

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE
N°



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : TELECOMMUNICATION
OPTION : INGENIERIE DE
TELECOMMUNICATION

Mémoire présenté pour l'obtention du
Diplôme de Master Académique

Présenté par:

LAKHDAR HAMINA Tadj Elmalik & DAHMANI Nassira

Intitulé :

Réalisation d'un coupleur de puissance
directionnels miniature pour des applications
5^{ème} génération.

Diplôme de Master dans le cadre du décret ministériel 1275

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Miloud BENTOUMI	Université de Mohammed BOUDIAF M'sila	Président
Dr. Haddi BAKHTI	Université de Mohammed BOUDIAF M'sila	Rapporteur
Dr Omar Abid SAFER	Agence spatiale Algérienne	Co-Rapporteur
Dr Mostafa TABAKH	Université de Mohammed BOUDIAF M'sila	Examineur

Année universitaire 2023/2024

Remerciement

À l'issue de cette fin d'étude, nous adressons nos remerciements premièrement à Allah, le Tout-Puissant, pour la santé et la patience qu'Il nous a accordées durant toutes ces longues années d'études.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre gratitude à nos promoteurs, Dr. BAKHTI Haddi et Dr. BENTOUMI Miloud. Chacun de vous a contribué à façonner notre compréhension du monde et à nourrir notre curiosité intellectuelle. Votre engagement envers notre succès et votre investissement dans notre développement personnel ont été une lumière guidant notre chemin.

Nous remercions également Dr. TABBAKH Mostefa du fond du cœur pour son influence positive et pour avoir été un guide remarquable tout au long de notre parcours académique. Votre impact durable se reflète non seulement dans ce mémoire, mais aussi dans notre passion continue pour l'apprentissage et la poursuite de l'excellence.

Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années d'études.

À tous ceux qui ont croisé notre route et ont cru en nous, nous adressons nos sincères remerciements.

MERCI.

Dédicace

À mes parents,

Votre amour inconditionnel et votre soutien indéfectible ont été les piliers sur lesquels j'ai construit ce travail. Votre foi en moi m'a donné la force d'aller au bout de mes rêves. Merci pour tout.

À ma personne préférée,

Pour être ma source de lumière et d'inspiration. Ton amour et ton soutien m'ont guidé à travers les moments les plus difficiles. Je te suis éternellement reconnaissant(e).

À mes amis proches,

Votre présence, vos encouragements et votre patience ont rendu ce voyage plus supportable et même joyeux. Merci pour toutes les petites attentions et les grandes discussions.

À mes professeurs et mentors,

Pour avoir partagé votre savoir avec tant de générosité et de passion. Vous avez éveillé en moi le désir de toujours en apprendre davantage.

À tous ceux qui ont cru en moi,

Vos encouragements ont été une source de motivation inestimable. Merci de m'avoir accompagné(e) dans cette aventure.

LAKHDAR HAMINA Tadj elmoulk

Dédicace

À mes parents,

Pour toutes les épreuves traversées et les sacrifices faits pour me rendre épanoui et heureux, sachez que mille vies ne suffiraient pas à exprimer toute ma gratitude.

À ma famille, que j'aime profondément.

À mes amis, merci d'être toujours présents à mes côtés.

DAHMANI Nassira

Tables des matières

Remerciement.....	i
Dédicace.....	ii
Dédicace.....	iii
Introduction générale	1
Chapitre I :.....	3
Introduction sur les composant RF	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 éléments du système de RF	3
I.2.1 Adaptateurs.....	3
I.2.1.1 Principe de fonctionnement	3
I.2.1.2 Types d'Adaptateurs.....	4
I.2.1.3 Applications.....	5
I.2.2 Filtres dans les Systèmes RF	5
I.2.2.1 Principaux Types de Filtres	5
I.2.2.2. Fonctionnement des Filtres.....	6
I.2.2.3. Paramètres Importants	7
I.2.2.4 Applications.....	7
I.2.3 Connecteur.....	7
I.2.3.1 Principe de fonctionnement	7
I.2.3.2 Types de connecteurs RF.....	7
I.2.3.3 Applications.....	9
I.2.4 Antennes dans les Systèmes RF.....	9
I.2.4.1 Principe de Fonctionnement.....	9
I.2.4.2 Principaux Types d'Antennes.....	9
I.2.4.3 Paramètres Importants.....	11
I.2.4.4 Applications.....	11
I.2.5 Oscillateurs dans les Systèmes RF	11
I.2.5.1 Principaux Types d'Oscillateurs	11
I.2.5.2 Fonctionnement des Oscillateurs	13

I.2.5.3 Paramètres Importants.....	14
I.2.5.4 Applications.....	14
I.3 Conclusion.....	14
Chapitre II :	15
Etat de l’art des coupleurs de puissance directionnels.....	15
II.1 Introduction.....	15
II.2 Coupleurs directionnels.....	15
II.3 Différents types de coupleurs.....	17
II.3.1 Coupleurs à lignes couplées.....	17
II.3.2 Coupleur de Lange.....	18
II.3.3 coupleur à branches.....	19
II.5 Conclusion.....	20
Chapitre III :	20
Simulation et résultats expérimentaux	20
III.2 Cahier de charge imposer pour la conception du coupleur directionnel	21
III.3 Calcul de l’impédance de la ligne d’alimentation	22
III.4 Paramètre d’un coupleur directionnel.....	23
III.5 Simulation avec ADS	24
III.6 Conception d’un coupleur directionnel initial.....	26
III.7 Le nouveau design.....	29
III.8 Etude paramétriques	30
III.9 Structure finale de coupleur directionnel proposé.....	33
III.10 Etapes de réalisation.....	34
III.10.1 Circuit imprimée	35
III.10.1.1 Les étapes de la réalisation du circuit imprimé.....	35
III.12 Coupleur prototype réalisé.....	38
III.13 Système de mesure	38
III.14 Conclusion.....	41
Conclusion générale	43
Conclusion Générale.....	44
Références bibliographiques.....	46
Résumé.....	48
ملخص.....	49
Abstract.....	49
Résumé.....	50

Liste des figures

Fig.I.1. Adaptateur coaxiaux	4
Fig.I.2. Adaptateur d'impédance	4
Fig.I.3. Adaptateur de filtre	5
Fig.I.4. Filtre passif RF	5
Fig.I.5. Filtre RF actif	6
Fig.I.6. Filtre numérique	6
Fig.I.7. Connecteur Coaxiaux	8
Fig.I.8. Connecteur guide onde	8
Fig.I.9. Connecteur a vis	8
Fig.I.10. Antenne dipôle	9
Fig.I.11. Antenne patch.....	10
Fig.I.12. Antennes paraboliques.....	10
Fig.I.13. Antennes Yagi-Uda	11
Fig.I.14. Oscillateurs RF	12
Fig.I.15. Oscillateurs à Fréquence Variable	12
Fig.I.16. Oscillateurs à Couplage Inductif	12
Fig.I.17. Oscillateurs à Résonateur LC	13
Fig.I.18. Oscillateurs à Résonateur LC	13
Fig.II.1. Schéma de principe d'un coupleur directif.	15
Fig.II.2. Géométrie d'un coupler à ligne couplées.....	17
Fig.II.3. Schéma d'un coupleur à ligne couplées.....	17
Fig.II.4. Géométrie d'un coupleur de lange.....	18
Fig.II.5. Coupleur de lange, N=doigts	19
Fig.II.6. Coupleur à branches en technologie micro-ruban.....	19
Fig.II.7. Coupler à branche à taille réduit chargé capacitivement b) technique localisée de réduction de taille des lignes $\lambda/4$	20
Fig.III.1. Choix du substrat sur ADS	22
Fig.III.2. Fenêtre LineCalc utiliser pour le calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation dans logiciel ADS	23
Fig.III.3. Advanced design system product selection.....	24
Fig.III.4. Création nouveau projet.....	25
Fig.III.5. Création d'un nouveau schéma en ADS	25
Fig.III.6. Nomination d'une cellule en ADS	25
Fig.III.7. Fenêtre de conception ou de design.....	26
Fig.III.8. Coupleur initial.....	26
Fig.III.9. Coupleur initiale layout	27

Fig.III.10. Les paramètres S des ports du coupleur proposé.....	27
Fig.III.11. Les paramètres S de couplages du coupleur proposé.....	28
Suite que les résultats du design précédent ne sont pas satisfaisante et après des essais de simulation le nouveau design est représenté par la Fig.III.12. ci-dessous.....	29
Fig.III.12. Schéma du nouveau coupleur directionnel	29
Fig.III.13. Layout du nouveau coupleur directionnel.....	29
Les paramètres S obtenus sont présentés par la Fig.III.14. ci-dessous.....	30
Fig.III.14. Parameters S (11); S (22); S (33); S (44)	30
Fig.III.15. Fenêtre tuning ou de réglage en ADS	31
Fig.III.16. Paramètres du coupleur a réglés	31
Fig.III.17. Fenêtre ADS des paramètres de réglage	31
Fig.III.18. Fenêtre de tuning ou de réglage	32
Fig.III.19. Les bandes passantes des Ports du coupleur proposé	32
Fig.III.20. Schéma du coupleur final.....	33
Fig.III.21. Layout du coupleur final.....	34
Fig.III.22. Le fichier Gerber obtenu pour le design qui est par la suite imprimé sur un papier calque.....	35
Fig.III.23. Layout après impression sur papier calque	35
Fig.III.24. Programmation du temps de l'insoluse	36
Fig.III.25. Le NaOH granulaire	37
Fig.III.26. Dépôt du circuit imprimé dans le perchlorure de fer.....	37
Fig.III.27. Le coupleur Final avant le découpage.....	38
Fig.III.28. (a) Coupleur après soudage des connecteur SMA, (b) Comparaison du coupleur avec un EURO.....	38

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques du substrat et la couche conductrice	22
Tableau 2. Un résumé des dimensions du coupleur proposé.....	27
Tableau 3. Les nouveaux paramètres du coupleur proposé	30
Tableau 4. Résume la bande passante et le facteur de qualité du coupleur proposé	33
Tableau 5. Les dimensions finales de ce coupleur directionnel.....	34

Introduction générale

Introduction générale

Les coupleurs directionnels sont des dispositifs essentiels dans le domaine des télécommunications et de la radiofréquence. Ils jouent un rôle crucial dans la gestion et la distribution des signaux au sein des systèmes de communication. Un coupleur directionnel est un composant passif qui permet de diviser ou de combiner des signaux électriques tout en isolant les voies d'entrée et de sortie. Il est principalement utilisé pour mesurer la puissance du signal, contrôler la direction des signaux, et surveiller ou tester les performances des systèmes RF (radiofréquence) et micro-ondes[1].

Le principe de fonctionnement d'un coupleur directionnel repose sur le transfert d'énergie entre deux lignes de transmission placées en proximité l'une de l'autre. Cela permet à une partie du signal incident d'être couplée dans une direction spécifique, tandis que le reste du signal continue dans la direction principale. Cette capacité à diriger et diviser les signaux avec précision fait des coupleurs directionnels des outils indispensables dans divers domaines, tels que les réseaux de communication sans fil, les systèmes radar et les dispositifs de mesure RF[2].

L'un des aspects les plus importants des coupleurs directionnels est leur capacité à isoler les ports, ce qui permet d'éviter les interférences et les pertes de signal. Ils sont également conçus pour fonctionner sur une large gamme de fréquences, offrant ainsi une grande flexibilité d'utilisation. De plus, les coupleurs directionnels peuvent être intégrés dans des circuits imprimés ou utilisés comme des composants indépendants, ce qui les rend adaptés à une variété d'applications techniques [2].

Dans le cadre de ce mémoire, nous allons explorer en profondeur les aspects techniques et les applications des coupleurs directionnels. Le texte sera structuré en trois chapitres principaux.

Dans le Chapitre 1, nous aborderons les composants RF en général. Ce chapitre fournira un aperçu des éléments de base qui constituent les systèmes de communication RF, tels que les adaptateurs, les filtres, les oscillateurs, les connecteurs et les antennes. Comprendre ces composants est fondamental pour apprécier le rôle et l'importance des coupleurs directionnels dans un système RF.

Le Chapitre 2 sera entièrement consacré aux coupleurs directionnels. Nous étudierons les différents types de coupleurs, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs applications spécifiques. Ce chapitre mettra en lumière comment les coupleurs directionnels permettent de mesurer la puissance, de contrôler la direction des signaux et d'optimiser les performances des réseaux de communication.

Enfin, le Chapitre 3 se concentrera sur la simulation de coupleurs directionnels dans la bande Ka. La bande Ka, située entre 26,5 et 40 GHz, est de plus en plus utilisée pour les applications de communication par satellite et les systèmes radar. Nous discuterons des outils et des techniques de simulation utilisés pour concevoir et optimiser des coupleurs directionnels dans cette bande de fréquences spécifique. Ce chapitre présentera également des études de cas et des exemples pratiques de simulations, mettant en évidence les défis et les solutions pour garantir des performances optimales.

Chapitre I :

Introduction sur les composant RF

I.1 Introduction

Dans ce chapitre consacré aux communications et aux technologies sans fil, les systèmes RF (Radiofréquence) revêtent une importance cruciale en facilitant le transfert efficace de signaux à travers l'espace. Ces systèmes sont largement utilisés dans une multitude d'applications, de la téléphonie mobile aux réseaux sans fil, en passant par les radars et les systèmes de navigation. Au cœur de chaque système RF se trouvent une variété de composants spécialisés qui travaillent de concert pour émettre, recevoir, amplifier, filtrer et traiter les signaux RF.

Les composants du système RF forment l'ossature fondamentale des communications modernes. Parmi eux, on compte les amplificateurs RF, qui augmentent la puissance du signal tout en préservant sa qualité et sa fidélité. Les filtres RF, quant à eux, permettent de sélectionner des fréquences spécifiques et de rejeter les signaux indésirables, assurant ainsi la clarté et la fiabilité des communications. Les diviseurs de puissance RF distribuent efficacement le signal d'entrée vers plusieurs voies de sortie, tandis que les atténuateurs RF ajustent l'intensité du signal selon les besoins du système [3].

Par ailleurs, une large gamme d'autres composants RF spécialisés, tels que les coupleurs directionnels, les isolateurs, les commutateurs et les modulateurs, remplissent des fonctions spécifiques pour répondre aux exigences complexes des applications RF modernes.

Dans cette section, nous examinerons en détail les différents composants du système RF, mettant en lumière leur fonctionnement, leurs caractéristiques clés et leur importance dans la conception et le fonctionnement des systèmes de communication RF avancés. En comprenant ces composants et leur rôle dans les systèmes RF, nous serons mieux préparés à aborder la conception et la modélisation de composants spécifiques tels que le coupleur directionnel à bande Ka.

I.2 éléments du système de RF

I.2.1 Adaptateurs

Un adaptateur est un circuit ou dispositif conçu pour adapter l'impédance entre deux composants ou circuits différents dans un système RF. Il permet d'obtenir un transfert d'énergie optimal en minimisant les réflexions et les pertes de puissance [4].

I.2.1.1 Principe de fonctionnement

Les adaptateurs fonctionnent sur le principe de la transformation d'impédance. Ils modifient l'impédance vue par le circuit source pour correspondre à l'impédance du circuit de charge. Cela se fait généralement en utilisant des composants réactifs (inductances et capacités) ou des lignes de transmission d'une longueur spécifique.

I.2.1.2 Types d'Adaptateurs

- **Adaptateurs Coaxiaux** : Ils permettent de relier des câbles coaxiaux de différents types ou de convertir un câble coaxial en une autre interface.



Fig.I.1. Adaptateur coaxiaux

- **Adaptateurs d'Impédance** : Ils sont conçus pour assurer une adaptation précise de l'impédance entre deux composants afin de minimiser les pertes de signal.



Fig.I.2. Adaptateur d'impédance

- **Adaptateurs de Filtre** : Ils incluent des éléments de filtrage pour supprimer les signaux indésirables ou pour améliorer les performances dans certaines bandes de fréquences



Fig.I.3. Adaptateur de filtre

I.2.1.3 Applications

- **Systèmes de télécommunications** : adaptation entre les antennes et les circuits d'émission/réception.
- **Radars** : adaptation entre les guides d'ondes et les amplificateurs de puissance.
- **Instrumentation RF** : adaptation entre les différents équipements de test.
- **Circuits intégrés RF** : adaptation sur puce pour les circuits émetteurs/récepteurs.

I.2.2 Filtres dans les Systèmes RF

Les filtres sont des dispositifs essentiels dans les systèmes de radiofréquences (RF) qui permettent de sélectionner ou de rejeter des signaux dans une bande de fréquences spécifique. Ils sont largement utilisés pour nettoyer les signaux indésirables, réduire les interférences et améliorer la qualité des transmissions [5].

I.2.2.1 Principaux Types de Filtres

- **Filtres Passifs**: Les filtres passifs utilisent des composants passifs tels que des résistances, des condensateurs et des inductances pour filtrer les signaux RF. Ils sont simples, économiques et ne nécessitent pas d'alimentation externe.

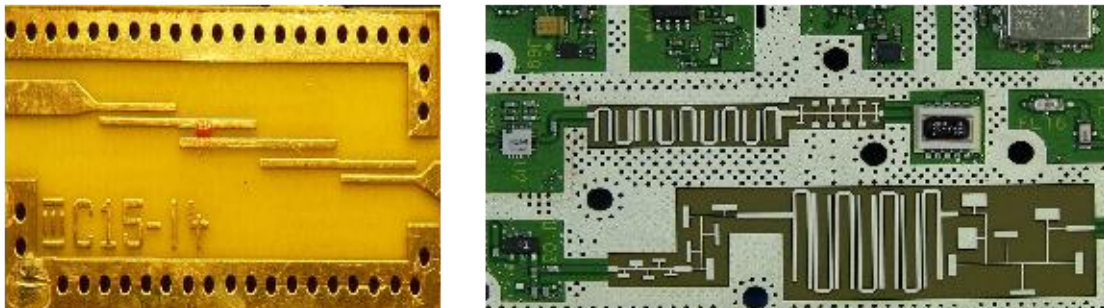


Fig.I.4. Filtre passif RF

- **Filtres Actifs** : Les filtres actifs utilisent des composants actifs tels que des transistors ou des amplificateurs opérationnels en combinaison avec des composants passifs pour filtrer les signaux. Ils offrent une plus grande flexibilité de conception et une meilleure sélectivité, mais nécessitent une alimentation électrique.

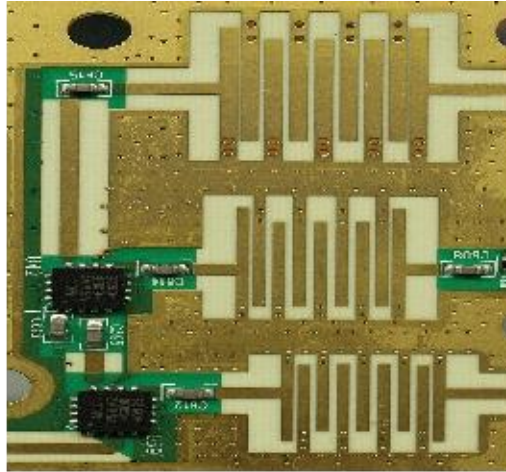


Fig.I.5. Filtre RF actif

- **Filtres Numériques** : Les filtres numériques utilisent des techniques de traitement numérique du signal (DSP) pour filtrer les signaux RF. Ils offrent une grande précision et une flexibilité de conception, mais nécessitent un traitement numérique sophistiqué.



Fig.I.6. Filtre numérique

I.2.2.2. Fonctionnement des Filtres

Les filtres fonctionnent en exploitant les propriétés de la résonance électrique pour atténuer ou éliminer les signaux indésirables.

Ils utilisent des combinaisons d'éléments réactifs (capacitances et inductances) et de composants dissipatifs (résistances) pour créer des circuits résonants qui réagissent différemment à différentes fréquences.

I.2.2.3. Paramètres Importants

- **Bande Passant:** La bande passante d'un filtre est la plage de fréquences sur laquelle il transmet efficacement les signaux.
- **Fréquence de Coupure:** La fréquence de coupure d'un filtre est la fréquence à laquelle le gain du filtre est réduit de moitié par rapport à sa valeur maximale.
- **Sélectivité:** La sélectivité d'un filtre mesure sa capacité à atténuer les signaux hors de sa bande passante.
- **Perte d'Insertion:** La perte d'insertion d'un filtre est la perte de puissance du signal à travers le filtre.

I.2.2.4 Applications

- Télécommunications sans fil (Wi-Fi, 5G, LTE)
- Réception et transmission radio
- Radar et systèmes de détection
- Télévision et radio diffusion
- Équipements de test et de mesure

I.2.3 Connecteur

Un connecteur est un dispositif mécanique permettant de relier électriquement deux circuits ou composants. Dans les systèmes de radiofréquences (RF), les connecteurs sont cruciaux pour transférer les signaux d'un composant à un autre avec un minimum de pertes et de réflexions [6].

I.2.3.1 Principe de fonctionnement

Les connecteurs RF sont conçus pour transmettre des signaux à haute fréquence avec un minimum de distorsion et de pertes. Ils doivent présenter une impédance caractéristique bien définie (généralement 50 ohms) pour assurer une adaptation d'impédance optimale. La structure physique du connecteur joue un rôle important dans la minimisation des pertes par réflexion et des fuites de signal.

I.2.3.2 Types de connecteurs RF

- **Connecteurs coaxiaux:** Conçus pour les câbles coaxiaux, ils sont très répandus (BNC, N, SMA, SMB, SMC, etc.). Utilisés jusqu'à des dizaines de GHz.



Fig.I.7. Connecteur Coaxiaux

- **Connecteurs guides d'ondes:** Pour les guides d'ondes métalliques creux, utilisés pour des fréquences supérieures à 30 GHz environ.



Fig.I.8. Connecteur guide onde

- **Connecteurs à Vis :** Les connecteurs à vis offrent une connexion mécanique solide et sont souvent utilisés dans les applications nécessitant une connexion sécurisée. Exemples : Connecteur à vis (terminaison coaxiale), connecteur à vis (terminaison à broches).



Fig.I.9. Connecteur a vis

I.2.3.3 Applications

- Télécommunications: Antennes, amplificateurs, filtres RF, etc.
- Radar et systèmes de défense
- Équipements de test et de mesure RF
- Émetteurs/récepteurs satellite et spatial
- Médical (IRM, etc.)

I.2.4 Antennes dans les Systèmes RF

Les antennes sont des composants essentiels dans les systèmes de radiofréquences (RF) qui permettent la transmission et la réception des ondes électromagnétiques. Elles jouent un rôle crucial dans la communication sans fil, les systèmes de radar, les réseaux cellulaires, les satellites, et bien d'autres applications [7].

I.2.4.1 Principe de Fonctionnement

Les antennes fonctionnent en convertissant des signaux électriques en ondes électromagnétiques (émission) ou en convertissant des ondes électromagnétiques en signaux électriques (réception). Elles exploitent les propriétés de la propagation des ondes électromagnétiques pour diriger et focaliser le signal dans une direction spécifique

I.2.4.2 Principaux Types d'Antennes

- **Antennes Dipôles** : Les antennes dipôles sont parmi les antennes les plus simples et les plus couramment utilisées. Elles consistent en un conducteur métallique coupé en deux parties égales, alimentées par un signal RF.



Fig.I.10. Antenne dipôle

- **Antennes Patch** : Les antennes patch sont des antennes planes généralement fabriquées sur des substrats à faible permittivité. Elles sont utilisées dans de nombreux dispositifs sans fil en raison de leur faible encombrement et de leur haute performance.

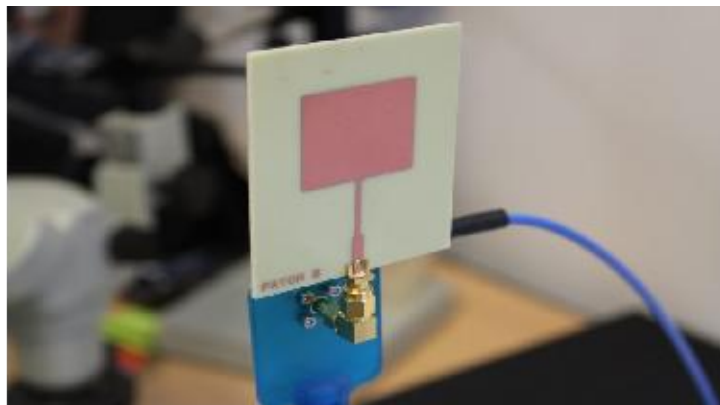


Fig.I.11. Antenne patch

- **Antennes Paraboliques** : Les antennes paraboliques utilisent un réflecteur parabolique pour concentrer les ondes électromagnétiques dans une direction spécifique. Elles sont couramment utilisées dans les systèmes de communication à longue distance, tels que les réseaux satellitaires



Fig.I.12. Antennes paraboliques

- **Antennes Yagi-Uda** : Les antennes Yagi-Uda sont des antennes directionnelles constituées d'un élément d'émission (ou actif) et d'un ou plusieurs éléments de réception (ou passifs).

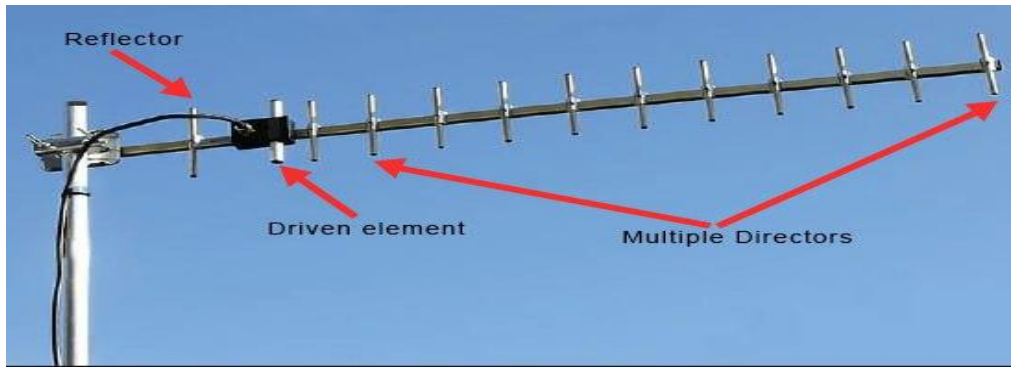


Fig.I.13. Antennes Yagi-Uda

I.2.4.3 Paramètres Importants

- **Directivité** : La directivité d'une antenne mesure sa capacité à concentrer le rayonnement dans une direction spécifique. Plus la directivité est élevée, plus l'antenne est directive.
- **Gain** : Le gain d'une antenne est une mesure de sa capacité à concentrer l'énergie dans une direction spécifique par rapport à une antenne isotrope idéale.
- **Bande Passante** : La bande passante d'une antenne est la plage de fréquences sur laquelle elle peut fonctionner efficacement sans perte significative de performances.

I.2.4.4 Applications

- Télécommunications sans fil (Wi-Fi, 5G, LTE)
- Radars et systèmes de détection
- Télévision et radio diffusion
- Réseaux de communication par satellite
- Systèmes de navigation (GPS)

I.2.5 Oscillateurs dans les Systèmes RF

Les oscillateurs sont des circuits électroniques utilisés pour générer des signaux électriques périodiques, tels que des signaux sinusoïdaux, carrés ou triangulaires. Dans les systèmes RF, les oscillateurs sont utilisés pour produire des signaux porteurs, des signaux de référence et des signaux de synchronisation [8].

I.2.5.1 Principaux Types d'Oscillateurs

- **Oscillateurs à Quartz** : Les oscillateurs à quartz utilisent un cristal de quartz pour créer une résonance mécanique et générer des signaux stables à haute fréquence.



Fig.I.14. Oscillateurs RF

- **Oscillateurs à Fréquence Variable** : Les oscillateurs à fréquence variable utilisent des composants tels que des varicaps ou des diodes tunnel pour modifier la fréquence de sortie.



Fig.I.15. Oscillateurs à Fréquence Variable

- **Oscillateurs à Couplage Inductif** : Les oscillateurs à couplage inductif utilisent des bobines de couplage pour créer une rétroaction positive et générer des oscillations.



Fig.I.16. Oscillateurs à Couplage Inductif

- **Oscillateurs à Résonateur LC** : Les oscillateurs à résonateur LC utilisent des bobines et des condensateurs pour créer une résonance électrique et générer des oscillations.



Fig.I.17. Oscillateurs à Résonateur LC

- **Oscillateurs à Amplificateur** : Les oscillateurs à amplificateur utilisent un amplificateur avec une boucle de rétroaction pour générer des oscillations.



Fig.I.18. Oscillateurs à Résonateur LC

I.2.5.2 Fonctionnement des Oscillateurs

Les oscillateurs fonctionnent en utilisant une boucle de rétroaction positive pour maintenir les oscillations à une fréquence constante. Ils utilisent un élément résonant, tel qu'un cristal de quartz ou un circuit LC, pour définir la fréquence de fonctionnement. La boucle de rétroaction amplifie et réinjecte une partie du signal de sortie à l'entrée de l'oscillateur, ce qui maintient les oscillations.

I.2.5.3 Paramètres Importants

- **Fréquence de Résonance** : La fréquence de résonance est la fréquence à laquelle l'oscillateur produit des oscillations maximales.
- **Stabilité** : La stabilité d'un oscillateur mesure sa capacité à maintenir une fréquence de sortie constante dans des conditions variables telles que la température, la tension d'alimentation, etc.
- **Phase Noise** : Le bruit de phase est une mesure de la variation aléatoire de la phase du signal de sortie de l'oscillateur.

I.2.5.4 Applications

- Génération de signaux porteuses pour la modulation RF.
- Génération de signaux de référence pour les systèmes de communication et de navigation.
- Génération de signaux de synchronisation pour les réseaux de données et les systèmes de contrôle.

I.3 Conclusion

Pour conclure, les éléments constitutifs du système RF jouent un rôle vital dans la transmission et la réception efficaces des signaux radiofréquences. Chaque composant, qu'il s'agisse d'adaptateurs, d'antennes, de filtres, d'oscillateurs ou de connecteurs, contribue de manière significative à la performance globale du système. Leur importance est indiscutable dans divers domaines, incluant les télécommunications sans fil, les applications radar, les systèmes de navigation, et bien d'autres. Une compréhension approfondie de ces composants, de leurs caractéristiques et de leurs interactions est cruciale pour concevoir, mettre en œuvre et maintenir des systèmes RF performants et fiables. En combinant ces éléments de manière appropriée, il est possible de créer des systèmes RF hautement efficaces répondant aux exigences les plus strictes en matière de communication et de traitement des signaux.

Chapitre II :

Etat de l'art des coupleurs de puissance directionnels

II.1 Introduction

Les coupleurs sont des composants largement utilisés dans divers circuits tels que les mélangeurs, les amplificateurs équilibrés et les circuits d'alimentation des antennes. Les performances des circuits dépendent grandement de celles des coupleurs, notamment en ce qui concerne la bande de fréquence, l'isolation, etc. Cependant, ces performances sont souvent restreintes par les contraintes liées à la technologie de fabrication des circuits. Les coupleurs micro-ondes, en particulier, sont généralement passifs [9].

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents types de coupleurs micro-ondes : planaires et volumiques. Nous traitons également les avantages et les inconvénients de chaque technologie.

II.2 Coupleurs directionnels

Un coupleur directionnel idéal est un dispositif passif à quatre ports sur un support isotrope, sans pertes. Chaque port est adapté, et la puissance injectée dans un port d'entrée (voie incidente) est transmise aux ports de sortie (voie directe et voie couplée). Le port restant est isolé, ce qui implique qu'aucune puissance n'est transférée vers lui.

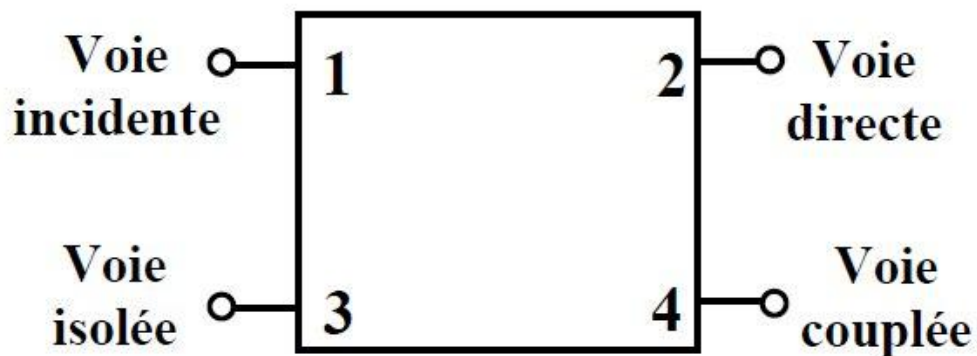


Fig.II.19. Schéma de principe d'un coupleur directif.

Un coupleur directif idéal possède les propriétés suivantes :

Il est réciproque, adapté et sans pertes.

Réciproque ; $S_{ji} = S_{ij}$ avec $i \neq j$

Adapté : $S_{jj} = 0$

Sans pertes

Cela signifie que le produit de la matrice transposée $[S]^t$ et de la matrice conjuguée $[S]^*$ est égal à la matrice identité $[I]$, ce qui garantit la conservation de l'énergie.

$$[S]^t \cdot [S]^* = [I]$$

Ces caractéristiques induisent des simplifications dans la matrice de répartition représentant l'octopôle, qui est la suivante :

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & S_{3\ 1} & S_{4\ 1} \\ 0 & 0 & S_{3\ 2} & S_{4\ 2} \\ S_{3\ 1} & S_{3\ 2} & 0 & 0 \\ S_{4\ 1} & S_{4\ 2} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

En utilisant la numérotation arbitraire des ports comme indiqué sur la **Figure II.1**, nous pouvons définir les grandeurs suivantes :

Le couplage, qui décrit la puissance normalisée (par rapport à l'onde incidente) de l'onde couplée :

$$\text{Couplage(dB)} = 20 \log |S_{41}|^2 \quad (2)$$

L'affaiblissement, qui représente la puissance normalisée de l'onde transmise par la voie directe ;

$$\text{Affaiblissement(dB)} = 20 \log |S_{31}|^2 \quad (3)$$

Pour un coupleur directif réel, on détermine des mesures supplémentaires :

L'adaptation, qui exprime la puissance normalisée de l'onde réfléchi à l'entrée du coupleur :

$$\text{Adaptation (dB)} = 20 \times \log |S_{11}| \quad (4)$$

L'isolation, qui quantifie la puissance normalisée de l'onde reçue sur la voie isolée :

$$\text{Isolation (dB)} = 20 \times \log |S_{21}| \quad (5)$$

La directivité, qui représente le rapport entre la puissance de l'onde couplée et celle de l'onde sortante par la voie isolée :

$$\text{Directivité (dB)} = 20 \times \text{Log} |S_{42}| = \text{Couplage (dB)} - \text{Isolation (dB)} \quad (6)$$

La bande passante relative, qui indique la plage de fréquences de fonctionnement optimale du coupleur :

$$\text{Bande Passante Relative} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (7)$$

f_0 , f_1 et f_2 représentent respectivement les fréquences centrales, minimale et maximale de fonctionnement.

Dans la conception de circuits, les coupleurs 3 dB sont des composants cruciaux. Leur caractéristique principale est que le couplage et l'affaiblissement sont équivalents, ce qui signifie que la puissance incidente est répartie uniformément entre la voie directe et la voie couplée.

À partir de la matrice $[S]$, il est démontré qu'il n'y a que deux catégories de coupleurs 3 dB idéaux : les coupleurs 90° , également connus sous le nom de "coupleurs en quadrature", et les coupleurs $0-180^\circ$ [10].

II.3 Différents types de coupleurs

En fonction de leur utilisation et de leur structure, les coupleurs se divisent en plusieurs catégories :

II.3.1 Coupleurs à lignes couplées

Quand deux lignes de transmission non blindées sont étroitement disposées, la puissance peut être transférée d'une ligne à l'autre en raison de l'interaction des champs électromagnétiques. Ces configurations sont appelées lignes couplées et sont habituellement constituées de trois conducteurs en proximité. On présume que ces lignes couplées fonctionnent en mode TEM. La **Figure II.2** illustre la topologie des coupleurs à lignes couplées.

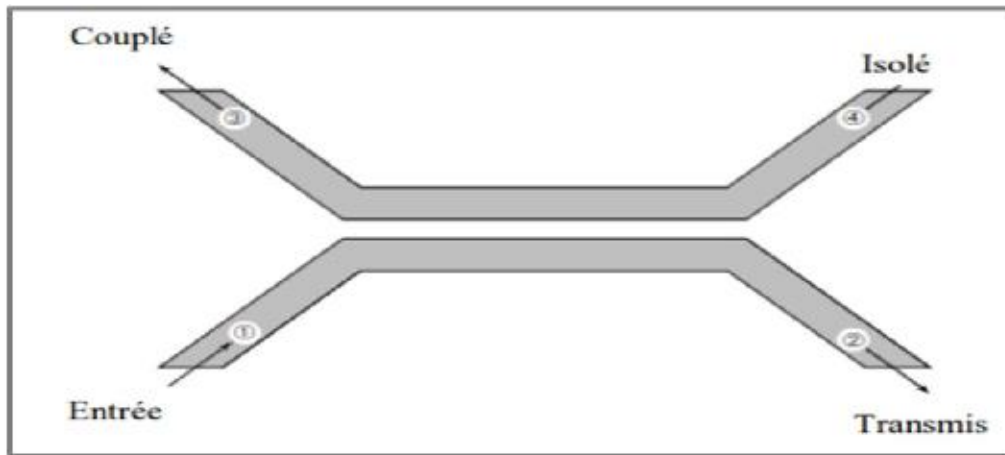


Fig.II.20. Géométrie d'un coupler à ligne couplées

Un schéma utilisant des lignes de transmission est présenté à la **Figure II.3**. Ce réseau à 4 ports est terminé à chaque port par une impédance caractéristique Z_0 est alimentée par une source de tension de 2V à l'entrée (port 1). Deux impédances sont utilisées pour les lignes couplées : une pour une excitation en mode pair et une autre pour une excitation en mode impair.

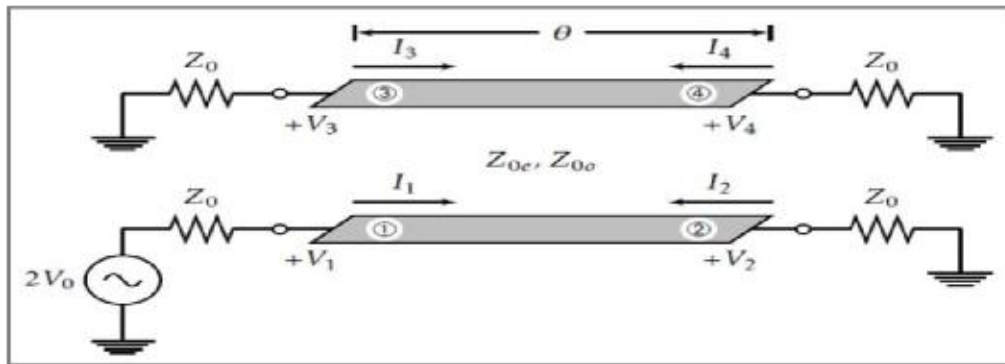


Fig.II.21. Schéma d'un coupler à ligne couplées

II.3.2 Coupleur de Lange

Il est souvent difficile d'atteindre un couplage de 3 dB ou 6 dB en utilisant simplement des lignes couplées. Pour améliorer le couplage, on recourt à plusieurs lignes parallèles, permettant ainsi aux champs de frange de contribuer au couplage. Le coupleur de Lange, illustré à la **Figure II.4**, est largement employé à cet effet. Quatre lignes couplées, interconnectées, sont utilisées pour obtenir un couplage plus élevé. Il est possible d'obtenir facilement un couplage de 3 dB avec une largeur de bande d'une octave ou plus. Cependant, la fabrication des coupleurs de Lange à haute fréquence nécessite une grande précision, car les lignes sont très fines et rapprochées [9].

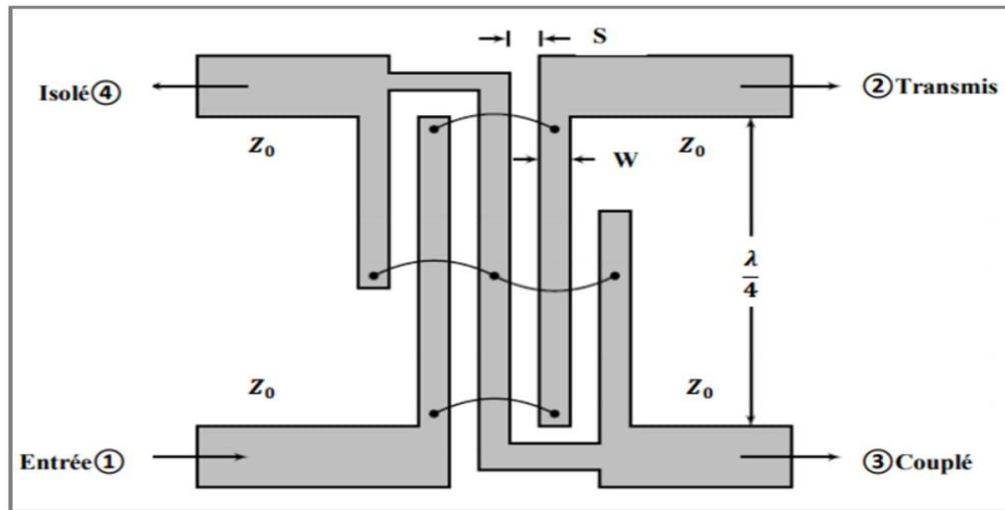


Fig.II.22. Géométrie d'un coupleur de lange

Les coupleurs de Lange sont fabriqués en utilisant des lignes quart d'onde couplées et interdigitées, généralement avec quatre doigts. Dans la configuration classique (voir **Figure II.5.a**), les voies de sortie (directe et couplée) sont situées du même côté de la structure, tandis que dans la configuration dépliée (voir **Figure II.5.b**), elles sont sur des côtés opposés. Le choix entre ces configurations offre une flexibilité pour le placement des circuits [9].

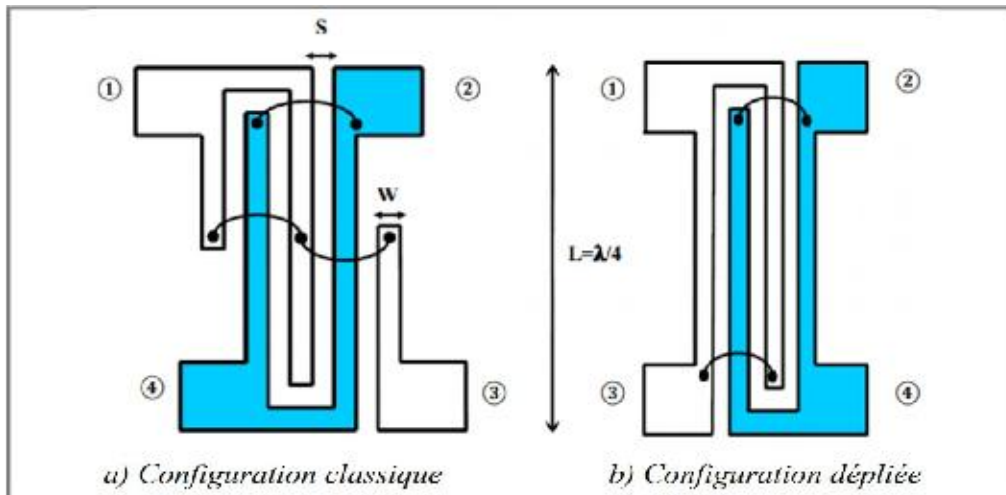


Fig.II.23. Coupleur de lange, $N=\text{doigts}$

Les atouts d'un coupleur de Lange incluent la capacité à produire des couplages 3 dB ou à faible niveau, une taille compacte favorisant une intégration avancée et une large bande passante. Cependant, son inconvénient principal réside dans sa fabrication délicate et la nécessité d'une couche mince

II.3.3 coupleur à branches

Une alternative majeure au coupleur de Lange pour obtenir un couplage 3 dB en quadrature est le coupleur à branches (Branch-line hybride). Sa topologie de base comprend deux lignes de transmission série, chacune d'une longueur de $\lambda/4$ d'onde à la fréquence centrale, connectées par deux lignes de dérivation également de longueur $\lambda/4$ d'onde. La **Figure II.6** illustre un exemple de ce type de coupleur réalisé en technologie microstrip [9].

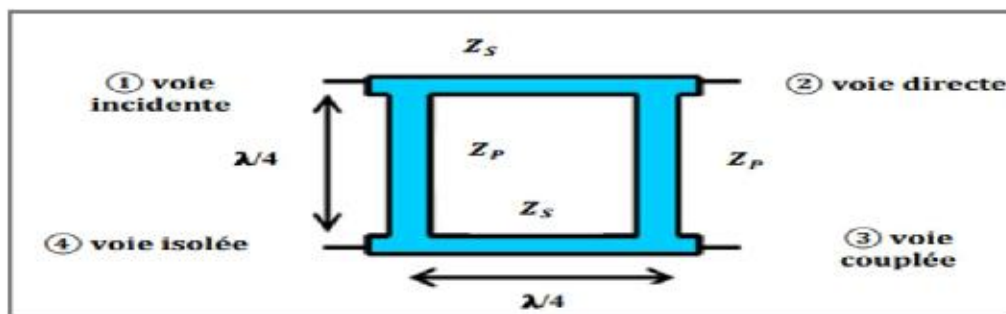


Fig.II.24. Coupleur à branches en technologie micro-ruban

Ce composant est bien adapté à la conception de circuits hybrides en raison de sa simplicité et de sa moindre sensibilité par rapport au coupleur de Lange. Contrairement à ce dernier, il ne requiert pas de fils d'interconnexion, de lignes à impédance élevée ou de couplages forts. Cependant, il occupe un espace non

négligeable. En technologie MMIC, ce circuit est souvent utilisé dans une version réduite utilisant des éléments localisés pour minimiser son empreinte **Figure II.7.a**. La réduction de taille repose sur le remplacement des lignes quart d'onde par des lignes $\lambda/8$ chargées de manière capacitive **Figure II.7.b** [9].

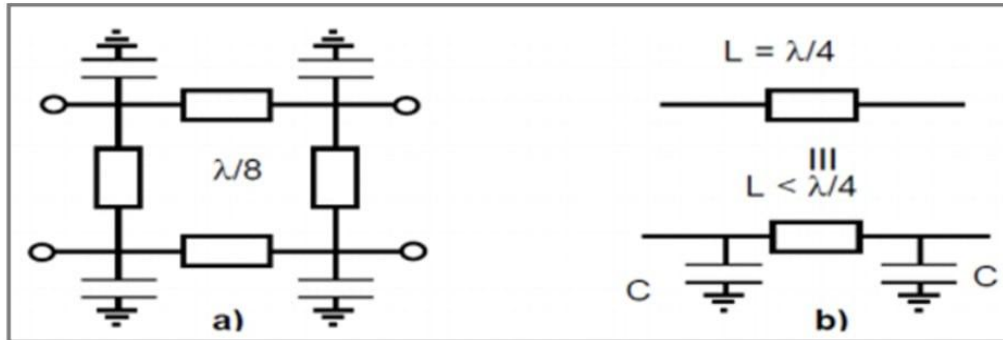


Fig.II.25. Coupler à branche à taille réduite chargé capacitivement b) technique localisée de réduction de taille des lignes $\lambda/4$

Dans un coupleur à branches, les performances optimales sont atteintes uniquement à la fréquence centrale où les lignes ont une longueur électrique de 90 degrés. Par conséquent, ces coupleurs conviennent uniquement aux applications à bande étroite ne nécessitant pas plus de 10% de bande passante. De même, le principe du coupleur 0-180 degrés en anneau, également basé sur des lignes quart d'onde, présentera des limitations similaires.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les caractéristiques des coupleurs en évitant des formulations trop complexes et des équations théoriques ardues. Notre objectif était de nous concentrer sur la recherche générale des coupleurs directionnels et sur les différents types de coupleurs. Pour cela, nous avons fourni quelques concepts essentiels pour comprendre leur fonctionnement et mentionné quelques exemples de coupleurs directionnels. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la conception de ces coupleurs conformément aux spécifications détaillées. Nous préconisons l'utilisation d'un logiciel de simulation, en l'occurrence ADS, pour garantir une conception efficace. En outre, nous avons exploré la technologie SIW et présenté la procédure de conception des guides d'ondes SIW ainsi que l'utilisation du cône pour améliorer leurs performances, en utilisant une formule mathématique donnée pour déterminer les paramètres initiaux du cône.

Chapitre III :

Simulation et résultats expérimentaux

III.1 Introduction

Les coupleurs directionnels sont indispensables dans les systèmes RF en raison de leurs nombreuses applications et avantages. Ils permettent de mesurer et de surveiller la puissance des signaux sans perturber le circuit principal, tout en assurant une isolation efficace entre les ports pour minimiser les interférences. De plus, ils divisent les signaux en plusieurs chemins pour une distribution précise et protègent les équipements sensibles des déséquilibres. Dans les circuits imprimés des systèmes de communication, ils sont essentiels pour détecter la direction du signal, garantissant ainsi le bon fonctionnement des récepteurs et des émetteurs. En somme, les coupleurs directionnels assurent l'efficacité et la fiabilité des communications RF.

III.2 Cahier de charge imposer pour la conception du coupleur directionnel

Nous concevons et fabriquons un "coupleur directionnel dans la bande Ka" avec une fréquence de résonance autour de 32GHz. Ce coupleur est destiné à la distribution de puissance, ainsi qu'à la mesure et à l'extraction des signaux d'une ligne de transmission principale vers des lignes secondaires dans les systèmes micro-ondes.

Le substrat utilisé dans ce projet est : le substrat diélectrique à haute fréquence FR4 ; ce substrat est l'un des choix les plus courants pour la fabrication de dispositifs RF, y compris les coupleurs directionnels opérant dans la bande fréquentiel 25 GHz et 36 GHz avec une fréquence de résonance de 32GHz assurant le fonctionnement dans la bande Ka.

Dans ce travail nous avons utilisé un substrat type FR-4 ayant des caractéristiques importantes et son existence sur le marché ce qui permet la réalisation de notre projet. Nous citons quelques propriétés de ce type de substrat :

- Il offre une faible perte et une constante diélectrique relativement stable sur une large gamme de fréquences, ce qui est crucial pour maintenir l'intégrité du signal dans les applications RF.
- Présente une bonne rigidité mécanique, le rendant robuste pour la fabrication de circuits RF. Cette rigidité aide à maintenir les dimensions et les propriétés du circuit même dans des environnements difficiles.
- Est largement disponible et relativement peu coûteux par rapport à d'autres substrats haute fréquence, ce qui en fait un choix économique pour de nombreuses applications.
- Il est compatible avec divers processus de fabrication, tels que la photolithographie, la métallisation et le soudage, facilitant ainsi la fabrication de dispositifs RF complexes.
- Largement utilisé dans l'industrie électronique pour une variété d'applications RF, allant des antennes aux circuits intégrés, en passant par les coupleurs directionnels.

Sur ADS nous avons choisis le substrat ayant les propriétés suivantes



Fig.III.26. Choix du substrat sur ADS

Les valeurs des différents éléments de coupleur directionnel sont données dans la spécification Tableau suivant :

Tableau 1. Caractéristiques du substrat et la couche conductrice

Le type de matériaux	Les composants d'antenne	Hauteur (mm)	Permittivité diélectrique
FR-4 (Lossy)	Substrat	1.6	4.3
Copper (annealed)	Plan de masse et le Patch	0.035	\

Après le choix du substrat et la couche conductrice sur lesquels se base notre réalisation. Nous entamer notre travail par le calcul de l'impédance de la ligne allons d'alimentation.

III.3 Calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation

Le choix de la ligne d'alimentation repose sur la nécessité d'une impédance caractéristique d'environ 50 Ω . Parmi les différents types de lignes de transmission couramment utilisées pour alimenter les coupleurs directionnels imprimés, nous avons opté pour les lignes micro-rubans. Le type de substrat sélectionné influence directement l'impédance caractéristique de la ligne de transmission, notamment en termes de permittivité relative et d'épaisseur. Cette sélection permet de garantir une bonne adaptation de l'impédance d'entrée. De plus, il est possible de calculer cette impédance en utilisant l'outil de simulation **LineCalc** pour calculer les paramètres des lignes d'alimentations du coupleur à réaliser. La **Figure III.2** montre la fenêtre **LineCalc**.

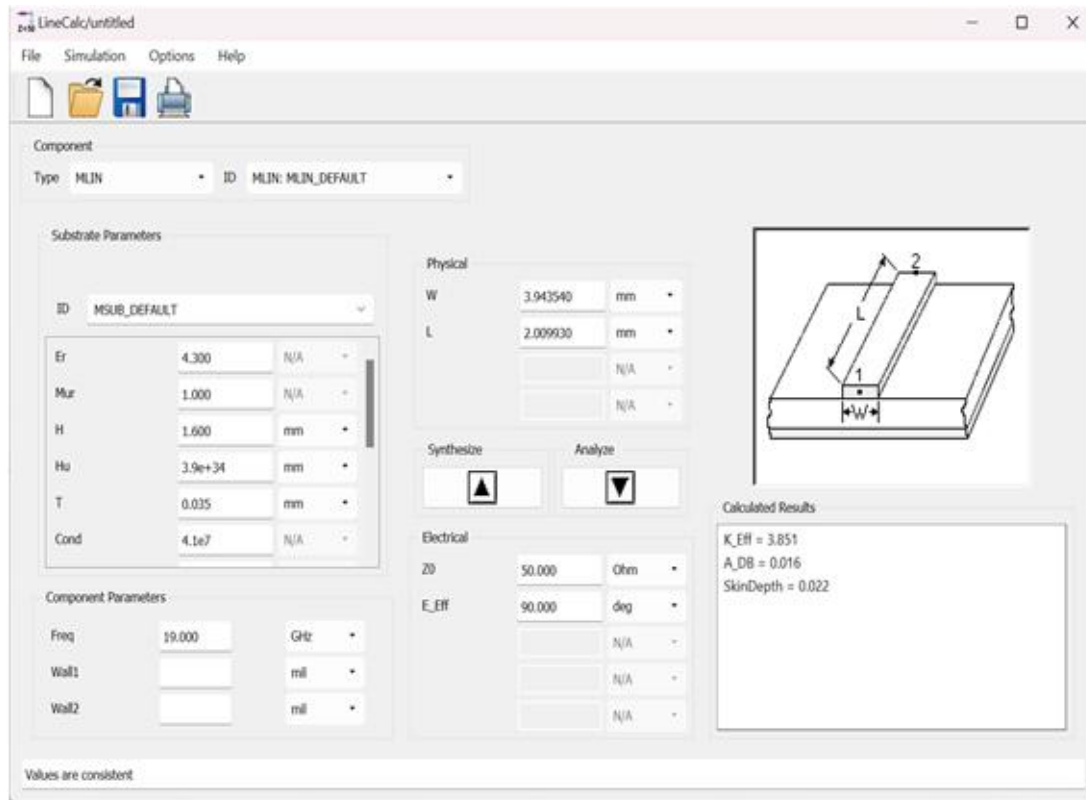


Fig.III.27. Fenêtre LineCalc utiliser pour le calcul de l'impédance de la ligne d'alimentation dans logiciel ADS

III.4 Paramètre d'un coupleur directionnel

La structure de base d'un coupleur directionnel comprend généralement quatre ports : le port d'entrée (port 1), le port de sortie (port 2), le port couplé (port 3) et le port isolé (port 4). Lorsqu'un signal est appliqué au port d'entrée, une partie de ce signal est transmise au port de sortie, tandis qu'une fraction spécifique est couplée au port couplé. Idéalement, aucune puissance ne devrait être transmise au port isolé. Cette configuration permet de mesurer la puissance et de surveiller les signaux dans les systèmes RF sans perturber le chemin principal du signal.

Les coupleurs directionnels peuvent être réalisés en différentes technologies, notamment les lignes micro-ruban et les guides d'ondes. Dans un coupleur micro-ruban, deux lignes de transmission sont placées côte à côte, permettant au signal de se coupler électro-magnétiquement entre elles. Les coupleurs directionnels sont caractérisés par des paramètres clés tels que le facteur de couplage, la directivité et l'isolation, qui déterminent leur efficacité et leur capacité à séparer les signaux dans différentes directions.

Coefficient de couplage

Le coefficient de couplage, exprimé en dB, est le rapport entre la puissance d'entrée et la puissance au port couplé lorsque tous les ports sont correctement connectés. C'est une caractéristique clé d'un

coupleur directionnel. La sortie couplée, proportionnelle à la puissance de l'entrée, peut être connectée à des instruments comme un oscilloscope sans risque de surcharge.

Isolement

L'isolement, en dB, est le rapport entre la puissance au port d'entrée et celle au port isolé, avec tous les ports correctement connectés.

Directivité

La directivité, en dB, est le rapport entre la puissance au port couplé et celle au port isolé lorsque tous les ports sont correctement connectés. Pour un coupleur à trois ports, cela nécessite des mesures dans les deux sens (direct et inversé). Elle évalue la séparation des composantes directe et réfléchie, et une directivité élevée indique de meilleures performances. La directivité est calculée à partir des mesures d'isolement et d'isolement inversé.

III.5 Simulation avec ADS

ADS (Advanced Design System) est une suite logicielle développée par Keysight Technologies. Il est largement utilisé pour la conception et la simulation de circuits numériques RF, micro-ondes et haute vitesse. L'ADS est particulièrement populaire dans les domaines des communications, de l'aérospatiale, de la défense et des semi-conducteurs.

Voici un tutoriel rapide sur la façon dont vous utilisez le logiciel ADS ; cliquez sur ADS, cela apparaîtra, choisi ADS Design Environnement, puis cliquez OK

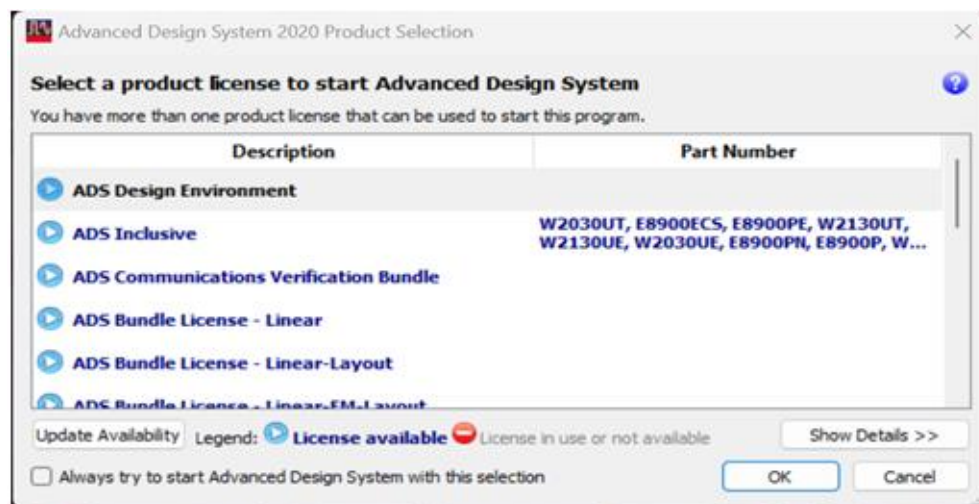


Fig.III.28. Advanced design system product selection

Après une clique sur l'icône ADS Design Environnement, l'écran de la **Figure III.4.** S'apparaîtra

Cet écran nous permet de créer et de nommer les projets sur lesquels nous voulions travailler. Nous pouvons créer plus de cellules de simulation dans une seule fenêtre. Comme le montre la **Figure III.4.** Ci-dessous

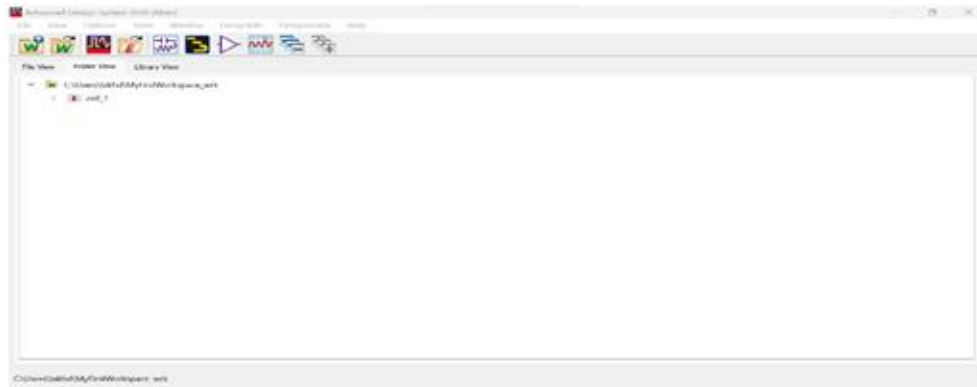


Fig.III.29. Création nouveau projet

Dans la fenêtre du projet ouvert dans ADS, nous pouvons créer de nouveaux projets. Les projets sont enregistrés sous forme de dossier à l'emplacement désigné. Chaque projet pourrait être composé de plusieurs cellules, chaque cellule comporte un schéma ou un tracé du circuit imprimé. Les conceptions pourraient être simulées individuellement ou ensemble en tant que système.

Click sur new schematic window, pour créer un nouveau projet comme le montre la **Figure III.5**.

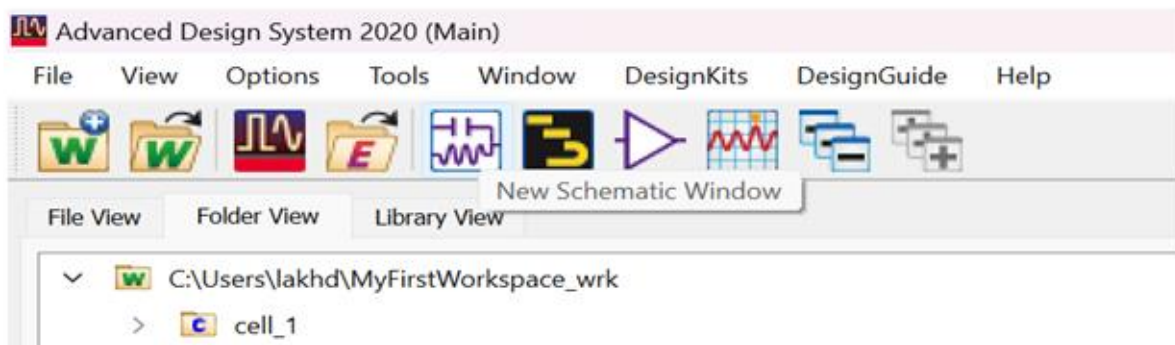


Fig.III.30. Création d'un nouveau schéma en ADS

Puis on nomme la cellule de notre projet comme le montre la **Figure III.6**.

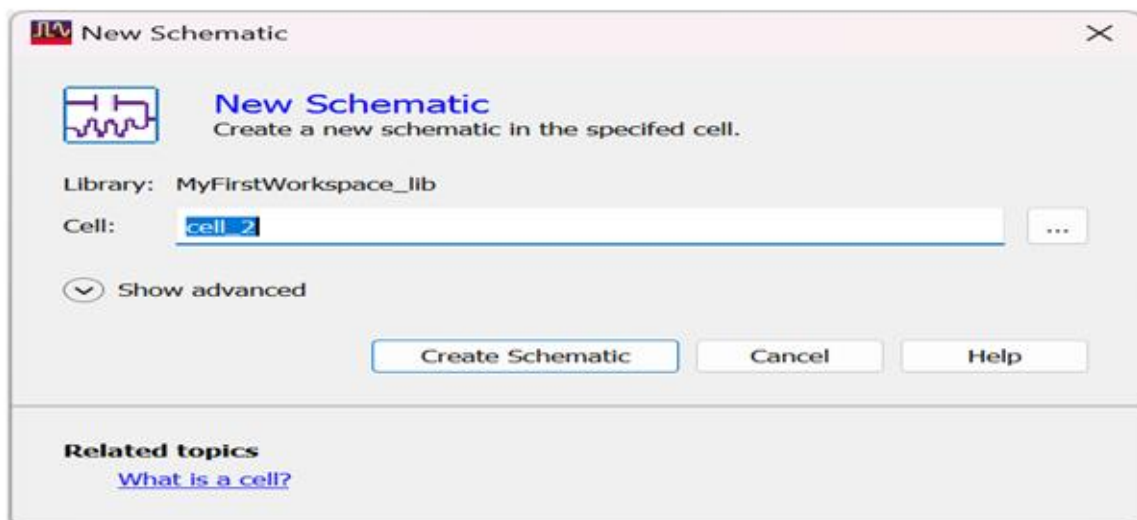


Fig.III.31. Nomination d'une cellule en ADS

Une nouvelle fenêtre de conception ou de design s'ouvre comme le montre la **Figure III.7**.

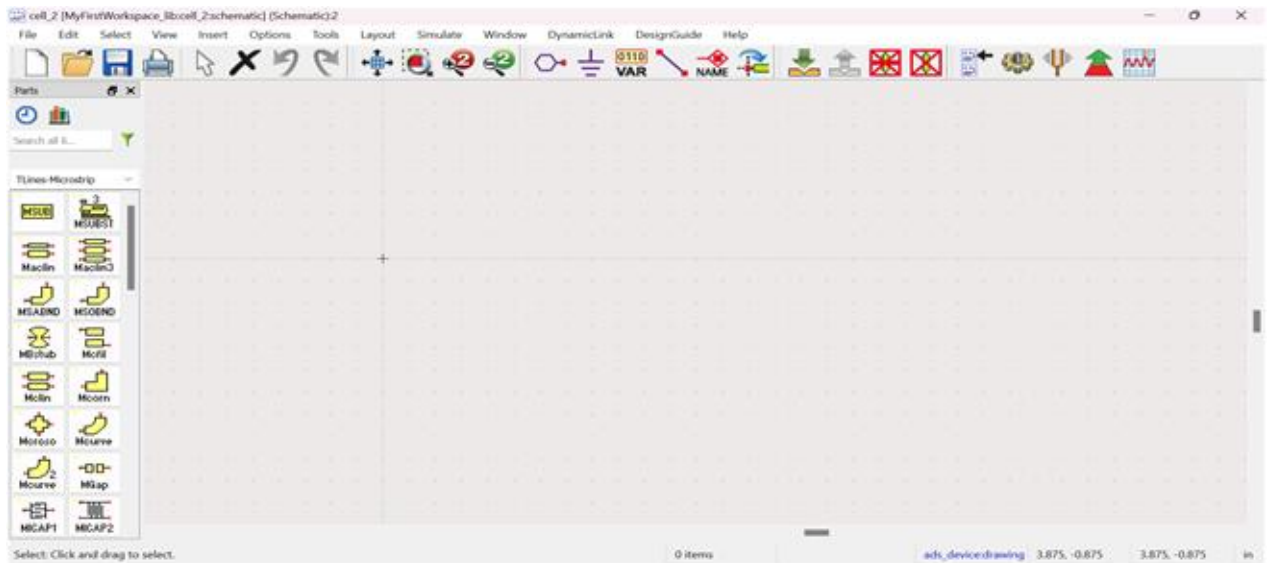


Fig.III.32. Fenêtre de conception ou de design

III.6 Conception d'un coupleur directionnel initial

Nous avons commencé dans ce projet de fin d'étude par un coupleur classique. La **Figure III.8**.

Ci-dessous montre ce dernier sur la fenêtre de simulation ADS.

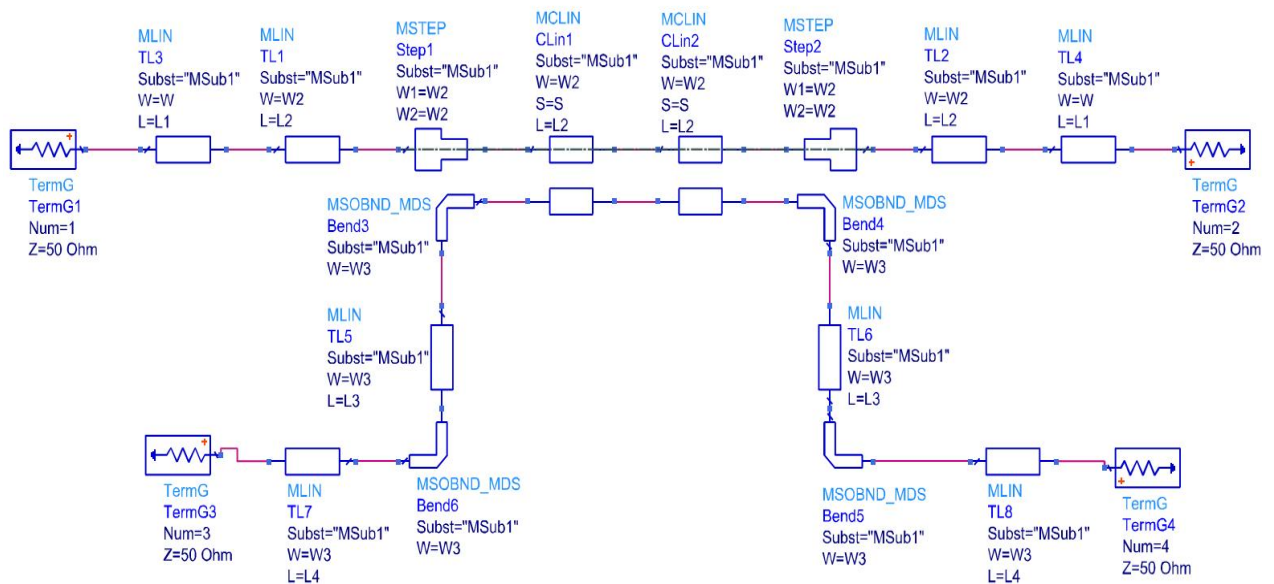


Fig.III.33. Coupleur initial

Le coupleur directionnel initial est représenté sur la **Figure III.9**.

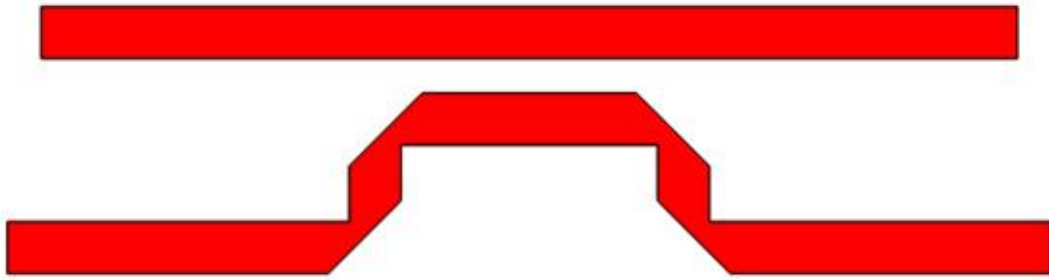


Fig.III.34. Coupleur initiale layout

Nous avons utilisé des microstrips lines, des microstrips step in width, des microstrips coupled lines, des optimally chamfered bend (90-degree) et des port termination with ground pour les entrees et les sorties ($Z = 50 \text{ ohm}$)

Le Tableau suivant présente un résumé des dimensions du coupleur proposé ;

Tableau 2. Un résumé des dimensions du coupleur proposé

Variables	Valeurs (mm)
W	1.5
L1	7.92
L2	3.1
W2	1.5
W3	1.5
L3	1
L4	9.28
S	1

Les paramètres S obtenus sont présentés ci-dessous Click simulate ;

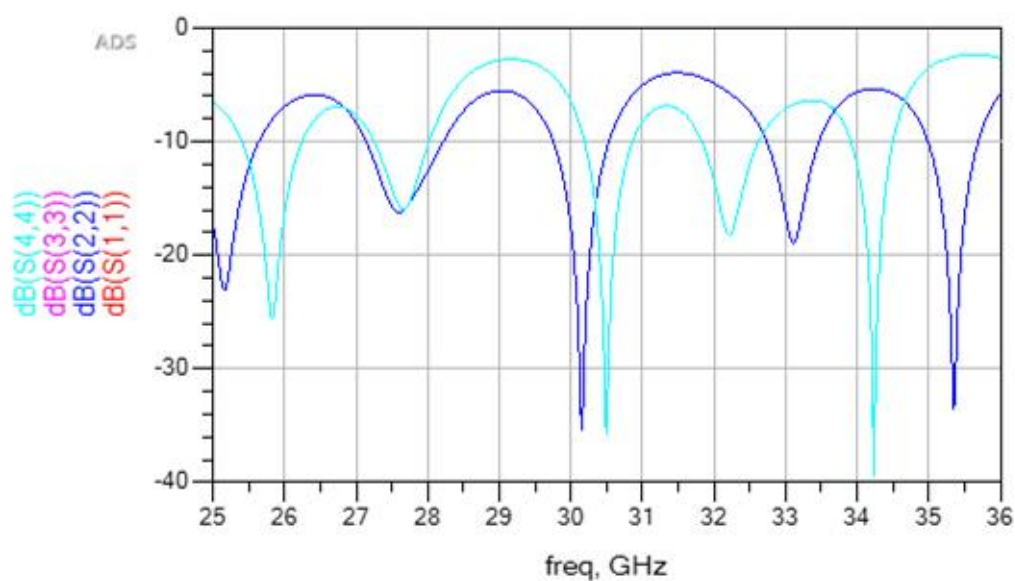


Fig.III.35. Les paramètres S des ports du coupleur proposé

On remarque que les paramètres $S(11)$; $S(22)$ obtenus présentent des fréquences de résonance respectivement autour 25 GHz, 27.5GHz, 35GHz, 34GHz et les paramètres $S(33)$; $S(44)$ ayant des fréquences de résonances autour 26 GHz, 30.5GHz et 32 GHz 34 GHz ces résultats ne satisfont pas le cahier des charges ce qui nécessite des modifications dans le design afin de régler les résultats obtenus.

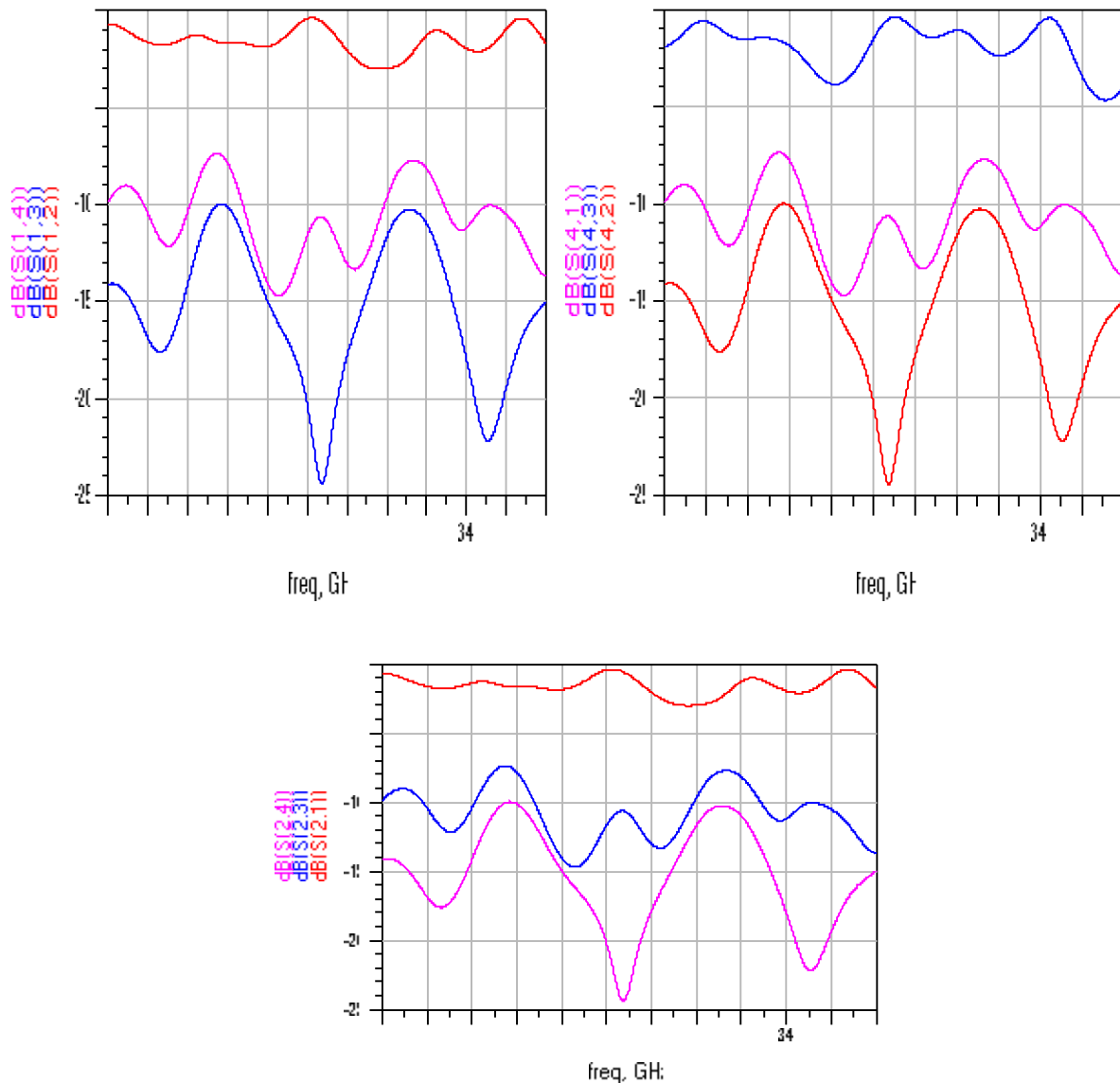


Fig.III.36. Les paramètres S de couplages du coupleur proposé

On remarque aussi que les paramètres de couplages entre les ports sont insatisfaisants. Ce qui nécessite des modifications dans le design.

D'après les résultats, nous constatons que ces valeurs ne correspondent pas aux exigences du cahier de charge requises pour le succès de notre travail.

Pour cela nous avons opté autre modification sur la conception initial en changeant quelques paramètres.

III.7 Le nouveau design

Suite que les résultats du design précédent ne sont pas satisfaisante et après des essais de simulation le nouveau design est représenté par la Fig.III.37. ci-dessous

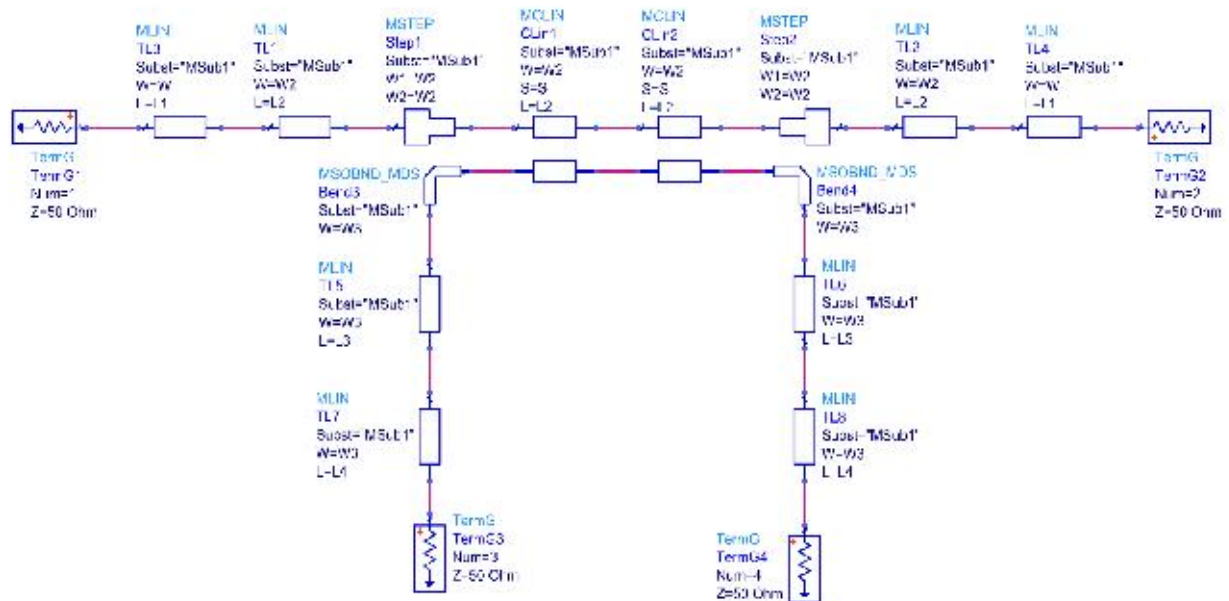


Fig.III.38. Schéma du nouveau coupleur directionnel

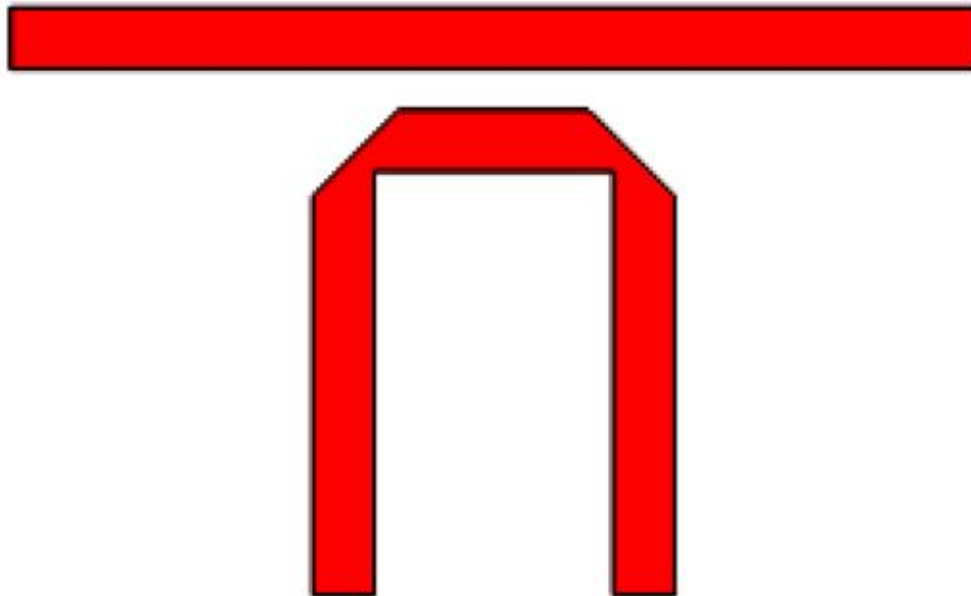


Fig.III.39. Layout du nouveau coupleur directionnel

Le Tableau suivant présente les nouveaux paramètres du coupleur proposé

Tableau 3. Les nouveaux paramètres du coupleur proposé

Variables	Valeurs (mm)
W	1.5
L1	4.72
L2	1.93
W2	1.5
W3	1.5
L3	6.24
L4	6.88
S	2.74

Les paramètres S obtenus sont présentés par la **Fig.III.40.** ci-dessous

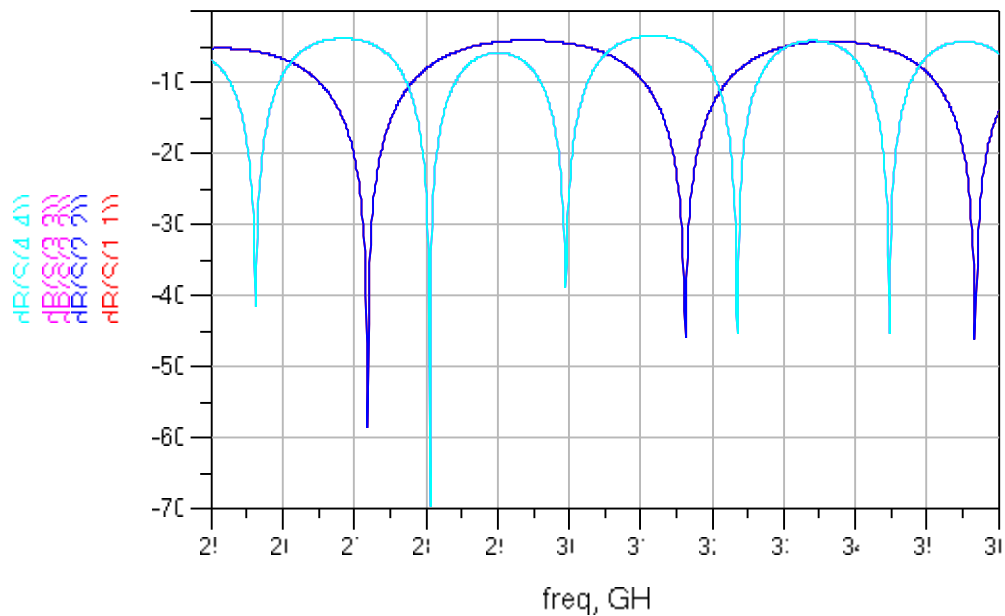


Fig.III.41. Parameters S (11); S (22); S (33); S (44)

Afin d'y parvenir, nous utiliserons TUNING pour obtenir les meilleures valeurs et les valeurs appropriées.

III.8 Etude paramétriques

Nous avons apporté plusieurs modifications à ce coupleur directionnel ; Nous avons utilisé TUNING pour obtenir les valeurs appropriées afin d'obtenir de meilleurs résultats,

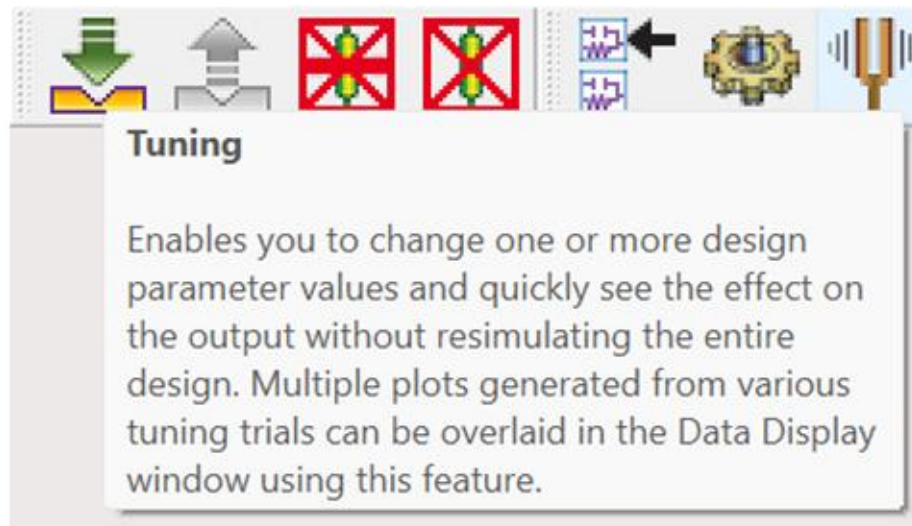


Fig.III.42. Fenêtre tuning ou de réglage en ADS

Ici nous entrons les valeurs que nous souhaitons étudier et changer

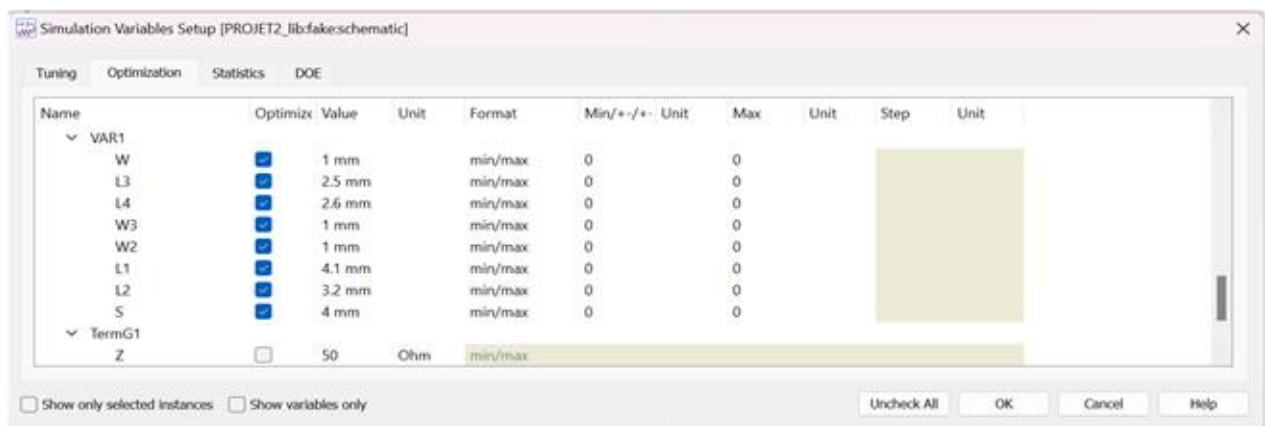


Fig.III.43. Paramètres du coupleur a réglés

Les valeurs (W, L3, L4, W3, W2, L1, L2, S)

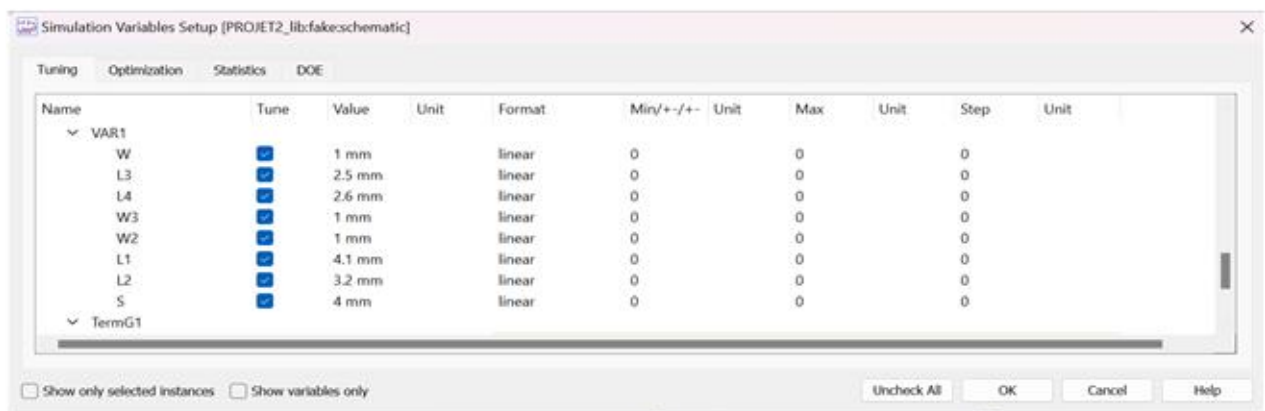


Fig.III.44. Fenêtre ADS des paramètres de réglage

Après la sélection des paramètres de réglages et la validation une autre fenêtre apparue. Cette dernière permet de voir l'effet de chaque paramètre sur les réponses de notre coupleur directionnel.

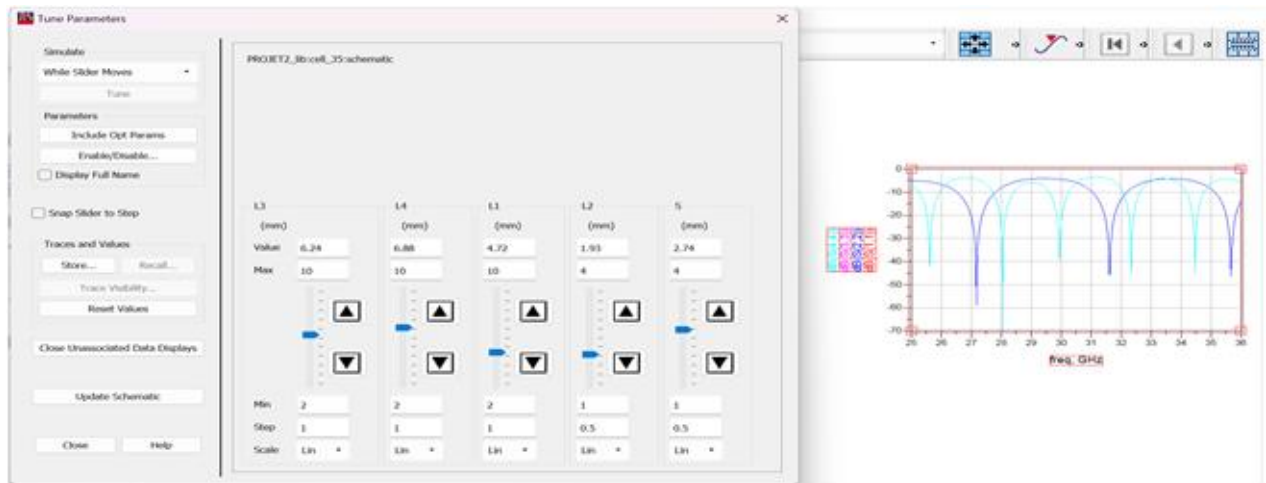


Fig.III.45. Fenêtre de tuning ou de réglage

Et voilà les résultats après utilise TUNING,

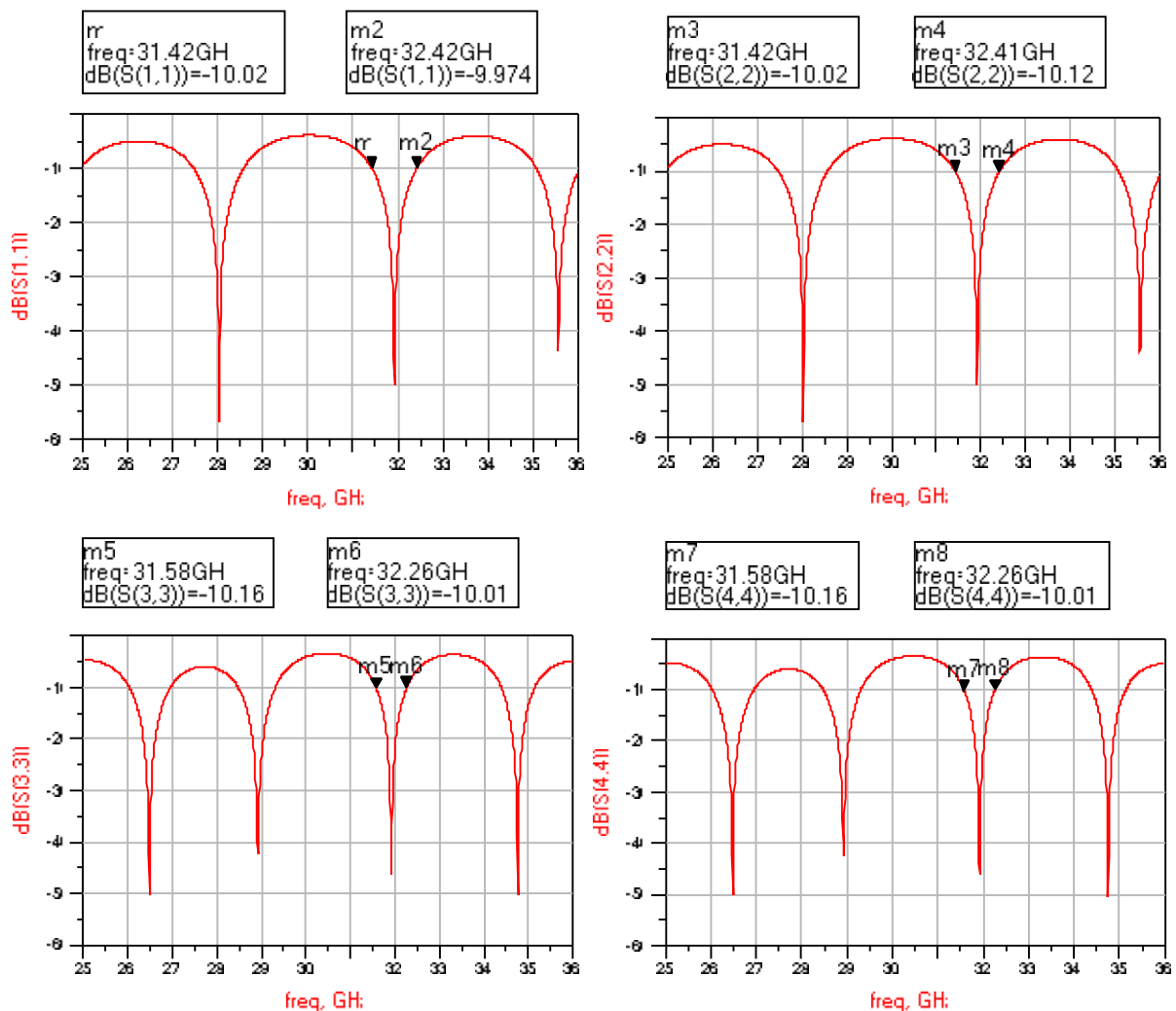


Fig.III.46. Les bandes passantes des Ports du coupleur proposé

Les Figure III.19 représentent les bandes passantes de Chaque Port. Le tableau ci-dessous résume la bande passante et le facteur de qualité du coupleur proposé.

Tableau 4. Résume la bande passante et le facteur de qualité du coupleur proposé

Port	Fréquence de résonance	Bande passante	Facteur de qualité BP/Fr
1	32	1	0.03
2	32	0.99	0.03
3	32	0.68	0.02
4	32	0.68	0.02

III.9 Structure finale de coupleur directionnel proposé

Le coupleur final est représenté sur la figure ci-dessous

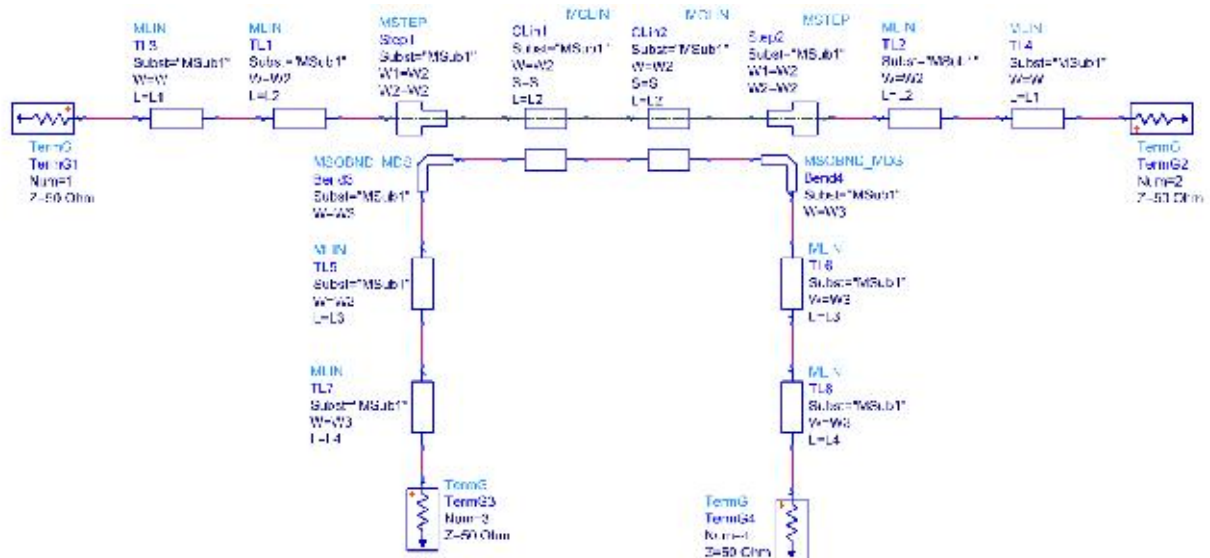


Fig.III.47. Schéma du coupleur final

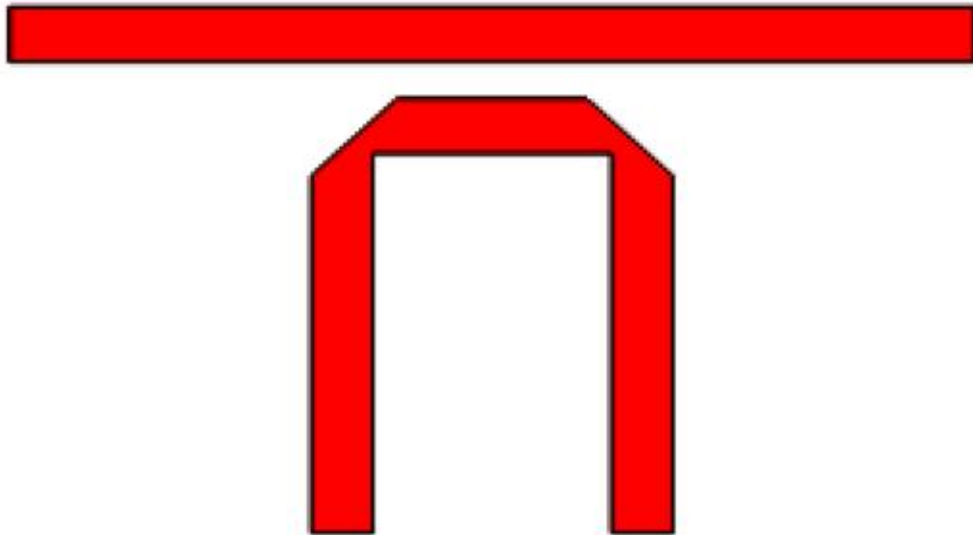


Fig.III.48. Layout du coupleur final

Le Tableau ci-dessous résume les dimensions finales de ce coupleur directionnel ;

Tableau 5. Les dimensions finales de ce coupleur directionnel

paramètres	Valeurs (mm)
W	1.5
L1	3.2
L2	3.25
W2	1.5
W3	1.5
L3	5.76
L4	2.64
S	3.07

Après avoir obtenu de bonne résultats satisfait les obligations du cahier de charge, nous avons procédé à la réalisation de notre coupleur

III.10 Etapes de réalisation

Le travail est conclu par une réalisation pratique du circuit de coupleur directionnel et des mesures en large bande par un VNA.

Nous réalisé un Typon du coupleur en transformant le layout du logiciel ADS en utilisant un autre logiciel spécial pour ce type de conversion qui est le GerberView. Ce dernier réserve les dimensions réelles du layout de chaque couche. Le design est représenté par la figure ci-dessous

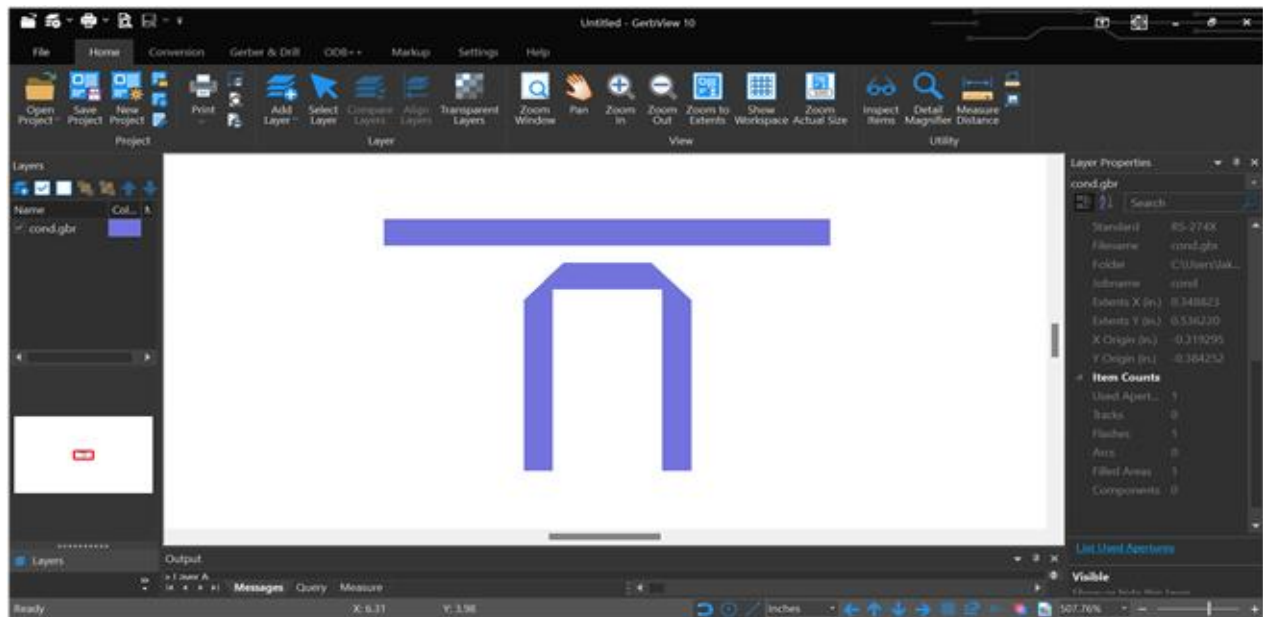


Fig.III.49. Le fichier Gerber obtenu pour le design qui est par la suite imprimé sur un papier calque

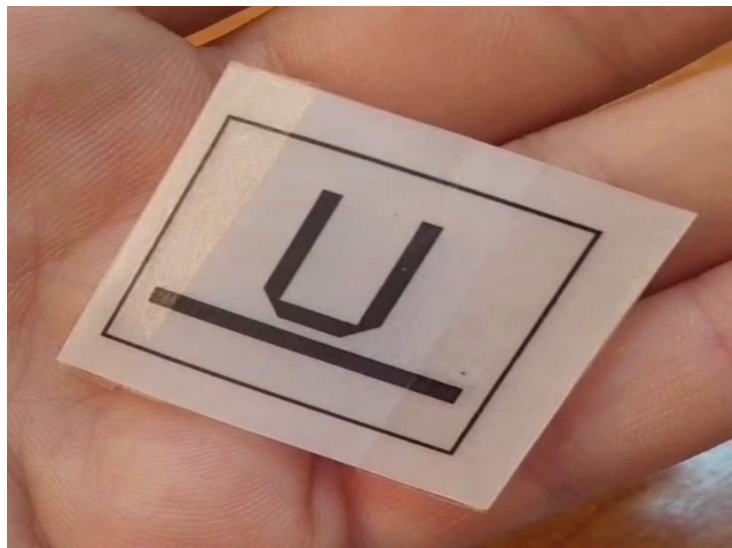


Fig.III.50. Layout après impression sur papier calque

III.10.1 Circuit imprimée

Le Matériel nécessaire pour la réalisation du coupleur est le suivant

- Plaque d'époxy pré-sensibilisé double face La scie à métaux pour découper l'époxy.
- Du perchlorure de fer liquide.
- Une insoleuse (par défaut une simple ampoule de 100 Watts avec un plaque verre peu convenir).
- Hydroxyde de sodium (NaOH), également appelé soude caustique.

III.10.1.1 Les étapes de la réalisation du circuit imprimé

Notre coupleur directionnel doit être réalisé, pour cela nous avons utilisé l'insoleuse du labo maquette pour ces caractéristiques de précision dans la réalisation des typons.

Une insoleuse, ou machine d'insolation, est un appareil qui expose des matériaux photosensibles à une source de lumière, généralement ultraviolette (UV). Cet outil est fréquemment utilisé dans la fabrication de circuits imprimés, la photogravure et la sérigraphie pour transférer des motifs sur une surface à l'aide de masques ou de films.

L'insolation désigne le processus d'exposition de ces matériaux à la lumière, provoquant une réaction chimique qui permet de révéler ou de durcir certaines parties du matériau en fonction de l'application et du type de résine photosensible utilisé.

A- Utilisation de l'insoleuse

Découpez la plaque d'époxy à la taille du typon, en laissant une marge de 0,5 cm tout autour. Placez soigneusement le typon sur la vitre de l'insoleuse (côté composants vers le haut). Retirez la pellicule protectrice de la plaque d'époxy, puis placez le côté vert de la plaque sur le typon dans l'insoleuse. Fermez le capot et réglez la minuterie sur 4 minutes.

B- Le typon

Un typon est une image du circuit imprimé. Les pistes sont en noir et le reste doit être transparent à la lumière. Notre méthode est d'exposer au rayons ultraviolet le typon sur une feuille transparente pendant 180 secondes **Figure.III.24**



Fig.III.51. Programmation du temps de l'insoleuse

C- Développement du ce coupleur directionnel

Le révélateur doit être versé dans une bassine en plastique (PVC) ou en verre pour révéler le circuit imprimé. Le processus de révélation dure de quelques secondes à quelques dizaines de secondes, mais il reste toujours rapide et visuellement observable. Pendant que l'on remue délicatement la bassine, on voit progressivement apparaître le cuivre nu (de couleur rose) aux endroits exposés aux UV, c'est-à-dire les zones qui seront éliminées lors de l'étape de gravure finale. **Figure.III.25**



Fig.III.52. Le NaOH granulaire

Ensuite, nous sortons le circuit et le plaçons dans un récipient en plastique contenant du perchlorure de fer liquide. En bougeant doucement le récipient, le cuivre non protégé par le masque disparaît progressivement, ne laissant apparaître que la forme que nous avons conçue.

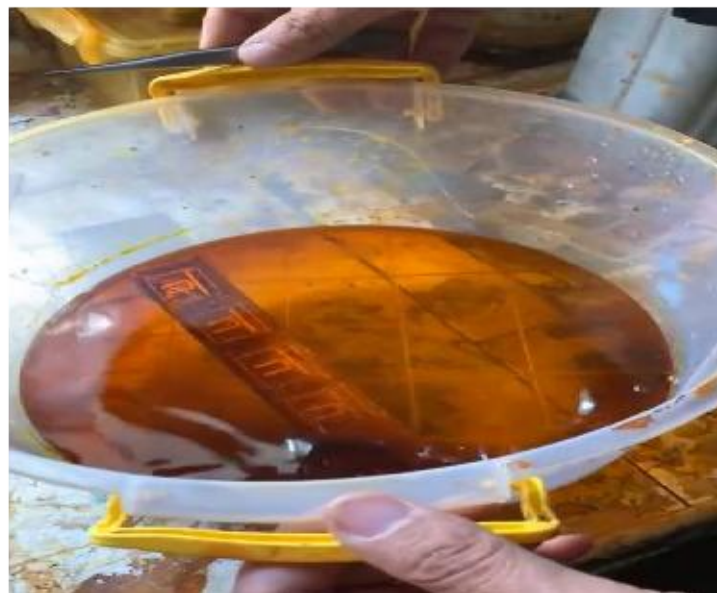


Fig.III.53. Dépôt du circuit imprimé dans le perchlorure de fer

Figure III.26 dépôt de la carte imprime dans le perchlorure de fer pour éliminer la couche cuivreuse
Après plusieurs minutes, nous retirons le circuit du récipient en plastique contenant du perchlorure de fer liquide. Le cuivre non protégé se dissout, ne laissant apparaître que la forme du circuit que nous avons conçue.



Fig.III.54. Le coupleur Finale avant le découpage

III.12 Coupleur prototype réalisé

Nous avons conçu et réalisé un prototype d'un coupleur directionnel miniature Ka-bande fonctionnant aux fréquences de 25 GHz et 35 GHz pour les applications 5G, comme illustré dans la **Figure III.28**



(a)

(b)

Fig.III.55. (a) Coupleur après soudage des connecteur SMA, (b) Comparaison du coupleur avec un EURO

III.13 Système de mesure

Les figures ci-dessous d

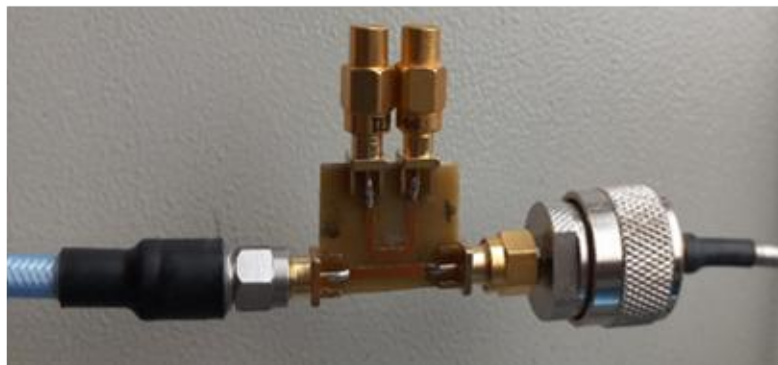


Fig. III.29. Coupleur lié à l'analyseur de réseaux vectoriel (VNA)

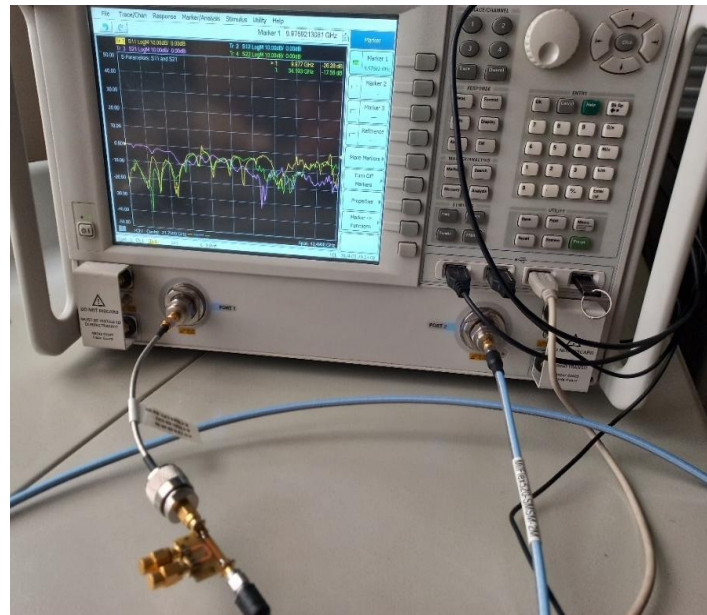


Fig. III.30. Analyseur de réseaux vectoriel (VNA) utilisé

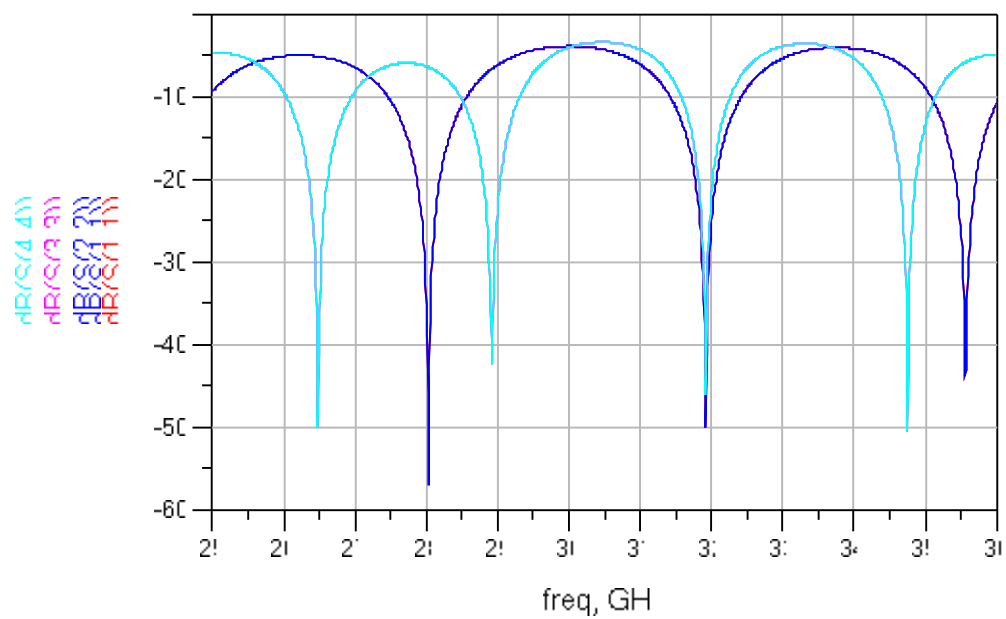


Fig. III.31. Les paramètres S des ports du coupleur proposé après réglages

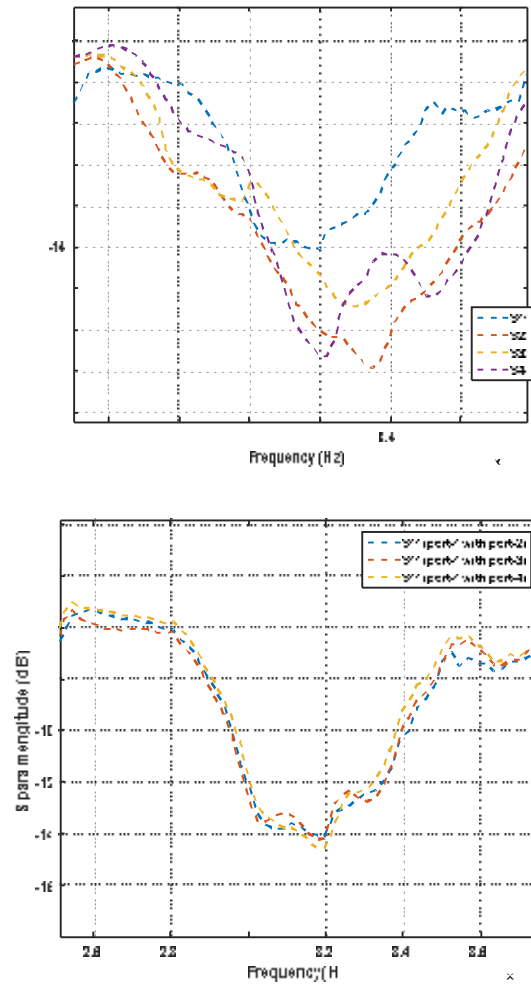


Fig. III.32. Résultats expérimentaux (paramètres S)

C'est ainsi que nous avons pu achever les travaux et faire fonctionner notre projet dans la bande Ka qui nous était spécifié. Pour le développer, nous avons voulu essayer d'en faire une entrée et un nombre infini de sorties (selon les besoins). Le design ci-dessous **Figure III.33** montre la prolongation fait sur le design initial pour augmenter le nombre d'entrées/sorties :

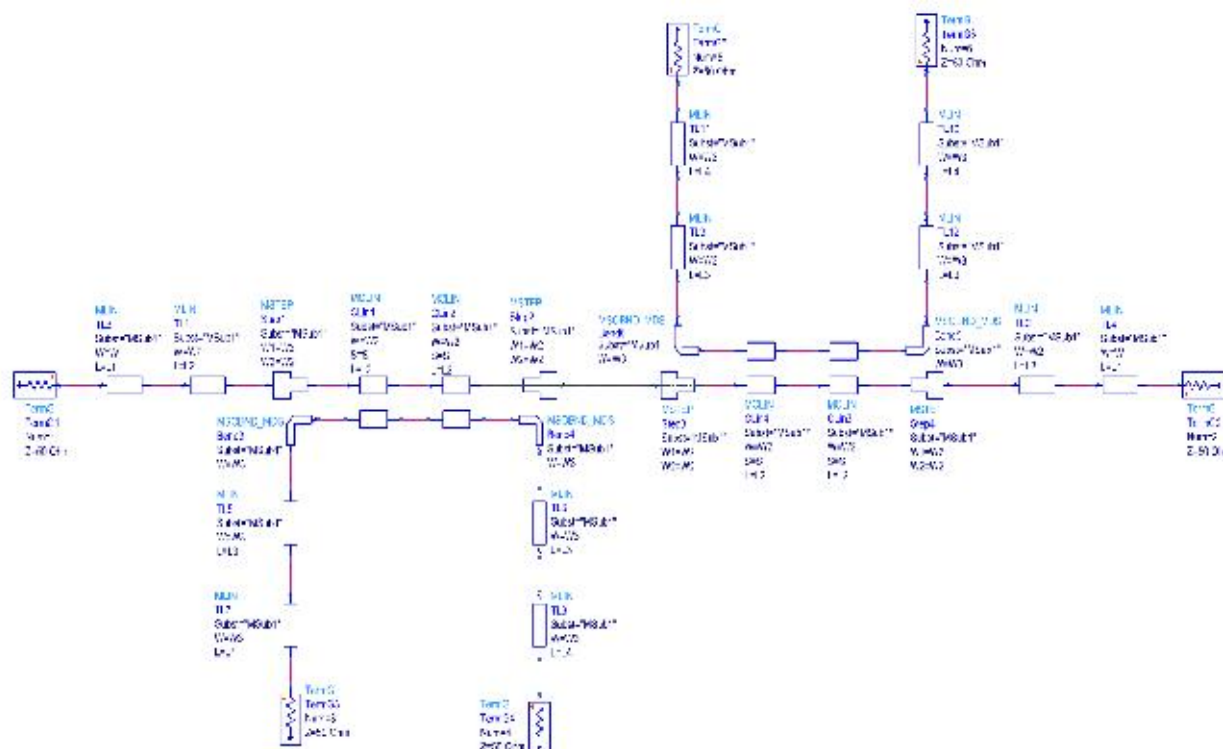


Fig. III.33. Coupleur directionnel a six ports d'entrées /sorties

La réponse de ce dernier (les paramètres S)

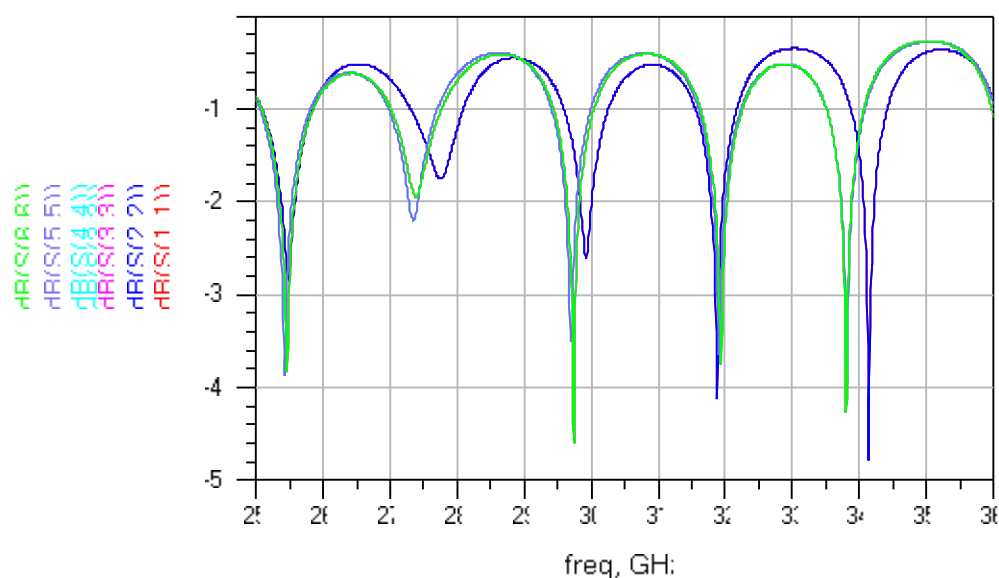


Fig. III.34. Résultats de simulation d'un coupleur de six ports

III.14 Conclusion

Les coupleurs directionnels imprimés, malgré leur géométrie simple, nécessitent des études théoriques et numériques approfondies pour leur conception. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation et de la réalisation d'un coupleur directionnel miniature fonctionnant dans la bande Ka,

destiné aux applications 5G. Les techniques de miniaturisation et d'optimisation que nous avons utilisées ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants conformes aux exigences requises. La conception de ce coupleur directionnel a été réalisée à l'aide du logiciel ADS. En plus, nous avons fait la conception d'un coupleur avec six ports ce qui est un apport dans ce travail. Cette idée permet d'avoir des coupleurs à N ports en utilisant cette dernière technique.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Les coupleurs directionnels sont des éléments essentiels des systèmes de communication modernes, Ils permettent la division et le couplage des signaux, ce qui les rend particulièrement utile dans les applications nécessitant une mesure de signal ou une surveillance de la puissance. Dans le cadre des applications RF et des technologies 5G, leur capacité à diviser et combiner les signaux tout en isolant les voies d'entrée et de sortie est cruciale pour assurer la précision et l'efficacité des transmissions de données.

Dans ce mémoire, nous avons explicité en détail les composants RF et les coupleurs directionnels, en analysant leurs types, leurs principes de fonctionnement ainsi que leurs applications pratiques. Nous avons également souligné l'importance de la bande Ka pour les applications de haute fréquence, en termes de capacité de bande passante et de vitesse de transmission des données, qui présentent des éléments essentiels pour les réseaux 5G.

La conception et la réalisation d'un prototype de coupleur directionnel dans la bande Ka a illustré l'importance d'utiliser des techniques de conception avancées et des simulations pour optimiser les performances. Les tests rigoureux effectués sur le prototype ont confirmé que les objectifs de performance étaient atteints, démontrant ainsi la pertinence de ces dispositifs pour les applications 5G.

Les coupleurs directionnels sont indispensables pour le développement et l'optimisation des réseaux de communication de nouvelle génération. Les avancées dans la conception et la fabrication de ces dispositifs, en particulier dans la bande Ka, continueront à soutenir la croissance des technologies de communication avancées, offrant des performances améliorées et des capacités accrues pour répondre aux besoins croissants en connectivité et en transmission de données.

Le premier chapitre présente une introduction sur les composants RF en mettant en évidence leurs différents types, leurs principes de fonctionnements et leurs applications.

Le deuxième chapitre est dédié à un panorama de l'état de l'art des coupleurs de puissance directionnels avec lequel on a donné les différents types de coupleurs directionnels et leurs propriétés correspondantes.

Le troisième chapitre est réservé à la simulation de notre coupleur en développant une structure de base qu'on a amélioré par la suite, en utilisant le logiciel ADS. Les résultats préliminaires nous ont laissé à faire des améliorations sur la structure initiale pour obtenir des meilleures performances. La nouvelle structure ainsi développée nous a donné des résultats dans la plage des fréquences souhaités, avec un gain optimal. Les résultats obtenus peuvent être amélioré en exploitant les caractéristiques données par le logiciel ADS.

En faisant un réglage adéquat (tunning), nos courbes sont améliorées en donnant des paramètres meilleurs.

Un travail pratique a été fait à cet égard. De telle sorte que sur une plaque imprimée double face ayant un diélectrique de type FR4 on a implémenté notre schéma. Pour pouvoir tester et analyser les résultats on a besoin d'installer des connecteurs SMA pour une éventuelle connexion avec l'analyseur de réseau. Les résultats pratiques obtenus en montrant une similitude avec ceux de la simulation.

Comme perspectives, nous attendons à ajouter plus de connecteurs afin d'avoir des résultats meilleurs proches de ceux obtenus dans notre cas.

Références bibliographiques

- [1] <https://ascentoptics.com/blog/fr/what-are-the-best-fiber-optic-couplers/>
- [2] <https://studylibfr.com/doc/3075750/coupleur-directionnel>
- [3] <https://www.rfcafe.com/vendors/components/filters.htm>
- [4] <https://studylibfr.com/doc/2238993/tp-sur-l-adaptation-d-imp%C3%A9dance>
- [5] Matthaei, G. L., Young, L., & Jones, E. M. T. (1980). Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures. Artech House.
- [6] "Hyperfréquences: Circuits, antennes et propagation" de Robert E. Collin, Éditions Eyrolles, 1992 (Chapitre 5 - Lignes de transmission et connecteurs).
- [7] Balanis, C. A. (2016). Antenna Theory: Analysis and Design (4ème édition). Wiley.
- [8] [https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Les_oscillateurs_\(g%C3%A9n%C3%A9rateurs_de_fr%C3%A9quence\)](https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Les_oscillateurs_(g%C3%A9n%C3%A9rateurs_de_fr%C3%A9quence))
- [9] BECHAREF Kada et BENZAI Amina, « Contribution à la Conception d'un Coupleur Directif en Technologie SIW dans la band X », mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay - Saida, juin 2014.
- [10] PETER Butterworth, ‘ ‘ Méthode de conception des mélangeurs millimétriques. Application à la réalisation MMIC d'un mélangeur sous-harmonique à FET froid [42-43.5 GHz] ‘ ’, Thèse de doctorat, spécialité: Télécommunications, Université de Limoges, 2003.

Résumé

ملخص

يتناول هذا البحث دراسة, محاكاة, تصميم و تنفيذ مقسمات الاتجاه المصممة للعمل في النطاق (26.5 و 40 جيجاهرتز) مم يلبي متطلبات شبكات الاتصال من الجيل الخامس, يوفر نطاق الذي يقع بين 26.5 و 40 جيجاهرتز مزايا كبيرة لتطبيقات التردد العالي, خاصة من حيث سعة النطاق الترددي وسرعة نقل البيانات. يركز البحث بعد ذلك بشكل خاص على مقسمات الاتجاه, حيث يستعرض أنواعها المختلفة, مبادئ عملها وتطبيقاتها العملية. تتعمق الدراسة في كيفية تمكين هذه الأجهزة من قياس الطاقة, التحكم في اتجاه الإشارات وتحسين أداء شبكات الاتصال.

يتضمن تنفيذ النموذج الأولي لمقسم الاتجاه استخدام مواد وتقنيات تصنيع مناسبة لتقليل الحجم مع الحفاظ على الأداء المطلوب. يتم بعد ذلك إجراء سلسلة من الاختبارات الدقيقة لتقييم أداء النموذج الأولي. تهدف هذه الاختبارات إلى التحقق مما إذا كان مقسم الاتجاه يلبي الأهداف المرجوة من الأداء وإذا ما كان صالحًا للاستخدام في تطبيقات الجيل الخامس

Abstract

This research addresses the study, simulation, design, and implementation of directional couplers designed to operate in the Ka band (26.5 to 40 GHz), meeting the requirements of 5G communication networks. The Ka band, located between 26.5 and 40 GHz, offers significant advantages for high-frequency applications, particularly in terms of bandwidth capacity and data transmission speed.

The research then focuses specifically on directional couplers, examining their various types, operating principles, and practical applications. The study delves into how these devices enable power measurement, signal direction control, and the enhancement of communication network performance.

The implementation of the directional coupler prototype involves the use of suitable materials and manufacturing techniques to minimize size while maintaining the required performance. Subsequently, a series of rigorous tests is conducted to evaluate the prototype's performance. These tests aim to verify whether the directional coupler meets the desired performance objectives and is suitable for use in 5G applications.

Résumé

Ce mémoire traite de l'étude, de la simulation, de la conception et de la réalisation de coupleurs directionnels conçus pour fonctionner dans la bande Ka, répondant ainsi aux exigences des réseaux de communication 5G. La bande Ka, située entre 26,5 et 40 GHz, offre des avantages significatifs pour les applications de haute fréquence, notamment en termes de capacité de bande passante et de vitesse de transmission des données. Le mémoire se concentre ensuite spécifiquement sur les coupleurs directionnels, explorant leurs différents types, leurs principes de fonctionnement et leurs applications pratiques. L'étude approfondit comment ces dispositifs permettent de mesurer la puissance, de contrôler la direction des signaux et d'optimiser les performances des réseaux de communication. La réalisation du prototype de coupleur directionnel implique l'utilisation de matériaux et de techniques de fabrication appropriés pour minimiser la taille tout en maintenant les performances requises. Une série de tests rigoureux est ensuite effectuée pour évaluer les performances du prototype. Ces tests permettent de vérifier si le coupleur directionnel répond aux objectifs de performance et s'il est apte à être utilisé dans les applications 5G.