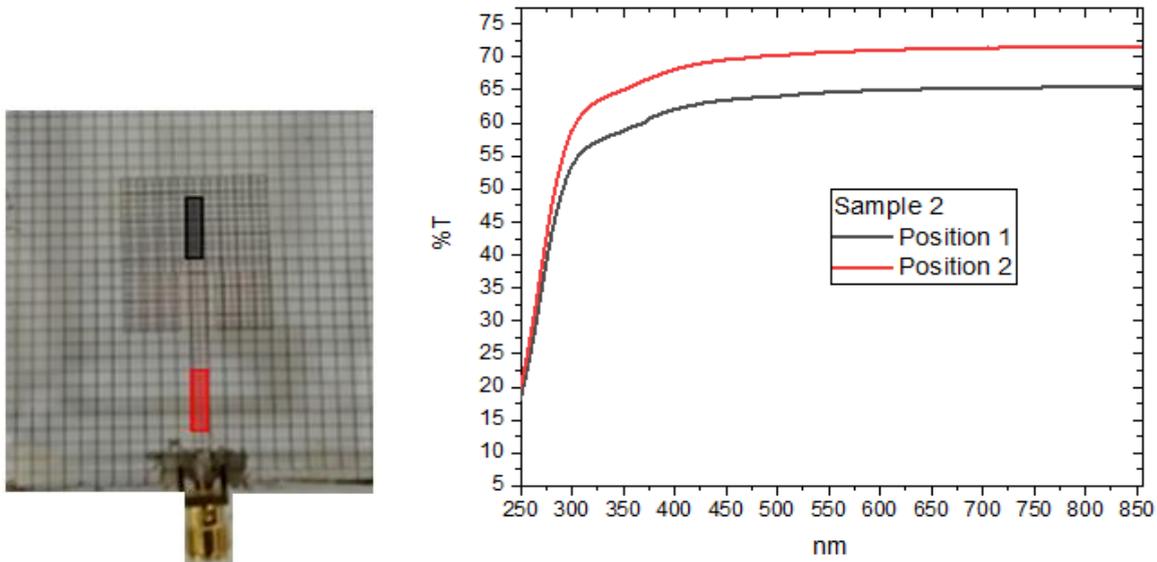


Figure 4-19 : Mesure de transparence de l'élément rayonnant et du plan de masse superposés de l'antenne 3

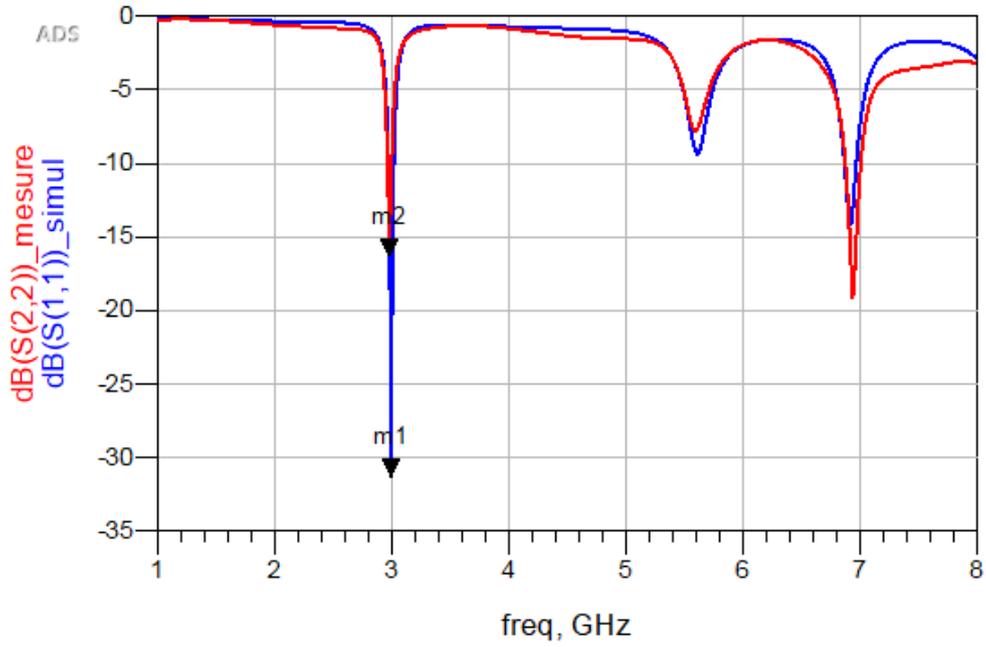
La transparence atteint au mieux environ 72%. Elle est affectée en quelques endroits par le défaut d'alignement des masques l'un par rapport à l'autre et on peut voir sur la photo que les deux maillages se superposent mieux que pour l'échantillon 1, ce qui se traduit par une différence un peu plus importante entre les deux positions de mesures.

#### 4.4.2. Résistance par carré

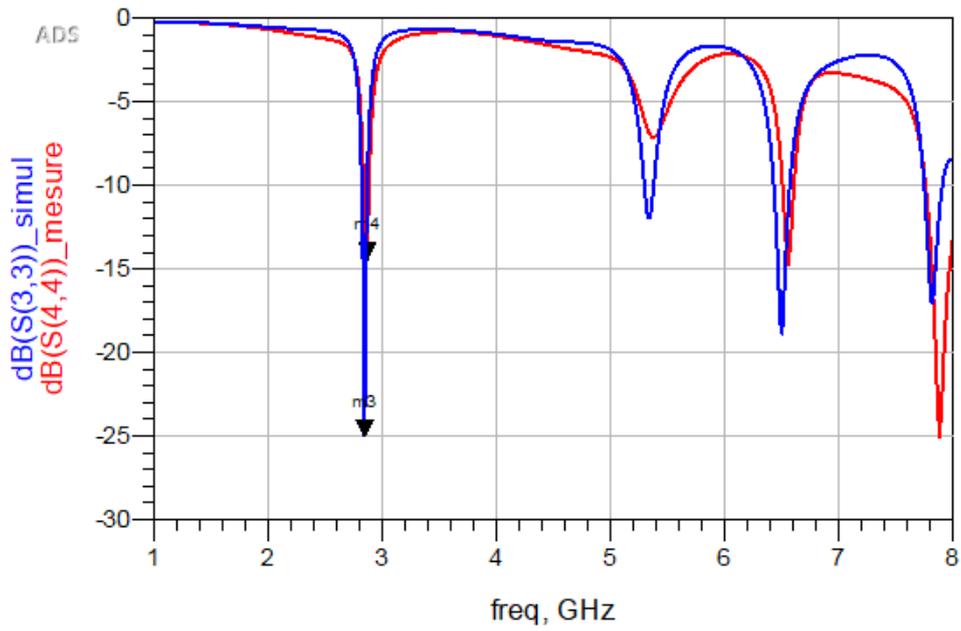
La résistance par carré n'a pas été mesurée pour les antennes à faible impact visuel (antennes grillagées) du fait de la non disponibilité de la technologie pouvant faire ces mesures.

#### 4.4.3. Mesure du coefficient de réflexion des antennes

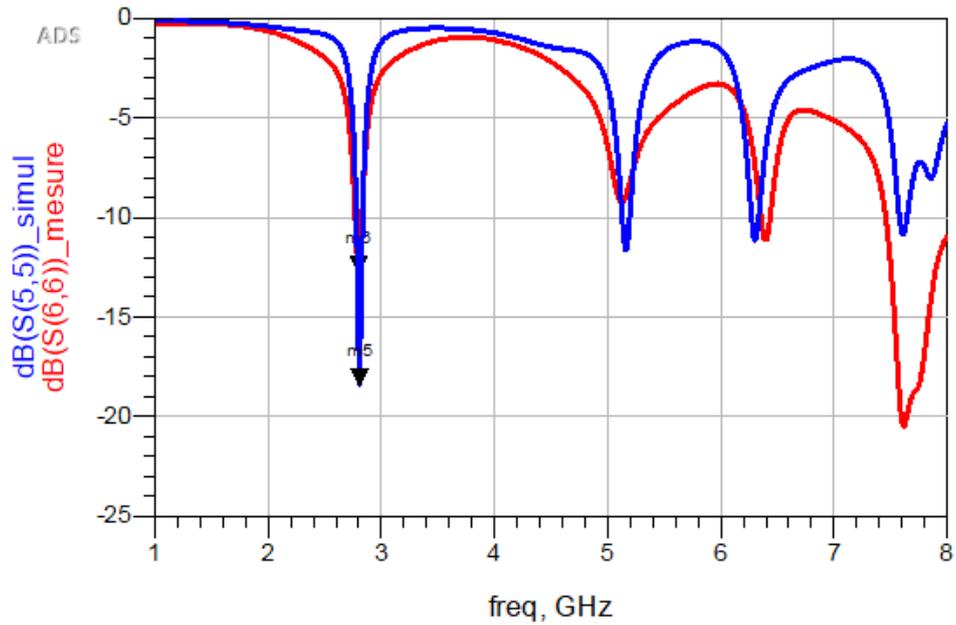
Le tableau 4-4 et la figure 4-20 permettent de comparer les résultats obtenus sur la fréquence centrale et sur la bande de fréquence d'adaptation mesurées sur analyseur de réseau vectoriel et simulées sur HFSS pour chaque antenne.



a) Antenne de Référence (Antenne 1)



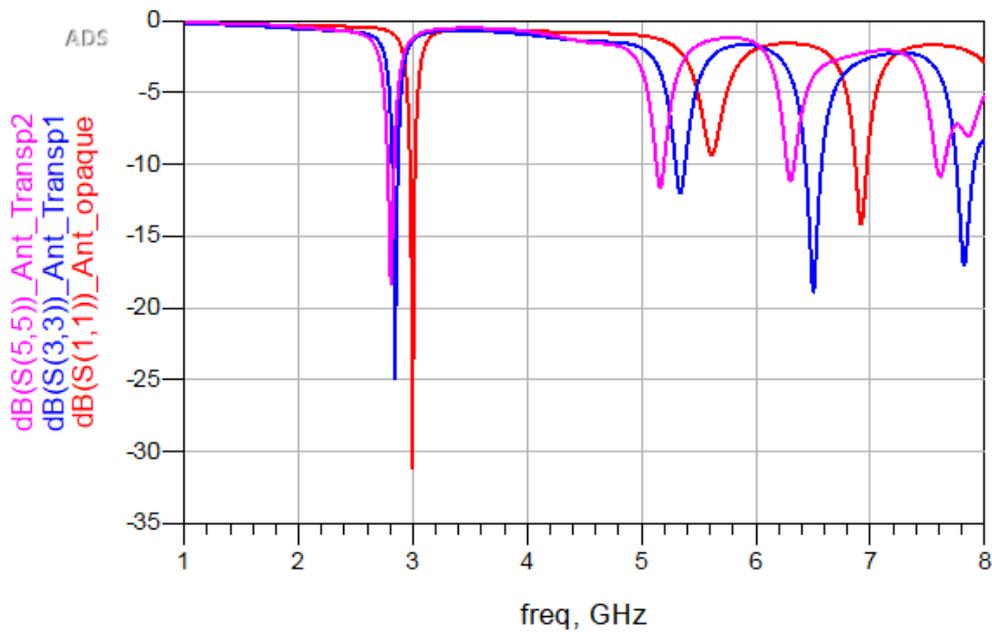
b) Antenne 2 (Maillée)



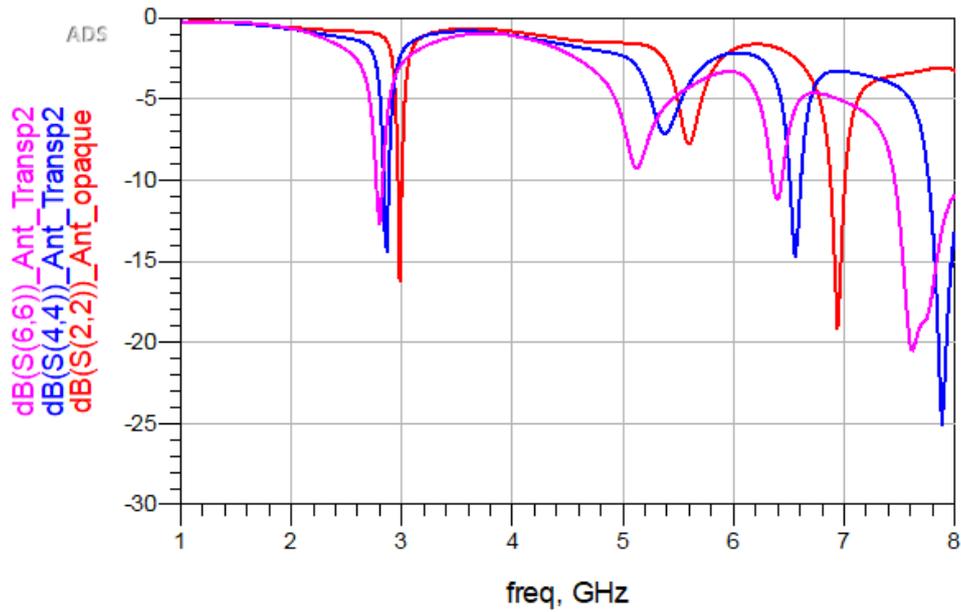
c) Antenne 3 (Maillée)

Figure 4-20 : Comparaison simulation/mesure du coefficient de réflexion des différentes antennes

On observe une bonne corrélation entre eux sur le premier mode de résonance. Un léger décalage existe malgré tout sur la fréquence de résonance (figure 4-21) qui est dû notamment à une légère modification des dimensions des métallisations lors de la gravure et aux incertitudes de mesures.



a) Simulation  $S_{11}$



b) Mesure  $S_{11}$

Figure 4-21: Comparaison fréquences de résonance a) simulation b) mesure des antennes

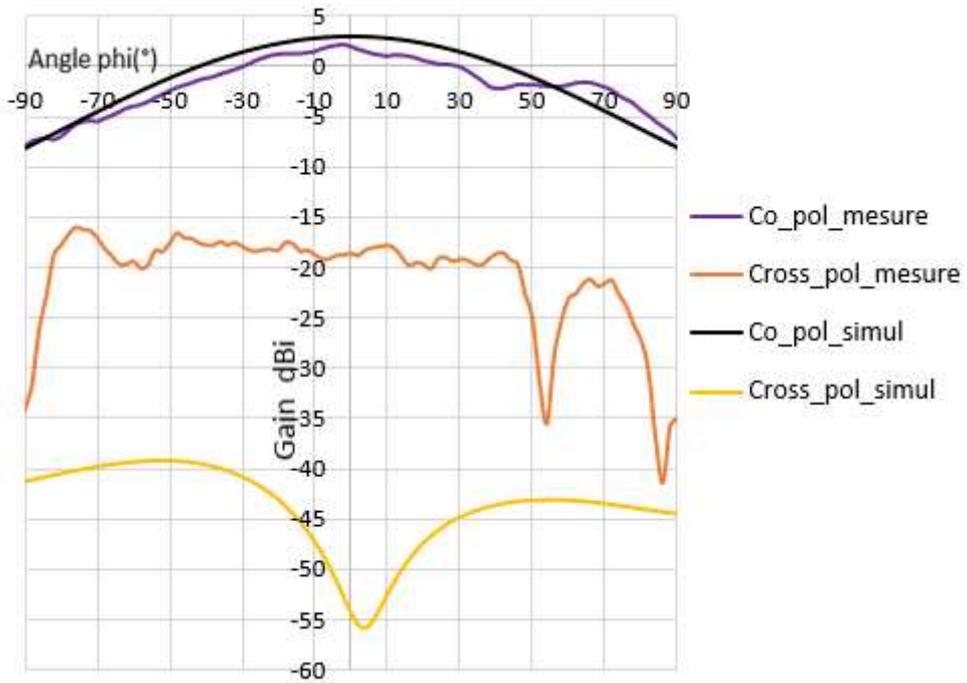
|   | Antenne 1 | Antenne 2 | Antenne 3 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Simulation $f_0$ mode fondamental (GHz) | 2.99      | 2.84      | 2.808     |
| Mesure $f_0$ mode fondamental (GHz)     | 2.98      | 2.86      | 2.8       |
| Simulation Bw (%) -10dB                 | 1.37      | 1.73      | 2.2       |
| Mesure Bw (%) -10dB                     | 1.30      | 1.60      | 2.10      |

Tableau 4-4 : Comparaison mesure/simulation sur le mode fondamental de la réponse en fréquence des antennes

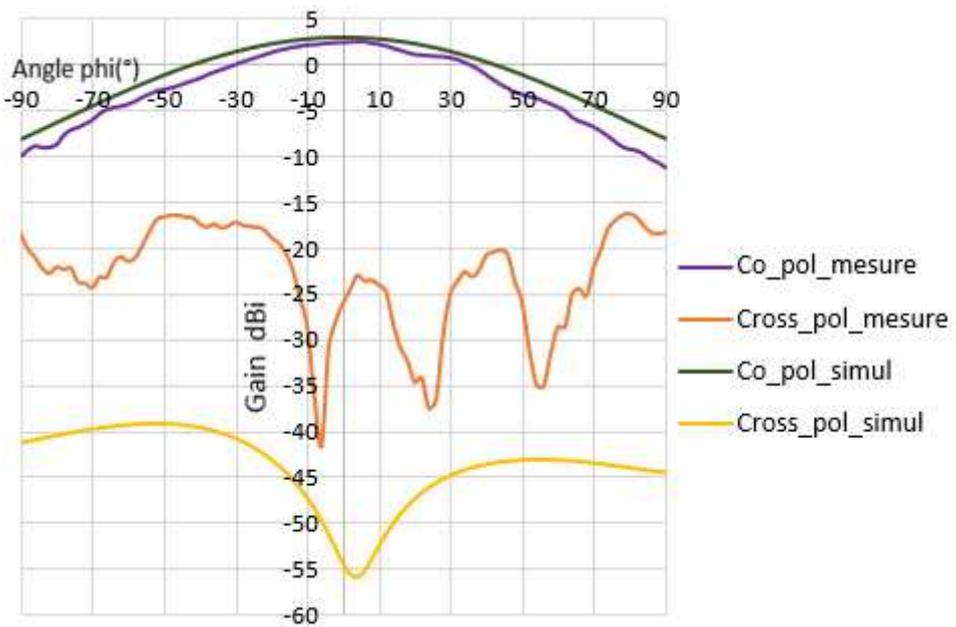
Les écarts sur la bande passante entre simulation et mesure peuvent être justifiés par la prise en compte, plus ou moins juste, des pertes dans le substrat ou les conducteurs.

#### 4.4.4. Mesure du rayonnement des antennes (Gain et diagramme de rayonnement)

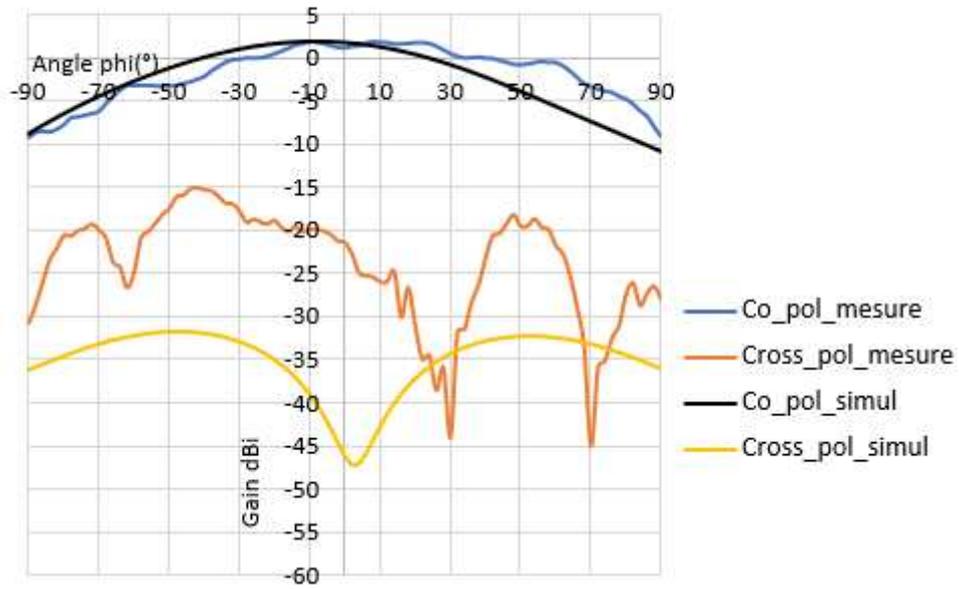
Les diagrammes de rayonnement mesurés et simulés des trois antennes, aux fréquences de résonance du mode fondamental, sont comparés sur la figure 4-23. Les valeurs des résultats de mesures sont regroupées dans le tableau 4-5.



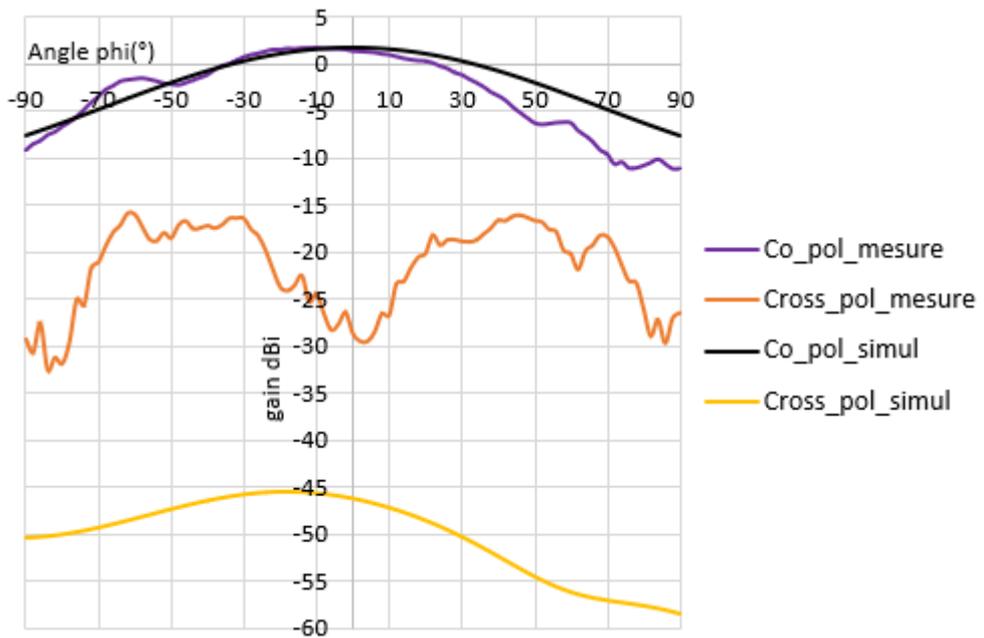
a) Antenne 1 (Plan E)



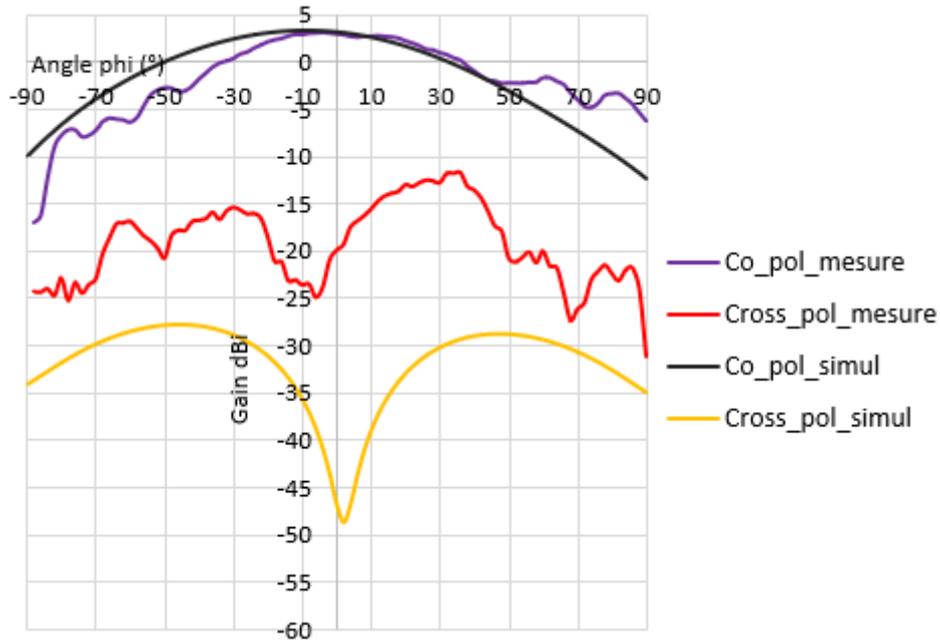
b) Antenne 1 (Plan H)



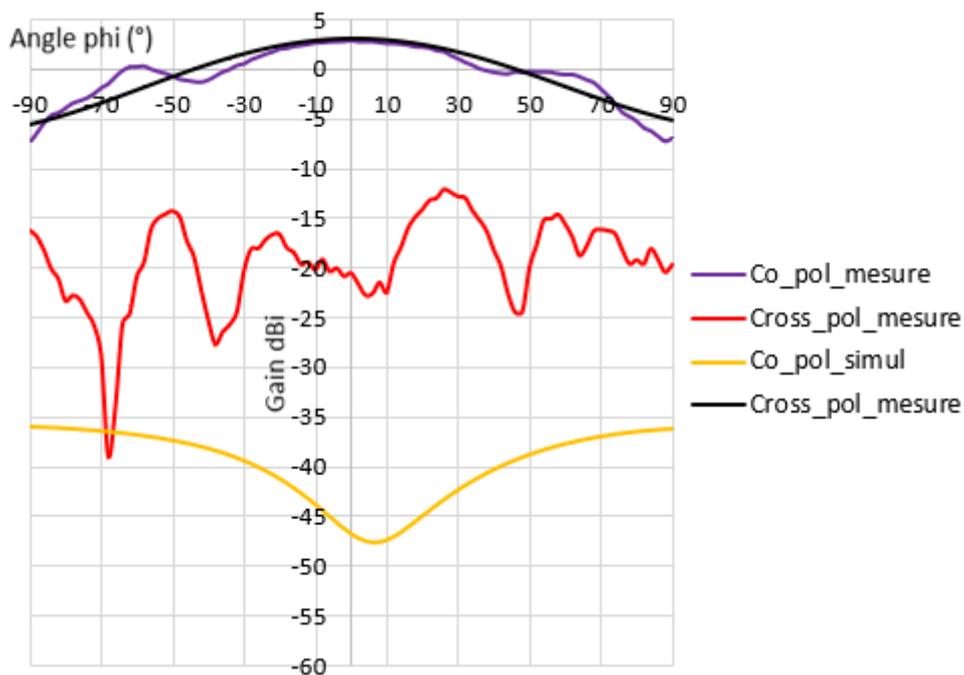
c) Antenne 2 (Plan E)



d) Antenne 2 (Plan H)



e) Antenne 3 (Plan E)



f) Antenne 3 (Plan H)

Figure 4-22 : Diagrammes de rayonnement des antennes

Les résultats montrent un assez bon accord en co-polarisation. La principale différence entre eux se situe au niveau des écarts de niveaux de polarisation croisée, de l'ordre de 20 dB. Les différences entre simulations et mesures sont probablement dues à des incertitudes de fabrication et de mesure. Les diagrammes de rayonnement mesurés ont pu être affectés par divers facteurs : la rugosité à la surface du dépôt métallique, la non-uniformité de l'épaisseur du métal, la soudure des connecteurs à froid avec de la colle conductrice...

|                          | Antenne 1<br>(Opaque) | Antenne 2<br>(Maillée) | Antenne 3<br>(Maillée) |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Simulation (gain en dBi) | 3                     | 1.96                   | 3.27                   |
| Mesure (gain en dBi)     | 2.3                   | 1.8                    | 3.22                   |

*Tableau 4-5 : Valeur du Gain (simulation et mesure)*

Pour conclure, l'antenne 3 semble présenter les meilleures performances en termes de bande passante, de transparence et de gain par rapport aux deux autres antennes.

#### 4.5. Conclusion

Les performances optiques et électromagnétiques de trois antennes patch conçues sur substrat verre Borofloat 33 avec des métallisations multicouches Titane/Cuivre de  $6.5\mu\text{m}$  d'épaisseur ont été comparées. L'antenne en cuivre grillagé avec le plan de masse le plus transparent présente les meilleures caractéristiques : une résistance carrée aussi faible que  $0.028\ \Omega/\text{carré}$  en simulation avec un gain égal à 3.22 dBi en mesure, supérieur de celui de l'antenne opaque de 2.26 dBi à 2.99 GHz, tout en conservant une transparence optique élevée de 73% dans le spectre de la lumière visible. La solution technologique proposée permet donc de concevoir et de fabriquer des antennes transparentes avec des performances hyperfréquences très proches de celles des antennes conventionnelles et opaques. En comparaison, les antennes transparentes réalisées présentent des performances hyperfréquences élevées par rapport à celles réalisées à partir de solutions ultrafines métalliques, OTC ou multicouches. Une technique de simulation a permis de dimensionner l'antenne maillée à partir d'une antenne opaque.

# Conclusion Générale et Perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés dans le cadre d'une cotutelle entre l'Université des Sciences des Techniques et des Technologies de Bamako (Mali) et l'Institut d'Électronique et des Technologies du numéRique (site de Nantes, France). Ils se rapportent à la conception et à la réalisation d'antennes à faible impact visuel grillagées. Les antennes présentées dans le cadre de ces travaux de thèse reposent sur le principe du dépôt de couches épaisses maillées sur du verre technologique en Borosilicate.

Un premier chapitre a été consacré à une synthèse bibliographique, aussi exhaustive que possible, qui a permis de répertorier les différents matériaux conducteurs à faible impact visuel, notamment les films métalliques ultraminces, les oxydes transparents et conducteurs, les structures multicouches, le graphène, les nanofils conducteurs, le grillage métallique, le maillage à pas micrométrique et le micromaillage métallique. Les couches maillées permettent d'obtenir le meilleur compromis entre conductivité et transmittance optique avec un facteur de mérite d'environ 150 000 pour le grillage métallique et de 70000 pour le maillage à pas micrométrique. Le choix qui a été fait est donc d'utiliser une technologie de dépôt de couches métalliques grillagées sur substrat optiquement transparent. Celui-ci présente une transparence optique dans le domaine du visible ajustable entre 70% et 90% et une résistance par carré de  $0.015 \Omega/\text{sq}$ . Différentes familles de substrats transparents sont ensuite présentées : les verres électroniques, les substrats monocristallins ainsi que les substrats organiques. Une comparaison des paramètres diélectriques et optiques de ces différents matériaux a été effectuée. Lors de cette étude, les verres électroniques, et plus particulièrement la référence de verre Borofloat 33, ont été sélectionnés en raison de leurs caractéristiques diélectriques contrôlées et de leurs pertes diélectriques raisonnables ( $\epsilon_r = 4.5$  et  $\tan \delta = 0.012$ ). Cette partie se termine par la présentation des antennes à faible impact visuel déjà existantes dans la littérature.

La deuxième partie a développé quelques techniques de caractérisation diélectrique existantes. Une technique de caractérisation large bande a été mise en œuvre pour l'extraction des paramètres diélectriques du substrat Borofloat 33 sur une large bande de fréquence (de 100MHz à 8GHz), ce qui a rendu possible le dimensionnement des antennes réalisées. Une étude menée sur la transmission des ondes sur une ligne grillagée a permis de constater des pertes par rapport aux lignes pleines.

La troisième partie s'est focalisée sur la technologie de la réalisation des structures grillagées. Trois prototypes ont pu être réalisés par photolithographie, électrodéposition et gravure chimique humide.

La quatrième et dernière partie présente les résultats de mesure obtenus. Les performances hyperfréquences et optique du matériau maillé ont été évaluées lors de la conception d'une antenne patch et comparées à celles d'une antenne de référence réalisée à partir de couches métalliques opaques dans la même technologie. Enfin, une méthode de simulation des structures maillées à partir des structures pleines a été initiée.

Ainsi, les nombreuses études engagées ont permis de lever différents verrous technologiques et de conception associés au matériau métallique maillé dans le domaine hyperfréquence (pertes par effet de peau, décalage en fréquence, alignement des métallisations, problèmes associés à la soudure de la connectique...)

Les problèmes mécaniques associés à la connectique (accroche des connecteurs) existent. Il est compliqué voire impossible d'envisager une connectique arrivant à travers le plan de masse avec les substrats en verre car elle nécessite un perçage. Un autre problème est

la montée en épaisseur de la métallisation qui a tendance à se décoller. Il serait intéressant d'approfondir cette étude en développant des prototypes à plus faible impact visuel en travaillant sur les dimensions et l'alignement des maillages. La méthode de simulation de l'antenne grillagée par une antenne opaque doit être approfondie afin de permettre une simulation plus simple et rapide des structures grillagées.

## Références Bibliographiques

- [1] X. Castel, M. Himdi, et F. Colombel, « Comparison of the Microwave Performance of Transparent Monopole Antennas Made of Different Transparent Conducting Films », in 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA), sept. 2018, p. 1-4.
- [2] C.-Y. Chiu, S. Shen, et R. Murch, Transparent Dual-band Antenna for Smart Watch Applications. 2017, p. 192.
- [3] D. S. Hecht, L. Hu, et G. Irvin, « Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures », *Adv. Mater.*, vol. 23, n° 13, p. 1482-1513, 2011
- [4] B. Chavillon, « Synthèse et caractérisation d'oxydes transparents conducteurs de type p pour application en cellules solaires à colorant. », p. 193.
- [5] « TIBTECH innovations: Metal properties comparison: electric conductivity, thermal conductivity, density, melting temperature ». [https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=fr\\_FR](https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=fr_FR) (consulté le 29 septembre 2021).
- [6] « Comment savoir si mes vitres teintées sont conformes ? », ASFFV - Association Sécurité et Filtration des Films pour Vitrage, 4 décembre 2016. <https://www.asffv.fr/comment-savoir-si-mes-vitres-teintees-sont-conformes/> (consulté le 29 septembre 2021).
- [7] « Spectrophotométrie », Wikipédia. 17 avril 2020. Consulté le: 29 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Spectrophotom%C3%A9trie&oldid=169668049>
- [8] L. Martinez, D. S. Ghosh, S. Giurgola, P. Vergani, et V. Pruneri, « Ultrathin metal film: An emerging transparent electrode for the optoelectronics industry », in 2008 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, sept. 2008, p. 15-17.
- [9] G. J. Exarhos et X.-D. Zhou, « Discovery-based design of transparent conducting oxide films », *Thin Solid Films*, vol. 515, n° 18, p. 7025-7052, juin 2007.
- [10] Y. Zhou et R. Azumi, « Carbon nanotube based transparent conductive films: progress, challenges, and perspectives », *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 17, n° 1, p. 493-516, déc. 2016
- [11] Q. <https://www.quadsimia.com>, « Indium Compounds | Inorganic Compounds | Products made by Indium Corporation », Indium Corporation. <https://www.indium.com/products/inorganic-compounds/indium-compounds/> (consulté le 29 octobre 2021).
- [12] J. R. Saberlin et C. Furse, « Optically Transparent Patch Antennas », *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, n° 3, p. 7, 2012.
- [13] S. Boycheva, A. K. Sytchkova, M. L. Grilli, et A. Piegari, « Structural, optical and electrical peculiarities of r.f. plasma sputtered indium tin oxide films », *Thin Solid Films*, vol. 515, n° 24, p. 8469-8473, oct. 2007
- [14] A. E. Rakhshani, Y. Makdisi, et H. A. Ramazaniyan, « Electronic and optical properties of fluorine-doped tin oxide films », *J. Appl. Phys.*, vol. 83, n° 2, p. 1049-1057, janv. 1998

- [15] D. Ghosh, L. Martinez, S. Giurgola, P. Vergani, et V. Pruneri, « Widely transparent electrodes based on ultrathin metals », *Opt. Lett.*, vol. 34, p. 325-7, févr. 2009
- [16] F. Colombel, X. Castel, M. Himdi, G. Legeay, S. Vigneron, et E. M. Cruz, « Ultrathin metal layer, ITO film and ITO/Cu/ITO multilayer towards transparent antenna », *IET Sci. Meas. Amp Technol.*, vol. 3, n° 3, p. 229-234, mai 2009
- [17] M. R. Haraty, M. Naser-Moghadasi, A. A. Lotfi-Neyestanak, et A. Nikfarjam, « Improving the Efficiency of Transparent Antenna Using Gold Nanolayer Deposition », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 15, p. 4-7, 2016
- [18] C. Guillén et J. Herrero, « TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics », *Thin Solid Films*, vol. 520, n° 1, p. 1-17, oct. 2011
- [19] K.-H. Choi et al., « Highly flexible and transparent InZnSnOx/Ag/InZnSnOx multilayer electrode for flexible organic light emitting diodes », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, n° 22, p. 223302, juin 2008
- [20] Z. Qi, J. Cao, L. Ding, et J. Wang, « Transparent and transferrable organic optoelectronic devices based on WO<sub>3</sub>/Ag/WO<sub>3</sub> electrodes », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, n° 5, p. 053304, févr. 2015
- [21] Y.-S. Park, K.-H. Choi, et H.-K. Kim, « Room temperature flexible and transparent ITO/Ag/ITO electrode grown on flexible PES substrate by continuous roll-to-roll sputtering for flexible organic photovoltaics », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 42, n° 23, p. 235109, nov. 2009
- [22] J.-A. Jeong, Y.-S. Park, et H.-K. Kim, « Comparison of electrical, optical, structural, and interface properties of IZO-Ag-IZO and IZO-Au-IZO multilayer electrodes for organic photovoltaics », *J. Appl. Phys.*, vol. 107, n° 2, p. 023111, janv. 2010.
- [23] M. Sawada, M. Higuchi, S. Kondo, et H. Saka, « Characteristics of Indium-Tin-Oxide/Silver/Indium-Tin-Oxide Sandwich Films and Their Application to Simple-Matrix Liquid-Crystal Displays », *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, n° 5R, p. 3332, mai 2001,
- [24] J.-A. Jeong, H.-K. Kim, H.-W. Koo, et T.-W. Kim, « Transmission electron microscopy study of degradation in transparent indium tin oxide/Ag/indium tin oxide multilayer films », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, n° 1, p. 011902, juill. 2013
- [25] H.-W. Lee, H.-J. Cho, et S.-G. Yoon, « Transparent Bi<sub>3</sub>NbO<sub>7</sub> Dielectrics Grown on Flexible Polymer Substrates by Nanocluster Deposition », *Electrochem. Solid-State Lett.*, vol. 12, n° 11, p. G72, août 2009.
- [26] G. Korotcenkov, B. K. Cho, L. B. Gulina, et V. P. Tolstoy, « Gas Sensing Properties of SnO<sub>2</sub> Thin Films Modified by Ag Nanoclusters Synthesized by SILD Method », *Int. J. Mater. Metall. Eng.*, vol. 5, n° 9, p. 776-779, sept. 2011.
- [27] S. Sutthana, N. Hongsith, et S. Choopun, « AZO/Ag/AZO multilayer films prepared by DC magnetron sputtering for dye-sensitized solar cell application », *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, n° 3, p. 813-816, mai 2010
- [28] J. Y. Lee et al., « Dependence of intermediated noble metals on the optical and electrical properties of ITO/metal/ITO multilayers », *Opt. Commun.*, vol. 12, n° 282, p.2362-2366, 2009
- [29] C. Guillén et J. Herrero, « ITO/metal/ITO multilayer structures based on Ag and Cu metal films for high-performance transparent electrodes », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, n° 8, p. 938-941, août 2008

- [30] « Optical Filters & Infrared Display Filters | Instrument Plastics ». <https://www.instrumentplastics.co.uk/> (consulté le 1 décembre 2021).
- [31] J. C. Bernède, L. Cattin, M. Morsli, et Y. Berredjem, « Ultra-thin metal layer passivation of the transparent conductive anode in organic solar cells », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 92, n° 11, p. 1508-1515, nov. 2008
- [32] A. K. Geim, « Graphene: Status and Prospects », *Science*, vol. 324, n° 5934, p. 1530-1534, juin 2009
- [33] K. H. Chung et al., « Convection-based realtime polymerase chain reaction (PCR) utilizing transparent graphene heaters », in 2014 IEEE SENSORS, nov. 2014, p. 1006-1009.
- [34] S. Bae et al., « Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes », *Nat. Nanotechnol.*, vol. 5, n° 8, p. 574-578, août 2010
- [35] K. S. Kim et al., « Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes », *Nature*, vol. 457, n° 7230, p. 706-710, févr. 2009
- [36] « Classic Science - The Kind of Science That Is Here to Stay », *Quirky Science*. <https://www.quirkyscience.com/classic-science/> (consulté le 29 octobre 2021).
- [37] Y. Wu et al., « Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters », *Opt. Express*, vol. 21, n° 18, p. 21395-21402, sept. 2013
- [38] A. Kasry et al., « Electrical and optical properties of graphene mono- and multi-layers; towards graphene-based optoelectronics », in 2010 8th International Vacuum Electron Sources Conference and Nanocarbon, oct. 2010, p. 119-120.
- [39] R. R. Nair et al., « Universal Dynamic Conductivity and Quantized Visible Opacity of Suspended Graphene », 2008.
- [40] W. Zhao, P. H. Tan, J. Liu, et A. C. Ferrari, « Intercalation of Few-Layer Graphite Flakes with FeCl<sub>3</sub>: Raman Determination of Fermi Level, Layer by Layer Decoupling, and Stability », *J. Am. Chem. Soc.*, p. 6, 2011.
- [41] D. Zhan et al., « FeCl<sub>3</sub>-Based Few-Layer Graphene Intercalation Compounds: Single Linear Dispersion Electronic Band Structure and Strong Charge Transfer Doping », *Adv. Funct. Mater.*, vol. 20, n° 20, p. 3504-3509, 2010.
- [42] Y. Wang, S. W. Tong, X. F. Xu, B. Özyilmaz, et K. P. Loh, « Interface Engineering of Layer-by-Layer Stacked Graphene Anodes for High-Performance Organic Solar Cells », *Adv. Mater.*, vol. 23, n° 13, p. 1514-1518, 2011.
- [43] A. Kasry, M. A. Kuroda, G. J. Martyna, G. S. Tulevski, et A. A. Bol, « Chemical Doping of Large-Area Stacked Graphene Films for Use as Transparent, Conducting Electrodes », *ACS Nano*, vol. 4, n° 7, p. 3839-3844, juill. 2010.
- [44] A. M. Tareki, R. G. Lindquist, W. Kim, M. S. Heimbeck, et J. Guo, « Terahertz Transparent Electrode Using Tripod Metal Aperture Array », *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 7, n° 1, p. 80-85, janv. 2017, doi: 10.1109/TTHZ.2016.2625044.
- [45] I. Khrapach et al., « Novel Highly Conductive and Transparent Graphene-Based Conductors », *Adv. Mater.*, vol. 24, n° 21, p. 2844-2849, 2012.
- [46] S. Y. Jeong, S. H. Kim, J. T. Han, H. J. Jeong, S. Yang, et G.-W. Lee, « High-Performance Transparent Conductive Films Using Rheologically Derived Reduced Graphene Oxide », *ACS Nano*, vol. 5, n° 2, p. 870-878, févr. 2011

- [47] « Lenovo Selects Cambrios' Silver Nanowire-Based ClearOhm Technology for Advanced Touchscreen Experience », AZoNano.com, 3 octobre 2013. <https://www.azonano.com/news.aspx?newsID=28414> (consulté le 1 octobre 2021).
- [48] B. Stahlmecke, F.-J. Meyer zu Heringdorf, L. I. Chelaru, M. Horn-von Hoegen, G. Dumpich, et K. R. Roos, « Electromigration in self-organized single-crystalline silver nanowires », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, n° 5, p. 053122, 2006.
- [49] J.-Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, et P. Peumans, « Solution-processed metal nanowire mesh transparent electrodes », *Nano Lett.*, vol. 8, n° 2, p. 689-692, févr. 2008.
- [50] A. R. Madaria, A. Kumar, et C. Zhou, « Large scale, highly conductive and patterned transparent films of silver nanowires on arbitrary substrates and their application in touch screens », *Nanotechnology*, vol. 22, n° 24, p. 245201, juin 2011
- [51] S. De et al., « Silver Nanowire Networks as Flexible, Transparent, Conducting Films: Extremely High DC to Optical Conductivity Ratios », *ACS Nano*, vol. 3, n° 7, p. 1767-1774, juill. 2009.
- [52] X.-Y. Zeng, Q.-K. Zhang, R.-M. Yu, et C.-Z. Lu, « A New Transparent Conductor: Silver Nanowire Film Buried at the Surface of a Transparent Polymer », *Adv. Mater.*, vol. 22, n° 40, p. 4484-4488, 2010.
- [53] Z. Yu et al., « Highly Flexible Silver Nanowire Electrodes for Shape-Memory Polymer Light-Emitting Diodes », *Adv. Mater.*, vol. 23, n° 5, p. 664-668, 2011.
- [54] L. Xu, Y. Yang, Z.-W. Hu, et S.-H. Yu, « Comparison Study on the Stability of Copper Nanowires and Their Oxidation Kinetics in Gas and Liquid », *ACS Nano*, vol. 10, n° 3, p. 3823-3834, mars 2016.
- [55] M. Lagrange, D. P. Langley, G. Giusti, C. Jiménez, Y. Bréchet, et D. Bellet, « Optimization of silver nanowire-based transparent electrodes: effects of density, size and thermal annealing », *Nanoscale*, vol. 7, n° 41, p. 17410-17423, oct. 2015.
- [56] A. R. Madaria, A. Kumar, F. N. Ishikawa, et C. Zhou, « Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique », *Nano Res.*, vol. 3, n° 8, p. 564-573, août 2010.
- [57] J. Song, J. Li, J. Xu, et H. Zeng, « Superstable Transparent Conductive Cu@Cu<sub>4</sub>Ni Nanowire Elastomer Composites against Oxidation, Bending, Stretching, and Twisting for Flexible and Stretchable Optoelectronics », *Nano Lett.*, vol. 14, n° 11, p. 6298-6305, nov. 2014.
- [58] L. Maillaud, « Formulation d'encre conductrices à base de nanotubes de carbone pour le développement d'électrodes transparentes », p. 159.
- [59] R. M. Reilly, « Carbon Nanotubes: Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine », *J. Nucl. Med.*, vol. 48, n° 7, p. 1039-1042, juill. 2007.
- [60] S. Xie, W. Li, Z. Pan, B. Chang, et L. Sun, « Mechanical and physical properties on carbon nanotube », *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 61, n° 7, p. 1153-1158, juill. 2000.
- [61] M. W. Rowell et al., « Organic solar cells with carbon nanotube network electrodes », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, n° 23, p. 233506, juin 2006
- [62] E. Artukovic, M. Kaempgen, D. S. Hecht, S. Roth, et G. Grüner, « Transparent and Flexible Carbon Nanotube Transistors », *Nano Lett.*, vol. 5, n° 4, p. 757-760, avr. 2005.

- [63] K. Bradley, J.-C. P. Gabriel, et G. Grüner, « Flexible Nanotube Electronics », *Nano Lett.*, vol. 3, n° 10, p. 1353-1355, oct. 2003.
- [64] C. Aguirre, S. Auvray, S. Pigeon, R. Izquierdo, P. Desjardins, et R. Martel, « Carbon nanotube sheets as electrodes in organic light-emitting diodes. », 2006.
- [65] W. He et C. Ye, « Flexible Transparent Conductive Films on the Basis of Ag Nanowires: Design and Applications: A Review », *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 31, n° 6, p. 581-588, juin 2015.
- [66] S. H. Kim, H. J. Shin, K. Shin, S. H. Park, et D. Kim, « Characterization of flexible hybrid transparent conductive films fabricated with silver nanowires and carbon nanotubes for organic solar cells », in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, juin 2013, p. 2731-2733.
- [67] T. Tokuno, M. Nogi, J. Jiu, et K. Suganuma, « Hybrid transparent electrodes of silver nanowires and carbon nanotubes: a low-temperature solution process », *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 7, n° 1, p. 281, déc. 2012.
- [68] T. Yasin, « Optically Transparent Multifunctional Patch Antennas Integrated with Solar Cells for Small Satellites », p. 11.
- [69] J. Hautcoeur et al., « Transparency and electrical properties of meshed metal films », *Thin Solid Films*, vol. 519, n° 11, p. 3851-3858, mars 2011.
- [70] A. Martin, X. Castel, M. Himdi, et O. Lafond, « Mesh parameters influence on transparent and active antennas performance at microwaves », *AIP Adv.*, vol. 7, n° 8, p. 085120, août 2017.
- [71] Pierre-Antoine GARCIA, « Conception d'antennes optiquement transparentes pour stations de base », Université de Nantes, Nantes, 2014.
- [72] S. K. A. Rahim, M. L. Samingan, et B. M. Saady, « Transparent Butler Matrix using Micro-metal Mesh conductive film as a conducting element », in *2016 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, déc. 2016, p. 105-108.
- [73] B. M. Sa'ad, S. K. A. Rahim, T. Peter, M. Abedian, et S. Danesh, « Transparent microwave crossover for transparent Butler matrix using micro-metal mesh conductive film », in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, avr. 2015, p. 1-3.
- [74] « Soda-lime float glass with sight-glass quality ». <https://www.pgo-online.com/intl/soda-lime-glass.html> (consulté le 6 novembre 2021).
- [75] Y. Moriya, T. Krajangsang, P. Sihanugrist, et M. Konagai, « Development of high-efficiency tandem silicon solar cells on W-textured Zinc oxide-coated soda-lime glass substrates », in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, juin 2012, p. 003020-003023.
- [76] M. Yan, M. Lane, C. R. Kannewurf, et R. P. H. Chang, « Highly conductive epitaxial CdO thin films prepared by pulsed laser deposition », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, n° 16, p. 2342-2344, avr. 2001.
- [77] T. Konaka, M. Sato, H. Asano, et S. Kubo, « Relative permittivity and dielectric loss tangent of substrate materials for high-Tc superconducting film », *J. Supercond.*, vol. 4, n° 4, p. 283-288, août 1991.

- [78] Handbook of RF, Microwave, and Millimeter-wave Components. Consulté le: 27 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur: [https://books.google.com/books/about/Handbook\\_of\\_RF\\_Microwave\\_and\\_Millimeter.html?hl=fr&id=bHhYjINB6KMC](https://books.google.com/books/about/Handbook_of_RF_Microwave_and_Millimeter.html?hl=fr&id=bHhYjINB6KMC)
- [79] « Corning glass 1737 », [En ligne]. Disponible sur: <http://www.delta-technologies.com/downloads/Corning%201737.pdf>
- [80] « Corning Eagle XG Glass Wafers | Coresix Precision Glass ». <https://www.coresix.com/corning-eagle-xg-wafers> (consulté le 15 avril 2022).
- [81] « Borosilikatglas BOROFLOAT® - Downloads | SCHOTT AG ». <https://www.schott.com/borofloat/english/download/index.html> (consulté le 27 mars 2021).
- [82] « tpx\_e.pdf ».
- [83] Julien Hautcoeur, « Conception d'un matériau transparent conducteur efficace. Application aux antennes panneaux transparentes pour les réseaux radio cellulaires mobiles. », Rennes 1, Rennes, 2011.
- [84] M. R. Harati, M. Naser-Moghadasi, A. A. Lotfi-Neyestanak, et A. Nikfarjam, « Improving the Efficiency of Transparent Antenna Using Gold Nano Layer Deposition », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, p. 1-1, 2015
- [85] « Circular Ring Optically Transparent Antenna for Ultra-Wideband Applications », *ACES J.*, vol. 30, n° 2, févr. 2015.
- [86] « ITO Film | ITO Coatings | Instrument Plastics ». <https://www.instrumentplastics.co.uk/products/ito-film-and-ito-coatings> (consulté le 16 avril 2022).
- [87] A. Desai, T. Upadhyaya, M. Palandoken, R. Patel, et U. Patel, « Dual band optically transparent antenna for wireless applications », in *2017 IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, nov. 2017, p. 960-963
- [88] H. J. Song, T. Y. Hsu, D. F. Sievenpiper, H. P. Hsu, J. Schaffner, et E. Yasan, « A Method for Improving the Efficiency of Transparent Film Antennas », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, p. 753-756, 2008,
- [89] T. Yasin, R. Baktur, et C. Furse, « A comparative study on two types of transparent patch antennas », in *2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium*, août 2011, p. 1-4.
- [90] S. Hong, Y. Kim, et C. W. Jung, « Transparent UWB Antenna with IZTO/Ag/IZTO Multilayer Electrode Film », *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2016, p. e6751790, oct. 2016.
- [91] A. Elakkiya, S. Radha, B. S. Sreeja, et E. Manikandan, « Optically transparent efficient terahertz patch antenna for space applications », *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 20, n° September-October 2018, p. 474-478, oct. 2018.
- [92] A. Sreekantan Thampy, M. Darak, et D. Kumar, « Analysis of graphene based optically transparent patch antenna for terahertz communications », *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures*, vol. 66, janv. 2015.
- [93] R. Hasan, R. Baktur, M. Ricci, C. E. Treacy, et R. Sivarajan, « Analysis of an Optically Transparent Antenna Designed from Silver-Carbon Nanotube Hybrid Conductive

- Coating », in 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), août 2021, p. 1-3.
- [94] B. S. Kim et al., « Reversibly Stretchable, Optically Transparent Radio-Frequency Antennas Based on Wavy Ag Nanowire Networks », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, n° 4, p. 2582-2590, févr. 2016.
- [95] T. W. Turpin et R. Baktur, « Meshed Patch Antennas Integrated on Solar Cells », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, p. 693-696, 2009.
- [96] T. W. Turpin et R. Baktur, « See-through Microstrip Antennas and Their Optimization », p. 4.
- [97] S. H. Kang et C. W. Jung, « Transparent Patch Antenna Using Metal Mesh », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, n° 4, p. 2095-2100, avr. 2018.
- [98] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, et D. C. Degroot, « High-frequency dielectric measurements », *IEEE Instrum. Meas. Mag.*, vol. 13, n° 2, p. 24-31, avr. 2010.
- [99] A. Foudazi et K. M. Donnell, « Effect of Sample Preparation on Microwave Material Characterization by Loaded Waveguide Technique », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, n° 7, p. 1669-1677, juill. 2016.
- [100] K. Saeed, M. Shafique, M. Byrne, et I. Hunter, « Planar Microwave Sensors for Complex Permittivity Characterization of Materials and Their Applications », 2012.
- [101] Muhammad Taha Jilani, Muhammad Zaka ur Rehman, Abid Muhammad Khan, Muhammad Talha Khan, Syed Muzamil Ali, « A Brief Review of Measuring Techniques for Characterization of Dielectric Materials », *Int. J. Inf. Technol. Electr. Eng.*, déc. 2012.
- [102] A. Tombak et al., « Tunable barium strontium titanate thin film capacitors for RF and microwave applications », *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 12, n° 1, p. 3-5, janv. 2002.
- [103] Z. Ma et al., « RF measurement technique for characterizing thin dielectric films », *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 45, n° 8, p. 1811-1816, août 1998.
- [104] M. D. Janezic et D. F. Williams, « Permittivity characterization from transmission-line measurement », in 1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, juin 1997, vol. 3, p. 1343-1346 vol.3.
- [105] R. Alahnomi, Z. Zakaria, E. Ruslan, et A. Isa, « Comparative Study of Materials Characterization using Microwave Resonators », *Aust. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 9, p. 76-85, janv. 2015.
- [106] M. S. Venkatesh et G. S. V. Raghavan, « An overview of dielectric properties measuring techniques », *Can. Biosyst. Eng.*, vol. 47, p. 16, 2005.
- [107] A. Gregory et R. Clarke, « A Review of RF and microwave techniques for dielectric measurements on polar liquids », *Dielectr. Electr. Insul. IEEE Trans. On*, vol. 13, p. 727-743, sept. 2006.
- [108] S. N. Jha et al., « Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods-a review », *J. Food Sci. Technol.*, vol. 48, n° 4, p. 387-411, août 2011,
- [109] S. TEBACHE, « Méthodes de caractérisation hyperfréquence des antennes imprimées », masters, Université Mohamed Khider Biskra, 2013. Consulté le: 3 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://thesis.univ-biskra.dz/4029/>

- [110] J. Gamber, « N1501A Dielectric Probe Kit 10 MHz to 50 GHz », p. 16.
- [111] A. I. Mekhannikov, A. V. Myl'nikov, et L. P. Maslennikova, « Calibration of a coaxial antenna-probe for microwave dielectric measurements », *Meas. Tech.*, vol. 50, n° 4, p. 425-428, avr. 2007.
- [112] T. Ozturk et M. Güneşer, « Measurement Methods and Extraction Techniques to Obtain the Dielectric Properties of Materials », 2019. doi: 10.5772/intechopen.80276.
- [113] V. V. Varadan, K. A. Jose, et V. K. Varadan, « In situ microwave characterization of nonplanar dielectric objects », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 48, n° 3, p. 388-394, mars 2000.
- [114] T. Abbas, « Broadband microwave measurements of relative permittivity and permeability of materials », *J. Res. Sci. Zakariya Univ.*, vol. 8, p. 197, juill. 2007.
- [115] I. Choi, J. G. Kim, D. G. Lee, et I. S. Seo, « Aramid/epoxy composites sandwich structures for low-observable radomes », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 14, n° 71, p. 1632-1638, 2011.
- [116] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, et V. K. Varadan, « Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 39, n° 2, p. 387-394, avr. 1990, doi: 10.1109/19.52520.
- [117] F. M. Mbango, « Contribution A La Caractérisation des Matériaux Utilisés en Microélectronique RadioFréquence », p. 177.
- [118] A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, et S. Riad, « Fork-Coupled Resonators for High-Frequency Characterization of Dielectric Substrate Materials. », *IEEE T Instrum. Meas.*, vol. 55, p. 2216-2220, janv. 2006.
- [119] E. O. Hammerstad, « Equations for Microstrip Circuit Design », in 1975 5th European Microwave Conference, sept. 1975, p. 268-272. doi: 10.1109/EUMA.1975.332206.
- [120] T. Rovensky, A. Pietrikova, K. Ruman, et O. Kovac, « Microstrip methods for measurement of dielectric properties in High Frequency area », in 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), mai 2015, p. 188-191. doi: 10.1109/ISSE.2015.7247987.
- [121] R. L. Peterson et R. F. Drayton, « A CPW T-Resonator Technique for Electrical Characterization of Microwave Substrates », *57th ARFTG Conf. Dig.*, 2001.
- [122] D. Markovic et B. Jokanovic, « Improved Method for Measurement of the Dielectric Properties of Microwave Substrates Using Microstrip T-resonator ». juin 2007.
- [123] K.-P. Latti, M. Kettunen, J.-P. Strom, et P. Silventoinen, « A Review of Microstrip T-Resonator Method in Determining the Dielectric Properties of Printed Circuit Board Materials », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, n° 5, p. 1845-1850, oct. 2007.
- [124] E. et C. climatique Canada, « À propos de la couche d'ozone », 5 janvier 2009. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique/enjeux/couche-ozone/appauvrissement-consequences/a-propos.html> (consulté le 23 avril 2022).
- [125] « UV Ozone Cleaner | Fast Surface Cleaning & Treatment », Ossila. <https://www.ossila.com/products/uv-ozone-cleaner> (consulté le 18 mai 2022).
- [126] J.-H. Park et T. S. Sudarshan, *Chemical Vapor Deposition*. ASM International, 2001.

- [127] D. M. Mattox, Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. William Andrew, 2010.
- [128] M. Khechba, « Caractérisation de la réaction interfaciale entre une couche mince de tungstène et un substrat d'aci », 2008.
- [129] « Jong-Hee Park, T. S. Sudarshan - Chemical Vapor Deposition (Surface Engineering Series, V. 2) (2001) | PDF | Chemical Vapor Deposition | Thin Film », Scribd. <https://www.scribd.com/document/428348741/Jong-Hee-Park-T-S-Sudarshan-Chemical-Vapor-Deposition-Surface-Engineering-Series-V-2-2001-pdf> (consulté le 3 avril 2022).
- [130] « What Is Sputtering? Magnetron Sputtering? » <http://www.semicore.com/what-is-sputtering> (consulté le 15 décembre 2021).
- [131] « Dépôt de couches minces, conception et fabrication de machines PVD », Alliance Concept. <https://www.alliance-concept.com/depot-de-couches-minces.html> (consulté le 15 décembre 2021).
- [132] « What are Planar Magnetrons in PVD Coatings? » <http://www.semicore.com/news/66-planar-magnetron-pvd-coating> (consulté le 15 décembre 2021).
- [133] P. Briois, « Synthèse par pulvérisation cathodique et caractérisation d'électrolytes solides en couches minces pour piles à combustible à oxydes solides (SOFC) fonctionnant à température intermédiaire: », p. 165.
- [134] « What is Reactive Sputtering? » <http://www.semicore.com/news/67-reactive-sputtering-basics> (consulté le 15 décembre 2021).
- [135] par, « Qu'est-ce que la pulvérisation cathodique réactive ? - Spiegato », 3 novembre 2021. <https://spiegato.com/fr/quest-ce-que-la-pulverisation-cathodique-reactive> (consulté le 20 avril 2022).
- [136] « Confocal Cathode Sputtering ». <http://www.semicore.com/news/32-confocal-cathode-sputtering> (consulté le 15 décembre 2021).
- [137] « What is DC Sputtering? » <http://www.semicore.com/news/94-what-is-dc-sputtering> (consulté le 18 avril 2022).
- [138] « Pulsed DC Magnetron Sputtering | A Useful Method - VacCoat », 14 août 2019. <https://vaccoat.com/blog/pulsed-dc-magnetron-sputtering/> (consulté le 20 avril 2022).
- [139] J. Rebellato, « Miroirs interférentiels efficaces dans l'extrême ultraviolet pour la physique solaire », 2020.
- [140] « DC Sputtering VS RF Sputtering - The comparison of DC sputtering and RF sputtering ». <https://www.aemdeposition.com/sputtering-targets-news/dc-sputtering-vs-rf-sputtering.html> (consulté le 16 mai 2022).
- [141] Matthew M. Waite, S. Ismat Shah, et David A. Glocker, « Sputtering Sources », pdffox.com. <https://pdffox.com/sputtering-sources-pdf-free.html> (consulté le 16 mai 2022).
- [142] « What is RF Sputtering? » <http://www.semicore.com/news/92-what-is-rf-sputtering> (consulté le 16 mai 2022).
- [143] M. A. P. Yazdi, « Synthèse par pulvérisation cathodique et caractérisation d'électrolytes conducteurs protoniques pour les piles à combustible de type PCFC », p. 193.

- [144] « What is Pulsed DC Sputtering? » <http://www.semicore.com/news/95-what-is-pulsed-dc-sputtering> (consulté le 20 avril 2022).
- [145] K. Macák, V. Kouznetsov, J. Schneider, U. Helmersson, et I. Petrov, « Ionized sputter deposition using an extremely high plasma density pulsed magnetron discharge », *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 18, n° 4, p. 1533, juill. 2000
- [146] D. J. Christie, « Target material pathways model for high power pulsed magnetron sputtering », *J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films*, vol. 23, n° 2, p. 330, mars 2005.
- [147] U. Helmersson, M. Lattemann, J. Bohlmark, A. P. Ehiasarian, et J. T. Gudmundsson, « Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications », *Thin Solid Films*, vol. 513, n° 1-2, p. 1-24, août 2006.
- [148] « What is MF or Mid-Frequency AC Sputtering? » <http://www.semicore.com/news/97-what-is-mf-ac-sputtering> (consulté le 18 avril 2022).
- [149] N. U. Saidin, K. K. Ying, et N. I. Khuan, « Electrodeposition: principles, applications and methods », p. 5.
- [150] Yves Badé, « Électrolytes de cuivrage », *Techniques de l'Ingénieur*, 10 janvier 1982. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-des-metaux-tiamd/archive-1/cuivrage-m1605/electrolytes-de-cuivrage-m1605niv10002.html> (consulté le 15 décembre 2021).
- [151] « Electrodeposition | ESIEE Paris ». <https://www.esiee.fr/fr/ecole/salles-blanches/equipements-et-procedes/electrodeposition> (consulté le 16 décembre 2021).
- [152] Hugues Châteauneuf, *Electrodeposition et galvanisation guide des moyens de contrôle des contaminants de l'air*. Montréal : Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec, 2008. Consulté le: 16 décembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2024877>
- [153] « Zone Photolithographie | Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes ». <https://www.laas.fr/public/fr/zone-photolithographie> (consulté le 20 décembre 2021).
- [154] « Tout savoir sur la photolithographie : définition et propriétés | Techniques de l'Ingénieur ». <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/photolithographie> (consulté le 20 décembre 2021).
- [155] P. Voisin, « Lithographie de nouvelle génération par nanoimpression assistée par UV: étude et développement de matériaux et procédés pour l'application microélectronique », p. 172.
- [156] « Lithographie », *Dictionnaires et Encyclopédies sur « Academic »*. <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1063218> (consulté le 22 mai 2022).
- [157] F. Choueikani, « Étude des potentialités de couches minces sol-gel dopées par des nanoparticules magnétiques pour la réalisation de composants magnéto-optiques intégrés », avr. 2022.
- [158] « Photolithographie ». [http://stringfixer.com/fr/Optical\\_lithography](http://stringfixer.com/fr/Optical_lithography) (consulté le 12 janvier 2022).
- [159] « Microelectronique ». <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap9c.htm> (consulté le 31 mars 2022).
- [160] « Materials Characterization: Resistivity measurements using a four-point collinear probe », *Electronic Design*, octobre 2016.

<https://www.electronicdesign.com/technologies/industrial/article/21206843/materials-characterization-resistivity-measurements-using-a-fourpoint-collinear-probe> (consulté le 16 janvier 2022).

- [161] S. Zolfaghar Tehrani, W. L. Lim, et L. Lini, « Correction factors for films resistivity measurement », *Measurement*, vol. 45, p. 219-225, avr. 2012
- [162] S. Amer, « Van der Pauw's method of measuring resistivities on lamellae of non-uniform resistivity », *Solid-State Electron.*, vol. 6, n° 2, p. 141-145, mars 1963,
- [163] L. Arbenz, « Caractérisation non destructive de la conductivité électrique locale d'une pièce en acier forgé de géométrie non triviale », juin 2014.
- [164] L. Valdes, « Resistivity Measurements on Germanium for Transistors », *Proc. IRE*, vol. 42, n° 2, p. 420-427, févr. 1954
- [165] Florian MASSUYEAU, « Spectroscopie UV-Vis-NIR ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.cnrs-imn.fr/index.php/equipements/item/spectroscopie-uv-vis-nir>
- [166] J. Hautcoeur, L. Talbi, K. Hettak, et M. Nedil, « 60 GHz optically transparent microstrip antenna made of meshed AuGL material », *Microw. Antennas Propag. IET*, vol. 8, p. 1091-1096, oct. 2014

---

**Titre :** Etude et conception d'antennes transparentes et discrètes

**Mots clés :** Conducteurs maillés, transparence optique, résistance par carré, antennes transparentes

**Résumé :** Le développement des communications mobiles et la multiplication des objets connectés ont connu un grand essor ces dernières années. Les opérateurs et les industriels ont donc multiplié les équipements hyperfréquences, notamment le nombre des antennes. Cependant, leur implantation présente deux défis majeurs : un défi technologique pour leur intégration dans des dispositifs de communication de plus en plus compacts et un défi esthétique lié à l'impact visuel de ces antennes. En effet, un volume minimal est nécessaire pour qu'un champ électromagnétique puisse se développer dans une antenne et que la transition entre le mode guidé de l'alimentation et celui propagé dans l'espace puisse s'effectuer correctement.

Pour diminuer l'impact visuel des antennes, nous proposons d'utiliser des surfaces alternatives de type verre, vitres des bâtiments ou des voitures, etc.

Ainsi ces antennes peuvent être installées sur des sites historiques, pour lesquels les contraintes visuelles sont fortes, ainsi que dans les centres commerciaux, afin de ne pas dégrader l'esthétique du milieu urbain, et aussi dans les applications militaires pour lesquelles la discrétion est requise. Ce travail présente la conception, la fabrication et la caractérisation d'antennes à faible impact visuel avec un objectif de choix de filière de fabrication à coût limité. Le matériau conducteur utilisé est un maillage métallique alliant conductivité électrique et transparence optique élevées. Dans ce cadre, plusieurs antennes à faible impact visuel ont été réalisées. Pour les prototypes réalisés, une transparence optique atteignant 73% dans le domaine du visible pour des performances en fréquence et en rayonnement équivalentes à celles d'une antenne opaque ont été obtenues.

---

**Title:** Study and design of transparent and discreet antennas.

**Keywords:** Conductor meshed, Optical transparency, radiation pattern, transparent antenna

**Abstract:** The development of mobile communications and the multiplication of connected objects have boomed in recent years. Operators and manufacturers have therefore multiplied microwave equipment, especially the number of antennas. However, their implementation presents two major challenges: a technological challenge for their integration in increasingly compact communication devices, and an aesthetic challenge related to the visual impact of these antennas. Indeed, a minimum volume is necessary for an electromagnetic field to develop in an antenna and for the transition between the guided mode in the feed and the propagated one in space to occur correctly. To reduce the visual impact of the antennas, we propose to use alternative surfaces such as glass, windows of buildings or cars...

Thus these antennas can be installed on historical sites, where visual constraints are strong, as well as in shopping centers in order not to degrade the aesthetics of the urban environment, and also in military applications where discretion is required. This work presents the design, realization and characterization of low visual impact antennas with the objective of identifying a low cost manufacturing process. The conductor used is a metal mesh combining high electrical conductivity and optical transparency. In this context, low visual impact antennas have been realized. Prototypes optical transparency is up to 73% in the visible range for frequency and radiation performance equivalent to opaque antennas.