

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Système des Télécommunications

Thème

Modélisation petit-signal du transistor HEMT à base de GaN utilisé dans les systèmes de télécommunications

Préparé par :

HAMADOUCHE Kenza.

HAMADOUCHE Salma.

Dirigé par :

Mr MAAFRI

Mme ACHOUR

Examiné par :

Mme BENDJELLOUL

Mme IDJDARENE

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous remercions avant tout Monsieur Maafri Djabar maitre de recherche au département de la microélectronique au CDTA ainsi que Madame Achour Lyakout enseignante à l'université Abderrahmane mira de Bejaia, pour leurs aides, leur suivi, leurs encouragements et leurs précieux conseils durant notre travail.

Merci également aux membres du jury pour l'honneur et l'amabilité d'avoir bien voulu accepter de juger notre travail.

Nous remercions tous les membres du département ATE.

Enfin, tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin, que ce soit par leurs amitiés, leurs conseils ou leurs soutien moral, trouveront dans ces quelques lignes l'expression de nos remerciements les plus vifs.

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes parents, eux qui m'ont dopé d'une éducation digne, Leurs amours a fait de moi la femme que je suis aujourd'hui, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection, «
maman, papa je vous aime ».*

A mes très chers frères « Madjid et Sofiane » qui ont partagé avec moi tous les moments difficiles durant mon parcours, vous êtes ma source de bonheur.

A toi ma bina la sœur que j'ai toujours rêvé d'avoir, merci d'être là.

A ma petite princesse Nelya ma petite protégée.

Ma chère cousine Faiza ainsi qu'à son mari Koukou et mes deux petits anges Ilyas et Selyan.

Ma tante adorée tata foufa que j'aime tant.

A mes amis plus particulièrement à : Ma Rose, Kheiredine (le Akh), Nesma, Yasmina, Dounia, Yasmine (je vous adore).

And the best for the end a special thank you to a special person, my sunshine, thank you for your presence, your support, your encouragement, your attention... , you are my inspiration thank you for believing in me, these are simple words that weigh heavy

SALMA

Dédicace

Je souhaite dédier ce modeste travail, synonyme de concrétisation de tous mes efforts fournis, à :

Mes très chers parents, pour l'amour et l'éducation qu'ils m'ont donné, pour tous leurs soutiens et encouragements et surtout pour leur confiance en moi, je vous souhaite une longue vie et une bonne santé .

Mes chères sœurs et leurs maris : Lynda et Faouzi, Karima et Mabrouk et Samira et Lahsen, qui ont toujours été là pour moi.

Mes chers frères Amirouche et Mouhande pour leurs énormes soutiens.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à ma très chère sœur Nouria et son mari Lyes qui m'ont beaucoup aidé et encourager à réaliser ce travail, je ne vous remercierai jamais assez.

Mes adorables petits anges : Amir, Safir, Ines, Soumia, Manouss, Thafsouth, Fifi, Zilouche, Thamazight, Amine, Taous, Mina, Tissou et Céline, qui procurent la joie et la bonne humeur pour toute la famille.

A tous mes amis, qui ont égayé et fait partie de ma vie, avec qui j'ai partagé des moments innoubliables.

Enfin à la personne qui ne cesse de m'encourager à aller de l'avant, qui croit en moi et en mes compétences, qui a toujours su m'aider à surmonter mes épreuves et qui m'inspire à être meilleure. Merci d'être mon meilleur ami, mon confident et mon inspiration.

Kenza

Table des Matières

Table des matières.....	iv
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des symboles	x
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : Transistors HEMTs à base de Nitrure de Gallium

I.1. Introduction.....	3
I.2. Transistor à effet de champ (TEC).....	3
I.3. Transistor HEMT	4
I.3.1. Principe de fonctionnement	5
I.3.2. Applications des transistors HEMT	6
I.3.3. Avantages des transistors HEMTs	6
I.4. Effets limitatifs du transistor HEMT	7
I.4.1. Effets thermiques	7
I.4.2. Effets de pièges	8
I.5. Nitrure de Gallium GaN.....	8
I.5.1. Généralités sur le GaN	8
I.5.2. Pourquoi le GaN ?.....	9
I.6. Transistor HEMT GaN	10
I.7. Substrats du transistor HEMT GaN	11
I.7.1. Carbure de silicium	11
I.7.2. Silicium.....	12
I.7.3. Diamant.....	12
I.8. Conclusion.....	13

CHAPITRE II : Modélisation des transistors HEMTs GaN

II.1. Introduction	14
II.2. Différents types de modélisation des HEMTs GaN	14
II.2.1. Modélisation physique.....	14
II.2.2. Modélisation empirique.....	15
II.3. Choix de modélisation	16
II.4. Etapes à suivre pour l'extraction du modèle électrique	16
II.4.1. Choix du schéma équivalent petit signal	16
II.4.2. Constitution du schéma équivalent petit signal	18
II.4.2.1. Eléments intrinsèques	18
II.4.2.2. Eléments extrinsèques	19
II.5. Méthodes d'extraction des paramètres du schéma équivalent petit signal.....	20
II.5.1. Détermination des éléments extrinsèques.....	21
II.5.1.1. Résistances extrinsèques	21
II.5.1.2. Inductances extrinsèques.....	23
II.5.1.3. Capacités extrinsèques.....	23
II.5.2. Détermination des éléments intrinsèques	25
II.5.2.1. Extraction de R_i , C_{gs} , G_{gsf}	26
II.5.2.2. Extraction de R_{gd} , C_{gd} , G_{gdf}	27
II.5.2.3. Extraction de G_m , τ	28
II.5.2.4. Extraction de C_{dsi} , G_{ds}	28
II.6. Validation des procédures d'extraction	29
II.7. conclusion.....	29

CHAPITRE III : Résultats et interprétations

III.1. Introduction.....	30
III.2.Extraction des éléments du schéma équivalent petit signal du transistor HEMT	30
III.2.1. Extraction des paramètres extrinsèques pour les différents substrats	30
III.2.1.1 Extraction des résistances extrinsèques.....	30
III.2.1.2 Extraction des inductances extrinsèques.....	31
III.2.1.3 Extraction des capacités extrinsèques	32
III.2.2.Extraction des paramètres intrinsèques	35
III.2.2.1 Extraction des capacités C_{gsi} et C_{gdi}	35
III.2.2.2 Extraction des résistances R_i et R_{gd}	35
III.2.2.3.Extraction de G_{ds} et τ	36
III.3.Résultat de simulation du transistor HEMT à base de GaN.....	37
III.4.Conclusion	39
Conclusion générale	40

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Schéma du transistor à effet de champ [4].....	3
Figure I. 2 : Transistor à Haute Mobilité électronique [6].....	5
Figure I. 3 : Principe de fonctionnement du transistor HEMT [8].....	6
Figure I. 4 : Structure du GaN [12].....	8
Figure I. 5: Performances du matériau GaN par rapport à ses propriétés[13].....	9
Figure I. 6: Architecture d'un transistor HEMT GaN /AlGaN [15].	11

Chapitre II

Figure II. 1 : Organigramme des étapes à suivre pour l'extraction du modèle petit signal et sa validation [22].....	17
Figure II. 2 : Circuit équivalent petit-signal du transistor HEMT GaN [23].	18
Figure II.3 : Coupe d'un transistor HEMT GaN et représentation des éléments localisés associés aux couches de matériaux [24].....	20
Figure II.4 : Circuit équivalent de pincement à froid à des fréquences plus élevées [35]....	21
Figure II.5 : Schéma équivalent à froid pincé aux basses fréquences.....	23
Figure II.6 : Schéma équivalent des paramètres intrinsèques du transistor HEMT AlGaN/GaN en branche d'admittances [34].....	26

Chapitre III

<p>Figure. III.1: Extraction des résistances extrinsèques dans la gamme de fréquence 0.1-40 GHz à $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V. (a) HEMT GaN/SiC, (b) HEMT GaN/D, (c) HEMT GaN/Si.....</p>	31
4	
<p>Figure. III.2 : Extraction des inductances extrinsèques dans la gamme de fréquence 0.1-40 GHz à $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V. (a) HEMT GaN/SiC, (b) HEMT GaN/D, (c) HEMT GaN/Si.....</p>	35
<p>Figure. III.3 : Extraction des capacités extrinsèques dans la gamme de fréquence 0.1-40 GHz à $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V. (a) HEMT GaN/SiC, (b) HEMT GaN/D, (c) HEMT GaN/Si.....</p>	33
<p>Figure III.4 Extraction des capacités intrinsèques $V_{ds} = 30$ V et $V_{gs} = -1$ V. (a) HEMT GaN/Si, (b) HEMT GaN/SiC.....</p>	35
<p>Figure III.5 : Extraction des résistances intrinsèques à $V_{ds} = 30$ V et $V_{gs} = -1$ V. (a) HEMT GaN/Si, (b) HEMT GaN/SiC.</p>	36
<p>Figure III.6 : Extraction de la conductance intrinsèque et le temps de retard et à $V_{ds} = 30$ V et $V_{gs} = -1$ V du transistor HEMT GaN/SiC. (a) Conductance, (b) temps de retard.</p>	36
<p>Figure III.7 : Circuit électrique équivalent petit-signal sous ADS.....</p>	40
<p>Figure III.8: Transistor S_2P sous ADS.</p>	38
<p>Figure III.9 : Comparaison entre les paramètres-S mesurés (o) et simulés (ligne) du transistor HEMT GaN/Si dans la gamme de fréquence 0.5 à 20 GHz. (a) saturation $V_{gs} = -1$ V et $V_{ds} = 25$ V, (b) à froid pincé $V_{gs} = -1$ V et $V_{ds} = 0$ V.</p>	38
<p>Figure III.10 Comparaison entre les paramètres-S mesurés (o) et simulés (ligne) du transistor HEMT GaN/SiC. (a) saturation $V_{gs} = -1$ V et $V_{ds} = 30$ V, (b) à froid pincé $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V.....</p>	39

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 : Comparaison entre le GaAs, Si, et GaN [13].....10

Chapitre III

Tableau III.1 : Valeurs des paramètres extrinsèques du HEMT GaN /SiC à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$ 34

Tableau III.2 : Valeurs des paramètres extrinsèques du HEMT GaN /D à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$34

Tableau III.3 : Valeurs des paramètres extrinsèques du HEMT GaN /Si à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$34

Tableau III.4 : Les valeurs extraites des éléments intrinsèques du circuit équivalent petit-signal du transistor HEMT GaN à $V_{ds} = 30$ V et $V_{gs} = -1$ V..... 37

Liste des symboles

2DEG « Two-dimensional electron gas ».

AlGaN « Aluminium gallium nitride ».

CAO « Conception Assistée par Ordinateur ».

CDTA « Centre de Développement des Technologies Avancées ».

FET « Field Effect Transistors ».

GaAs « Gallium Arséniure »

GaN « Gallium nitride ».

HEMT « High Electron Mobility Transistor ».

JFET « Junction FET ».

MOSFET « Métal Oxyde Semi-conductor FET ».

MESFET « Metal Semiconductor Field Effect Transistor ».

RF « Radio Fréquence ».

SiC « Le carbure de silicium ».

Si « Silicium ».

TEC « Transistor à effet de champs ».

VDS « Tension drain-source ».

VGS « tension grille-source ».

VTH « tension de seuil »

Introduction

générale

Introduction générale

Les communications sans fil et par satellite évoluent à un rythme très rapide et les réseaux cellulaires sont de plus en plus submergés par les nouvelles technologies développées pour fournir des services qui vont au-delà de la voix traditionnelle [1].

Les futures applications de communication mobile offriront de nouvelles techniques d'accéder aux informations et aux données à des vitesses extrêmement élevées par exemple 5G. Les nouveaux téléphones mobiles nécessitent une bande passante plus large avec une meilleure efficacité. Face à de tels développements, les amplificateurs de puissance sont considérés comme l'élément clé de la chaîne d'émission tout au long du réseau de communication, il est donc important d'investir dans l'amélioration des performances de ces derniers [1].

D'autre part, les concepteurs des amplificateurs de puissances et d'autres applications microélectroniques ont toujours besoin des modèles précis et fiables pour mener une conception précise et rigoureuse .

Les transistors sont considérés comme l'élément actif le plus important dans l'architecture des amplificateurs de puissance. Pour des applications fonctionnant à des fréquences d'ordre millimétriques, les transistors HEMT (High Electron Mobility Transistors) à base de GaN sont en plein développement et dominent actuellement l'essentiel des recherches [2].

La maîtrise des techniques de modélisation est essentielle pour avoir des modèles efficaces et bien précis. Pour cela, nous nous concentrerons sur la modélisation petit-signal (linéaire) des transistors GaN HEMT. Cela permet d'extraire les éléments du circuit électrique équivalent de ce transistor en mode linéaire [2].

La modélisation petit-signal est une étape importante dans la détermination des éléments parasites et indésirables qui affectent le comportement des modèles des transistors susmentionnés. Ces parasites doivent être déterminés avec précision et éliminés efficacement durant l'étape de modélisation pour éviter la propagation d'erreurs aux paramètres intrinsèques du transistor. Notre travail se fait sous cet aspect, c'est à dire la contribution à l'extraction des valeurs des éléments constituant le modèle électrique équivalent du transistor HEMT GaN [2]. Pour cela, nous avons organisé le présent mémoire selon les chapitres suivant;

Le premier chapitre décrit en bref les transistors HEMT GaN en précisant l'importance de cette technologie par rapport à l'arséniure de gallium GaAs, et ce, en décrivant les avantages et les limites de ces transistors dans le domaine radio fréquence.

Le deuxième chapitre sera dédié à l'exposition des différentes approches et techniques de modélisation et d'extraction des transistors GaN HEMT en mode RF, les avantages et les inconvénients de chaque technique, les étapes à suivre pour extraire les éléments d'un circuit électrique équivalent des transistors susmentionnés à partir du schéma équivalent choisi.

Finalement, le troisième chapitre sera dédié aux résultats obtenus par l'application des techniques d'extractions décrites dans les chapitres précédents avec l'interprétation. Des comparaisons entre les datas de mesures et les résultats de simulation du circuit équivalent seront effectuées afin d'évaluer objectivement l'approche proposée.

CHAPITRE I

Transistors HEMTs à base de Nitride de Gallium

I.1. Introduction

Les semi-conducteurs existent sous de nombreuses formes dans la vie quotidienne, à la fois dans les applications électroniques et microélectroniques. Parmi ces semi-conducteurs, le nitrure de gallium (GaN) qui est particulièrement performant pour des applications haute puissance à des fréquences très élevées comme les radars et les satellites.

L'objectif de ce premier chapitre est de faire comprendre la technologie HEMT à base de GaN qui a fait l'objet de nombreuses recherches et développements dans la communauté scientifique. Pour cela, nous commencerons par expliciter ce qu'est un transistor à effet de champ. Puis, nous allons définir le transistor HEMT ainsi que son principe de fonctionnement et ses effets limitatifs, par la suite, nous allons passer au nitrure de gallium en justifiant pourquoi notre choix s'est basé sur ce matériau. Enfin, nous nous focaliserons sur les transistors HEMTs à base de GaN en expliquant les performances et son principe de fonctionnement ainsi que les multiples substrats utilisés dans cette technologie.

I.2. Transistor à effet de champ (TEC)

Les TEC (Transistors à Effet de Champ) sont des dispositifs électroniques à 3 bornes utilisés pour contrôler le flux du courant en appliquant la tension aux bornes de la grille. Les trois bornes de ce composant (figure I .1 [4]) sont appelées drain, source et grille. Leur fonctionnement dépend du champ électrique généré par la tension de grille d'entrée (d'où le nom d'effet de champ électrique) [3-4].

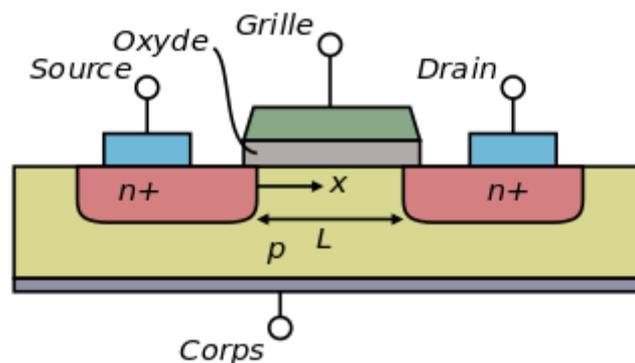


Figure I.1. Schéma du transistor à effet de champ [4].

Les trois électrodes du TEC sont définies comme suit :

- **La source (S) :** C'est le terminal par lequel les porteurs de charge majoritaires entre dans le TEC. Le courant qui entre dans le canal en S est représenté par I_S .
- **Le Drain (D):** où les porteurs de charge quittent le canal. Traditionnellement, le flux qui entre dans le canal avec D est indiqué par un I_D . La tension drain-source est V_{DS} .
- **La Grille (G):** La borne de grille est formée en diffusant un semi-conducteur de type n et de type p pour créer une région de jonction. L' I_D peut être contrôlé en appliquant une tension à G [5].

I.3. Transistor HEMT

Les HEMT (High Electron mobility Transistors) sont des transistors à effet de champ horizontaux mettant à profit les propriétés de haute mobilité électronique d'un gaz 2DEG créé à l'hétérojonction entre deux semiconducteurs de gaps différents. Les premiers transistors HEMTs sont apparus en 1980 [6].

Le HEMT basé sur l'hétérojonction AlGa_N/Ga_N, est apparu en 1994 grâce aux travaux de Khan et son équipe [6].

La figure I. 2 présente une vue schématique d'un composant HEMT. Il se compose de deux électrodes de contacts ohmiques, la source et le drain, et d'une électrode de contact Schottky, "la grille". Les principaux paramètres géométriques de ces transistors sont l'espacement grille-source L_{GS} , l'espacement grille-drain L_{GD} et la longueur de grille L_G .

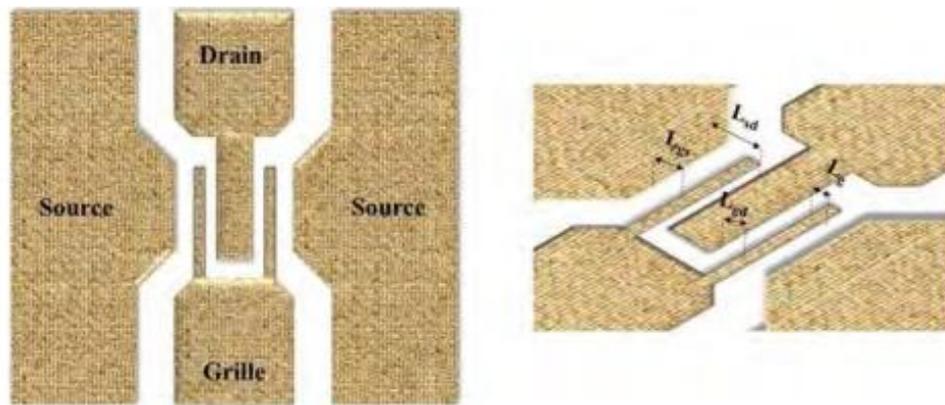


Figure I. 2. Transistor à Haute Mobilité électronique

I.3.1. Principe de fonctionnement

Un transistor HEMT est constitué de trois différents matériaux : Un substrat, un matériau à large bande interdite et un autre matériau à plus faible Gap. La jonction de ces deux derniers matériaux engendre la formation du gaz bidimensionnel d'électrons à l'interface (2DEG).

L'idée de base de ce dispositif est d'utiliser ce gaz bidimensionnel (2DEG) d'électrons circulant à travers un matériau dopé à faible concentration comme canal conducteur d'un transistor à effet de champ.

Les applications d'amplification de puissance utilisent une configuration de source mise à la terre. La grille permet de contrôler la densité de courant traversant le transistor en agissant électro-statiquement sur le gaz d'électrons directement au-dessus de celui-ci. Il s'agit d'une électrode de commande de faible puissance. Le drain permet de contrôler la tension de fonctionnement de l'appareil : c'est une électrode de commande de forte puissance [6-7].

Pour garantir un fonctionnement optimal du transistor pour des applications de puissance en hyperfréquences, il est nécessaire que le substrat, la couche donneuse et la couche tampon soient de bons isolants électriques, mais également de bons conducteurs thermiques. La qualité cristalline des différentes couches aura un impact important sur les performances et la fiabilité des composants [6-7].

La figure I. 3 récapitule la fonction de chaque élément constituant le transistor HEMT :

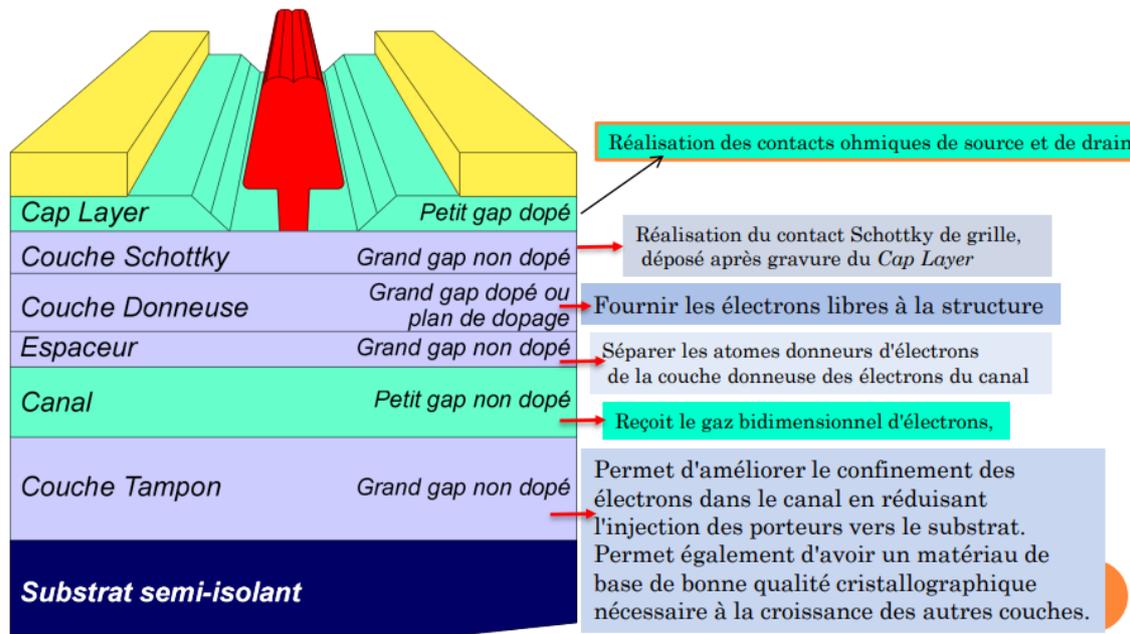


Figure I. 3. Le principe de fonctionnement du transistor HEMT [8].

I.3.2. Applications des transistors HEMTs

Les transistors HEMT peuvent être utilisés dans :

- Les amplificateurs à faible bruit
- Le télescope radio
- Les applications spatiales et militaires
- Les téléphones portables
- Les amplificateurs linéaires de classe A et AB

I.3.3. Avantages des transistors HEMTs

Les transistors HEMT sont caractérisés par :

- Faible bruit
- Bonnes performances en hautes fréquences
- Gain élevé
- Large bande passante
- Tension de claquage élevée
- Haute vitesse de dérive des électrons saturés
- Haute conductivité thermique

I.4. Effets limitatifs du transistor HEMT

Les transistors HEMT présentent quelques problèmes récurrents comme effets indésirables qu'on appelle effets « dispersifs basses-fréquence », ils se décomposent des effets thermiques et de piégeage.

I.4.1. Effets thermiques

Malgré les performances intéressantes des transistors HEMT, le fonctionnement de ce transistor produit un auto-échauffement, notamment pour les applications de puissance, cet effet entraîne [9] :

- de mauvaises propriétés de transport du matériau.
- de mauvaises performances de ce transistor.
- la destruction de ce composant.

L'effet de la température sur les caractéristiques des semi-conducteurs ne peut être ignoré. Les trois principaux paramètres affectés par la température sont :

- **La largeur de la bande interdite**

Lorsque la température augmente, le matériau se dilate et la longueur du maillage augmente. La largeur de la bande interdite est inversement proportionnelle à cela. C'est-à-dire qu'elle diminue à mesure que la température augmente. Par conséquent, lorsque la température augmente, la tension de claquage chute.

- **La mobilité**

Lorsque la température augmente, la mobilité des porteurs diminue en raison de la perturbation du réseau cristallin. Ce qui fait que le courant de drain diminue et la conductance mutuelle de sortie diminue également [9].

- **La conductivité thermique**

La conductivité thermique décroît avec l'augmentation de la température dans certains matériaux [9].

I.4.2. Effets de pièges

Les effets de pièges sont des effets parasites qui peuvent se produire avec les transistors HEMTs. Ils sont capables à la fois d'émettre des électrons et d'en capturer. Ces pièges sont dus à la présence d'impuretés dans les matériaux, des dislocations, des défauts dans les cristaux, des états de surface. Ces impuretés créent un état énergétique que les porteurs de charge dans la bande interdite des matériaux semi-conducteurs peuvent occuper. Ces porteurs de charge sont maintenus pendant un temps "t" à ces niveaux d'énergie et sont incapables de participer à la conduction. C'est pourquoi il a été nommé piège [10].

I.5. Nitrure de Gallium GaN

I.5.1. Généralités sur le GaN

Le Nitrure de Gallium GaN est un semi-conducteur à large bande interdite (3.4 eV) utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de grande puissance ou de haute fréquences, tel que : les panneaux solaires, les radars, les LEDs, les transistors...

C'est un composé binaire de Gallium (Ga) et d'Azote (N) qui détient une semi-conductivité intrinsèque. Il est largement employé aujourd'hui dans nos appareils électroniques tout comme le silicium.

Ce composant est le principal constructif des transistors GaN HEMT [11].

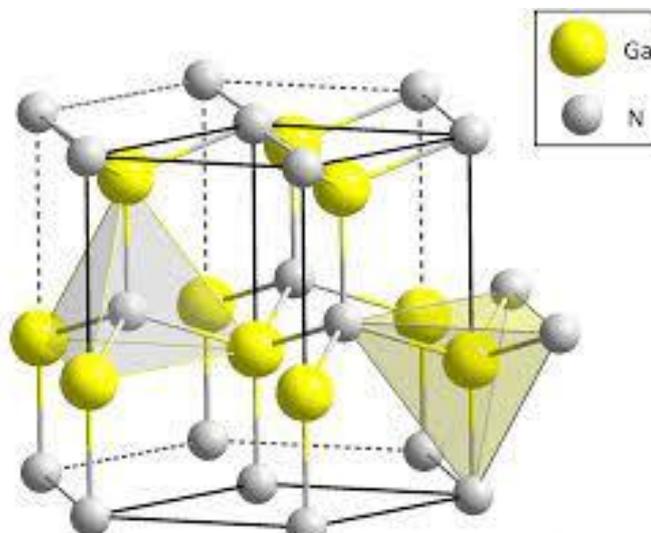


Figure I. 4. La structure du GaN [12].

I.5.2. Pourquoi le GaN ?

Le GaN a été choisi pour :

- Sa capacité de transmettre des taux élevés de tension car il s'agit d'un matériau semblable au cristal.
- Le courant électrique peut passer à travers des composants fabriqués en GaN plus rapidement qu'à travers ceux faits à partir de silicium, ce qui signifie un transfert d'énergie plus rapide.
- Son efficacité d'où la faible production de chaleur.
- L'avantage d'avoir une large bande interdite directe de 3.4 eV à 300K.
- Sa structure cristalline de type Wurtzite et son ionicité élevée présentent une variété de propriétés que l'on ne trouve pas (ou dans une moindre mesure) dans les semi-conducteurs conventionnels.
- Le facteur principal est l'effet de la polarisation spontanée et de la polarisation piézoélectrique, et certaines études expérimentales et théoriques ont montré son importance pour les performances des composants à base d'hétéro-structures de nitrure [13].

Ci-dessous un récapitulatif illustré dans la Figure I.5, qui donne la relation entre les propriétés du matériau GaN, et les performances relatives à chaque propriété.

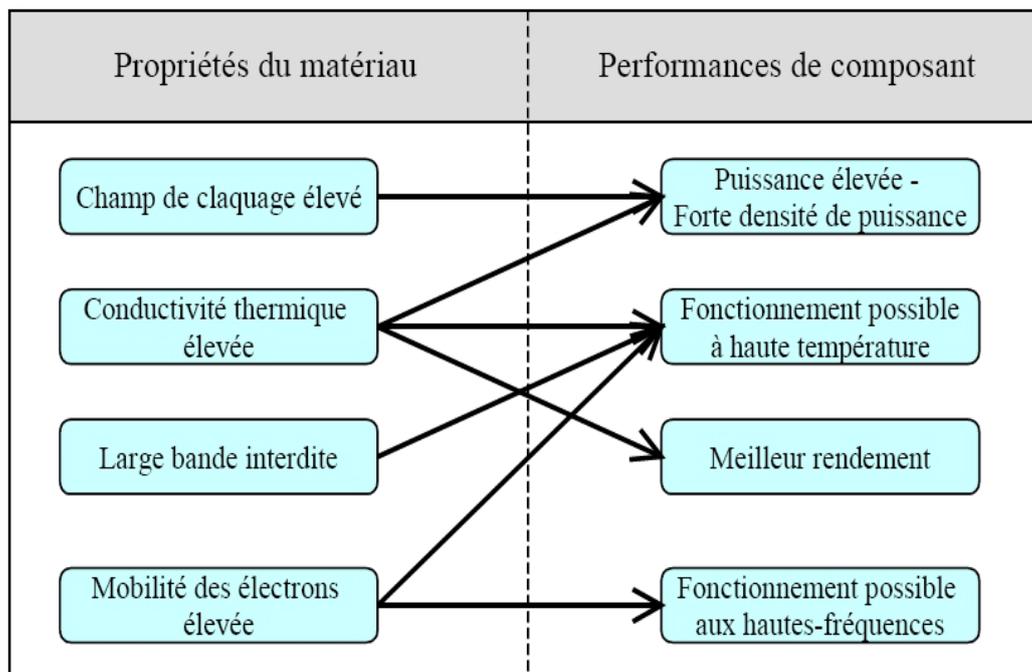


Figure I. 5. Performances du matériau GaN par rapport à ses propriétés [13].

Le tableau suivant résume les principales différences entre les trois semi-conducteurs suivants :

Tableau I. 1. Comparaison entre le GaAs, Si, et GaN [13].

Semi-conducteurs		Si	GaAs	GaN
Caractéristiques	unités			
Largeur de la bande Interdite	eV	1.1	1.43	3.39
Mobilité des électrons à 300K	$\text{cm}^2 \text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$	1350	6000	1500
Vitesse de saturation des électrons	10^7 cm/S	1	1	2.5
Champ de claquage	10^6 V/cm	0.3	0.4	3.3
Conductivité thermique	W. $\text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1.5	0.5	1.7
Densité de porteur intrinsèque	cm^{-3}	$1.5 \cdot 10^{10}$	$1.79 \cdot 10^6$	$1.9 \cdot 10^{10}$
Constance de diélectrique relative	ϵ_r	11.8	12.5	9
Température MAX	K	600	760	1930

I.6. Le transistor HEMT GaN

Les transistors au nitrure de gallium (GaN) offrent des avantages fondamentaux par rapport au silicium. En particulier, le champ électrique critique plus élevé le rend très attrayant pour les dispositifs à semi-conducteurs de puissance avec une résistance à l'état passant dynamique et des capacités très petites, ce qui rend les HEMT GaN parfaits pour les applications de commutation à grande vitesse.

Les transistors HEMTs au nitrure de gallium peuvent alors fonctionner avec des temps morts réduits, ce qui se traduit par une efficacité plus élevée et permet un refroidissement passif. Le fonctionnement à des fréquences de commutation élevées permet de réduire le volume des composants passifs, ce qui améliore la fiabilité et la densité de puissance globale des HEMT GaN [14].

Le GaN possède une mobilité électronique satisfaisante d'une couche à l'autre, ce qui favorise la montée en fréquence du transistor HEMT à base de GaN.

Les différentes couches de ce transistor sont présentées dans la figure I. 6 suivante :

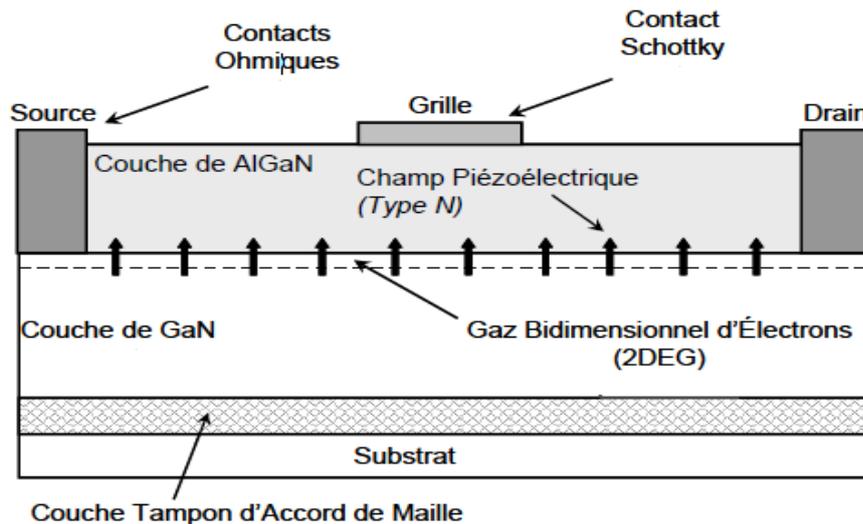


Figure I. 6. Architecture d'un transistor HEMT GaN /AlGaN [15].

I.7. Substrats du transistor HEMT GaN

Il existe plusieurs substrats différents pour les transistors HEMT GaN tel que : le saphir, quartz, titanate de baryum...Mais dans notre projet nous allons nous concentrer sur trois substrats qui sont : le carbure de silicium (SiC), le Silicium (Si) et le Diamant (D).

I.7.1. Carbure de silicium

Le carbure de silicium également connu sous le nom de Carborundum, est un semi-conducteur à base de silicium et de carbone de formule chimique SiC. Les propriétés électroniques et thermiques uniques du carbure de silicium (SiC) le rendent idéal pour les dispositifs semi-conducteurs à haute fréquence avancés avec des performances dépassant de loin celles des dispositifs à hydrure de silicium [16].

- **Caractéristiques de SiC**

Ci-dessous nous citons les différentes caractéristiques du substrat de carbure de silicium :

- Large bande interdite.
- Bonne conductivité et stabilité thermique.
- Mobilité des porteurs importante.
- Bonne résistance mécanique.

I.7.2 Silicium

Les substrats de silicium (Si) sont une plate-forme idéale pour étudier le comportement des cellules photovoltaïques sur des surfaces micro-fabriquées et des micro-dispositifs avec une large gamme de technologies de traitement du silicium développées pour la microélectronique. Cependant, en raison de la rigidité, de la fragilité et de la biocompatibilité relativement faibles des tissus artificiels à usage clinique, l'utilisation de silicium comme matériau de substrat est rarement envisagé [17].

- **Caractéristiques de Si**

Ci-dessous nous citons les différentes caractéristiques du substrat de silicium :

- Le silicium est un métalloïde dur, relativement inerte, très cassant sous forme cristalline et doté d'un éclat métallique prononcé.
- Il est présent dans la nature principalement sous forme d'oxydes et de silicates.
- Le silicium solide ne réagit pas avec l'oxygène, l'eau et la plupart des acides.
- Il réagit avec les halogènes ou les alcalins dilués.
- Il a également la propriété inhabituelle de se dilater (comme l'eau) lorsqu'il est congelé.

I.7.3. Diamant

C'est un matériau semi-conducteur à grand gap avec une bande interdite très large qui lui confère une très grande résistance à la destruction. Les diamants dopés au bore présentent une conduction quasi métallique car la mobilité des porteurs de charge est également très élevée. Par conséquent, un grand nombre d'appareils électroniques peut être supposé. En raison de la très forte conductivité thermique du diamant, le refroidissement de la fenêtre peut être effectué latéralement [18].

- **Caractéristiques de Diamant**

Ci-dessous nous citons les différentes caractéristiques du substrat diamant :

- Résistant à la radiation.
- Temps de réponse rapide.
- Réponse linéaire.
- Insensible au rayonnement solaire (Solar Blind detector).
- Pas de dopage nécessaire [18].

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu détailler en premier lieu les nombreuses caractéristiques des TECs et des HEMTs en particulier, ainsi que leurs principes de fonctionnement et leurs limitations.

Nous nous sommes basé sur la définition du matériau qui s'agit du Nitrure de Gallium tout en justifiant le choix de ce dernier pour notre étude. Après nous avons cité les principales caractéristiques des transistors HEMTs à base de GaN y compris leurs principes de fonctionnement, leurs structures et les substrats utilisés.

Ces transistors HEMTs à base de GaN sont des composants d'une importance considérable dans plusieurs domaines y compris le domaine des télécommunications, pour cela le prochain chapitre sera consacré pour détailler la modélisation de ces derniers.

Chapitre II

Modélisation des transistors HEMTs GaN

II.1. Introduction

Actuellement, les applications de communication sans fil occupent une place très importante et augmentent aux furs et à mesure. En commençant par les réseaux locaux sans fils (Wifi, bluetooth,..), les différentes générations de la radio cellulaire (GSM, GPS,.....) et les réseaux de future génération (internet des objets, 5G,..), et en allant vers les radars et les satellites. Pour cela, le fonctionnement à des fréquences très élevés devient de première importance.

Les transistors HEMT GaN deviennent un sujet de recherche brûlant dans la modélisation de dispositifs et remplace le transistor bipolaire pour les applications hautes fréquences et hautes puissances.

La phase de modélisation est une étape très importante dans la conception des amplificateurs de puissance et d'autres applications, car elle permet d'effectuer et de vérifier, prédire et mettre en évidence les phénomènes propres aux transistors sans avoir à passer par une conception matérielle coûteuse. Elle met ainsi à disposition des modèles précis tenant compte d'un maximum de paramètres et détails, constituant une aide appréciable pour les concepteurs [19].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents types de modélisations des transistors HEMTs. Puis, nous allons passer à la modélisation empiriques en particulier la modélisation analytique directe, et ce, par l'exposition des méthodes d'extraction direct en mode linéaire.

II.2. Différents types de modélisation des HEMTs GaN

Les types de modélisation des dispositifs peuvent être classés en deux approches principales, physiques et empiriques :

II.2.1. Modélisation physique

Dans cette approche de modélisation, les performances du dispositif peuvent être prédites à partir de données physiques telles que les propriétés de transport des porteurs, les caractéristiques des matériaux et la géométrie du dispositif [20].

Le principal avantage de cette approche est qu'elle décrit le fonctionnement du

dispositif en termes de physique, ce qui en fait plus utilisable pour le concepteur du dispositif qui a un certain contrôle sur le processus de fabrication de ce dernier [20].

Par contre l'inconvénient de cette approche est que les équations sont complexes et nécessitent des méthodes numériques pour obtenir des solutions qui prennent plus de temps et une mémoire plus importante. De plus, il est difficile d'obtenir des informations liées à la technologie, ce qui rend cette approche irréalisable dans de nombreux cas [20].

Le modèle basé sur la physique de l'AlGaIn/GaN HEMT est établi sur la théorie du contrôle de charge de potentiel de grille, qui est également la théorie de fonctionnement de base pour tout transistor à effet de champ [21].

II.2.2. Modélisation empirique

La modélisation empirique est une approche mesurable et observable car elle dépend des données mesurées et de la réponse observée due au signal de stimulation. Cette méthode propose des modèles de circuits électriques équivalents qui regroupent des éléments linéaires et non linéaires. Ensuite, ces éléments seront décrits par des expressions mathématiques relativement simples pour ne pas dégrader la convergence et le temps de calcul des simulateurs.

Cette approche propose également de réaliser des composants avant de les modéliser, et ce en raison des paramètres des expressions qui sont déterminés à partir des mesures électriques de ces mêmes composants.

Les principaux avantages de cette approche sont :

- l'efficacité de calcul
- le lissage automatique des données
- la simplicité et la capacité de simuler hors de la plage de mesures.

Les principaux inconvénients de cette approche sont :

- une précision limitée en raison de l'utilisation d'une expression simplifiée.
- la difficulté d'extraction des paramètres d'ajustement du modèle
- l'absence de signification physique des paramètres d'ajustement [21].

II.3. Choix de modélisation

La modélisation des transistors HEMT GaN en haute puissance et à des fréquences très élevés nécessite l'élaboration d'un cahier de charge spécial pour chaque modélisation autrement dit définition des besoins et le but de l'étude. D'abord l'opération commence par modéliser le transistor, puis le modèle sera implanté dans un logiciel de simulation pour être après utilisé par les concepteurs des circuits (amplificateur de puissance, mélangeur, oscillateurs,...).

Les modèles physiques sont parmi les modèles les plus précis, néanmoins ils sont complexes et exigent des ressources informatiques performantes.

Dans notre travail, nous avons choisi la modélisation empirique exactement la modélisation analytique directe basée sur des caractérisations des composants existants déjà. Cette modélisation est rapide, flexible et précise. Ces méthodes d'extraction seront appliquées sur des transistors HEMTs GaN.

II.4. Etapes à suivre pour l'extraction des paramètres du modèle électrique

Dans cette partie, nous allons exposer les étapes à suivre pour extraire tous les éléments d'un circuit équivalent petit-signal en appliquant une procédure d'extraction standard. La figure II.1 montre un organigramme sur les étapes d'extraction d'un modèle petit-signal du transistor HEMT GaN.

II.4.1. Choix du schéma équivalent petit signal

Le choix du schéma équivalent est une étape de première importance pour toute méthode d'extraction. Dans notre travail nous nous sommes basées sur un schéma équivalent petit signal hérité du transistor TEC en nitrure de gallium [22]. Les éléments électriques constituant ce schéma équivalent sont définis en éléments localisés. Le schéma équivalent petit signal du transistor HEMT GaN représenté en figure II.2 contient deux parties principales. La partie intrinsèque qui représente la zone active autrement dit le canal et la partie extrinsèque représente les éléments parasites existants entre les contacts métalliques et le canal.

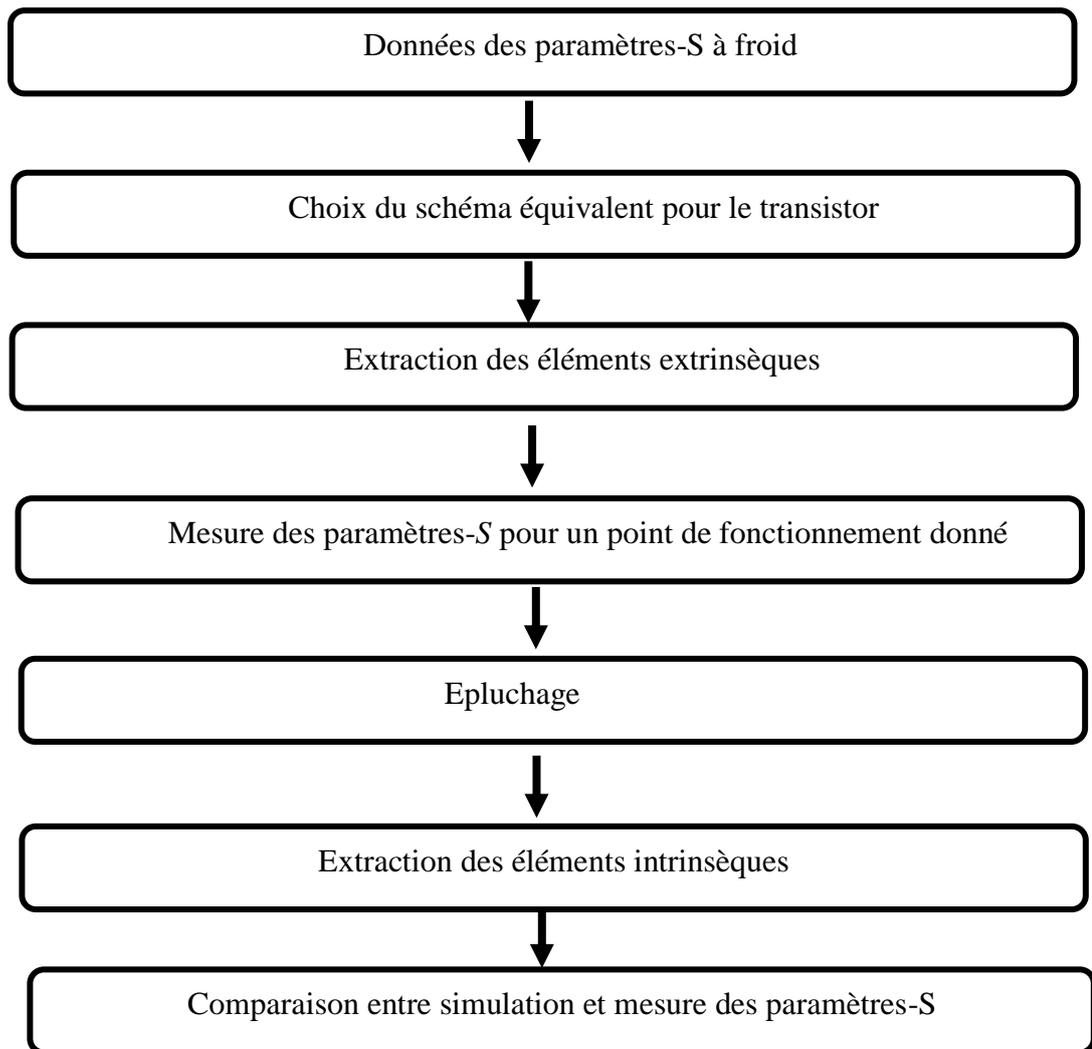


Figure II. 1. Organigramme des étapes à suivre pour l'extraction du modèle petit signal et sa validation [22].

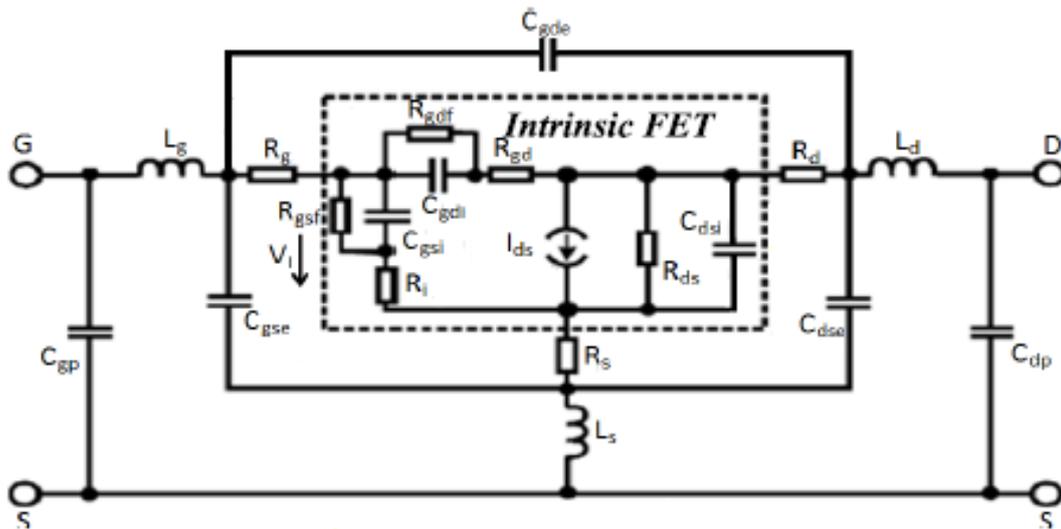


Figure II. 2. Circuit équivalent petit-signal du transistor HEMT GaN [23].

II.4.2. Constitution du schéma équivalent petit signal

Le schéma équivalent petit signal du transistor HEMT GaN présent dans la figure II. 2 est composé de deux parties selon le sens physique attribué à ses éléments, il s'agit des :

- **Éléments intrinsèques** (désigné par l'indice « i ») : Ce sont des éléments montrés à l'intérieur du carré en pointillé figure II. 2 . Ils représentent le transistor en lui-même et ils sont dépendants de la taille de la zone active et de la polarisation du transistor.
- **Éléments extrinsèques** : Ce sont des éléments parasites et qui ne sont pas dans le carré en pointillé de la figure II. 2. Ils représentent les paramètres d'accès au transistor et ils sont indépendants de la polarisation du transistor.

II.4.2.1. Éléments intrinsèques

Ce sont les éléments qui sont dans le carré en pointillé de la figure II.2 et qui décrivent les aspects actifs du transistor [24], tels que :

- Générateur de courant $I_{ds} = G_m V_{gs} e^{-j\omega \tau}$, qui est l'effet de base des transistors. Source de courant de commande de tension.
- l'effet des tensions respectives V_{gs} et V_{ds} engendre des accumulations des charges sous la grille qui crée un effet capacitif grille-source et drain-source et qui seront

représentés par : C_{gsi} et C_{dsi} . C_{gsi} représentera l'effet de couplage entre grille et source et C_{dsi} représentera l'effet de couplage entre drain et source.

- la transconductance G_m et la conductance de sortie G_{ds} (R_{ds} dans notre circuit) représentent respectivement l'effet de contrôle électrique du canal sous une tension appliquée à la grille, et l'effet résultant des électrons injectés dans ce canal.
- Les capacités grille-source C_{gsi} et grille-drain C_{gdi} sont des fluctuations de la charge stockée dans la zone vide sous la grille. C_{gdi} détermine cette variation qui est modulée par la tension grille-drain pour une tension grille-source constante.
- La résistance R_i est une résistance d'entrée qui peut être utilisée pour modéliser l'impédance d'entrée d'un transistor. Pour la résistance R_{gd} , elle est parfois ignorée. Ces deux résistances représentent les caractéristiques de dispersion du canal. R_{gd} et R_i sont les effets résistifs distribués sous la grille.
- τ est le retard qui s'associe à la transconductance G_m . C'est à dire que la diminution de G_m aux hautes fréquences est modélisée par une fonction exponentielle en termes de τ .
- les conductances de rétroaction sont représentées par G_{gsf} et G_{gdf} , respectivement (appelées aussi R_{gsf} et R_{gdf} comme présentées dans le schéma de la figure II.2).

II.4.2.2. Eléments extrinsèques

Ce sont des éléments parasites qui sont en dehors du carré en pointillé dans la figure II.2, [24]:

- Les résistances de drain R_d et de source R_s représentent l'effet de résistance dans les régions de contact ohmique et de carte entre la région active du canal et les électrodes externes de source ou de drain.
- La résistance de grille R_g représente la perte de signal de commande due à l'effet de dispersion le long de l'électrode de grille.

- Les capacités C_{gp} et C_{dp} sont des capacités induites par l'accès grille et drain à la carte.
- Les capacités de branche C_{gdo} , C_{dso} , et C_{gso} .
- L'effet inductif de la topologie métallique des contacts est exprimé en L_g , L_d et L_s .
- Les capacités parasites C_{gse} , C_{dse} , C_{gde} qui sont ajoutées pour décrire les effets inter-électrodes grille-source, drain-source et grille-drain respectivement.

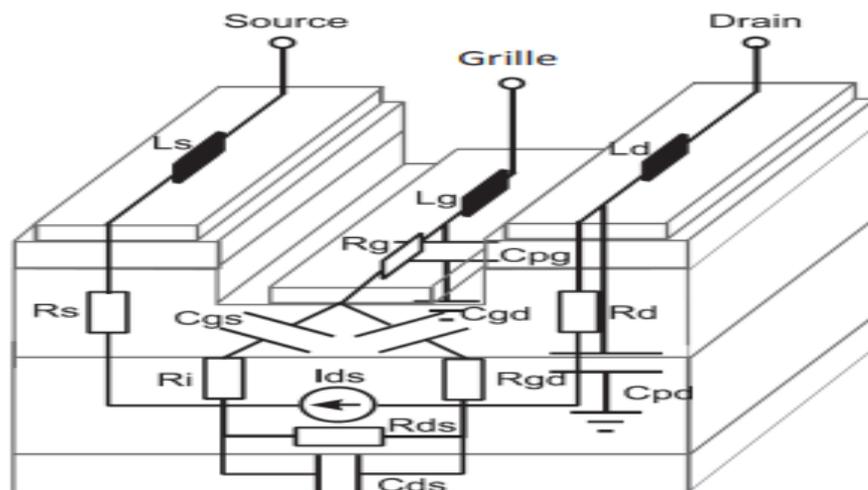


Figure II.3. Coupe d'un transistor HEMT GaN et représentation des éléments localisés associés aux couches de matériaux [24].

II.5. Méthodes d'extraction des paramètres du schéma équivalent petit signal :

Il existe de nombreuses méthodes dans la littérature qui traite l'extraction directe d'un modèle petit-signal du transistor HEMT GaN [25-28]. La méthode la plus utilisée est celle du Cold FET inventé par Diamant [28], appelée **Méthode de polarisation à froid des transistors TEC (Cold FET)**.

Cette technique utilise la polarisation à froid c'est-à-dire $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$. Elle permet de déterminer les paramètres extrinsèques à $V_{ds} = 0$ V. Le savant Gille Dambrine en 1988 a publié une méthode qui permet d'avoir les éléments parasites d'un TEC à ($V_{gs} > 0$ V et $V_{ds} = 0$ V). La méthode de Dambrine élimine l'effet de la résistance différentielle et la diode de schottky par l'application d'un courant fort à la grille.

La clé de cette méthode est la polarisation du transistor en question à froid pour pouvoir déterminer les éléments parasites. Par contre dans le cas d'un HEMT GaN la polarisation devient à froid pincé ($V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$) c'est à cette polarisation que la conductance du canal s'annule[29].

II.5.1. Détermination des éléments extrinsèques

La méthode que nous avons choisie consiste à déterminer les éléments série (R et L) puis parallèles (C) par l'application de polarisations spécifiques.

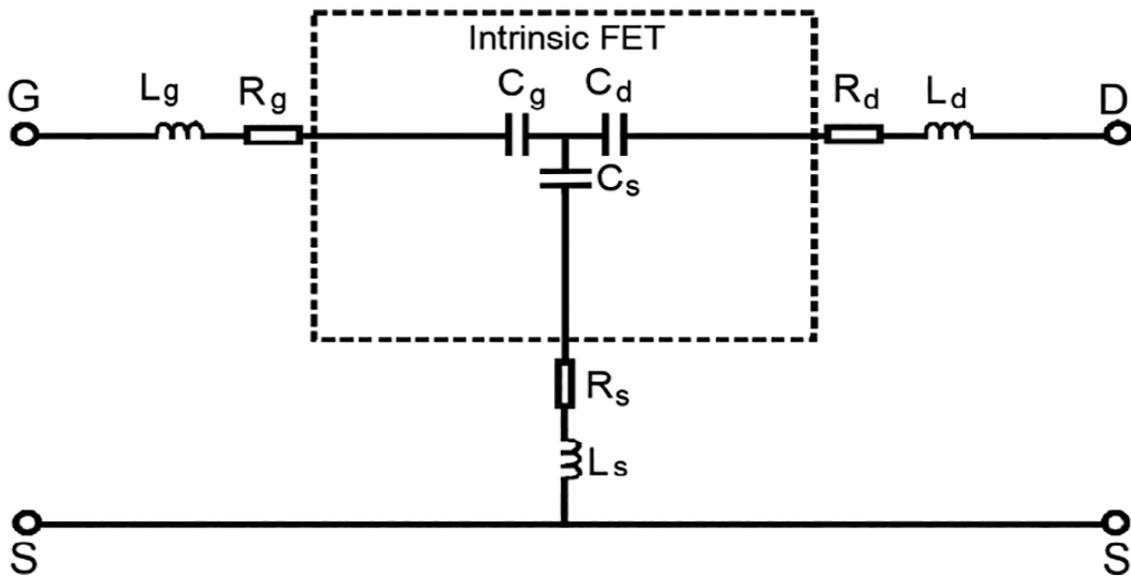


Figure II.4. Circuit équivalent de pincement à froid à des fréquences plus élevées [27].

II.5.1.1. Résistances extrinsèques

L'extraction des résistances extrinsèques se fait dans des conditions de polarisation particulières à froid pincé ($V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$) et en hautes fréquences. A partir du circuit de la **figure II. 4.** les parties réelles et imaginaires des impédances sont [27] :

$$Z_{11} = R_g + R_s + j\omega(L_g + L_s) + \frac{1}{j\omega(\frac{1}{C_g} + \frac{1}{C_s})} \quad (\text{II.1})$$

$$Z_{22} = R_d + R_s + j\omega(L_d + L_s) + \frac{1}{j\omega(\frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_s})} \quad (\text{II.2})$$

$$Z_{21} = Z_{12} = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega(\frac{1}{C_s})} \quad (\text{II.3})$$

Après avoir multiplié la partie réelle des impédances susmentionnées par ω^2 , on obtient :

$$\omega^2 * \text{Re}(Z_{11}) = \omega^2(R_g + R_s) \quad (\text{II.4})$$

$$\omega^2 * \text{Re}(Z_{22}) = \omega^2(R_d + R_s) \quad (\text{II.5})$$

$$\omega^2 * \text{Re}(Z_{12}) = \omega^2 * \text{Re}(Z_{21}) = \omega^2 R_s \quad (\text{II.6})$$

Les résistances extrinsèques sont obtenues en utilisant le tracé des courbes suivantes :

Ces courbes étant des lignes droites. Selon l'équation (II.6), la pente de la courbe $\text{Re}[\omega^2(Z_{12})]$ en fonction de ω^2 permet de déterminer la résistance R_s . De même pour R_g et R_d en utilisant les équations (II.4) et (II.5) respectivement

II.5.1.2. Inductances extrinsèques

Nous allons suivre une procédure identique à celle suivie pour extraire les résistances, pour enfin aboutir aux expressions suivantes [27].

$$\omega * \text{Im}(Z_{11}) = \omega^2(L_g + L_s) - \left(\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_g}\right) \quad (\text{II.7})$$

$$\omega * \text{Im}(Z_{22}) = \omega^2(L_d + L_s) - \left(\frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_d}\right) \quad (\text{II.8})$$

$$\omega * \text{Im}(Z_{21}) = \omega * \text{Im}(Z_{12}) = \omega^2 L_s - \frac{1}{C_s} \quad (\text{II.9})$$

Les valeurs des inductances L_g , L_d et L_s peuvent être extraites à partir de la pente des courbes de $\omega * \text{Im}(Z_{ij})$ en fonction de ω^2 .

A partir de l'équation (II.9), nous pouvons obtenir la valeur de l'inductance L_s . De la même manière pour L_g et L_d en utilisant les équations (II.7) et (II.8), respectivement.

II.5.1.3. Capacités extrinsèques

Les valeurs des capacités extrinsèques du transistor GaN HEMT sont déterminées à partir de la partie imaginaire des paramètres admittances-Y [23]. Il est bien connu que les capacités parasites sont déterminées à froid pincé ($V_{ds} = 0$ et $V_{gs} < V_{th}$) et aux basses fréquences (< 5 GHz). Dans ces conditions, le schéma équivalent peut être réduit à celui de la figure II.5.

Dans la gamme des basses fréquences les résistances n'influent pas sur la partie imaginaires des paramètres-Y et les inductances peuvent être négligées.

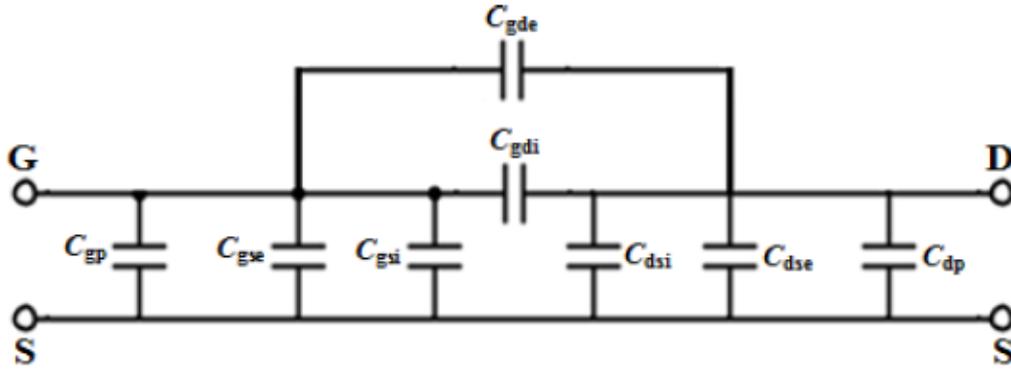


Figure II.5. Schéma équivalent à froid pincé aux basses fréquences [23].

La partie imaginaire des paramètres -Y peut être exprimée comme suit [23] :

$$\text{Im}(Y_{11}) = j\omega(C_{gso} + C_{gdo}) \quad (\text{II.10})$$

$$\text{Im}(Y_{22}) = j\omega(C_{dso} + C_{gdo}) \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Im}(Y_{21}) = \text{Im}(Y_{12}) = j\omega C_{gdo} \quad (\text{II.12})$$

Avec

$$C_{gdo} = C_{gde} + C_{gdi} \quad (\text{II.13})$$

$$C_{gso} = C_{gp} + C_{gse} + C_{gsi} \quad (\text{II.14})$$

$$C_{dso} = C_{dp} + C_{dse} + C_{dsi} \quad (\text{II.15})$$

Les capacités C_{gdo} , C_{gso} , C_{dso} représentent les capacités de branches grille-source, grille-drain et drain-source respectivement, leur détermination est décrite par les étapes suivantes :

A partir de l'équation (II.12) nous pouvons déterminer C_{gdo} . Une fois la valeur de C_{gdo} est connue nous allons utiliser les équations (II.10) et (II.11) pour déterminer les valeurs des capacités C_{gso} et C_{dso} respectivement.

$$C_{gdo} = -\frac{\text{Im}(Y_{21})}{\omega} = -\frac{\text{Im}(Y_{12})}{\omega} \quad (\text{II.16})$$

Pour faciliter la détermination des valeurs des autres capacités, nous avons combiné les capacités extrinsèques et intrinsèques sous forme d'une simple capacité comme suit :

$$C_{gd} = C_{gde} + C_{gdi} \quad (\text{II.17})$$

$$C_{gs} = C_{gse} + C_{gsi} \quad (\text{II.18})$$

$$C_{ds} = C_{dse} + C_{dsi} \quad (\text{II.19})$$

Ou les équations (II-13), (II-14) et (II-15) deviennent respectivement [23] :

$$C_{gdo} = C_{gd} \quad (\text{II.20})$$

$$C_{gso} = C_{gp} + C_{gs} \quad (\text{II.21})$$

$$C_{dso} = C_{dp} + C_{ds} \quad (\text{II.22})$$

Une fois les valeurs des capacités de branches sont connues, il est possible de déterminer les valeurs de C_{gp} , C_{dp} , C_{gs} , C_{gd} et C_{ds} . C_{gp} peut être supposée égale à C_{dp} et les valeurs de C_{gp} et C_{dp} ne doivent pas dépasser $\{0,5 * C_{dso}\}$ [23].

$$C_{dp} = C_{gp} \quad (\text{II.23})$$

A partir de des équations (II.21) et (II.22), nous obtenons

$$C_{gp} = C_{gso} - C_{gs} \quad (\text{II.24})$$

$$C_{dp} = C_{dso} - C_{ds} \quad (\text{II.25})$$

A partir des équations (II.24) et (II.25) nous pouvons tracer [C_{gp} versus $(C_{gso} - C_{gs})$] et [C_{dp} versus $(C_{dso} - C_{ds})$] dans le même graphe. Le point d'intersection de ces deux courbes projetées à l'axe des abscisses nous donne la valeur de C_{gp} ou C_{dp} . Une fois que les valeurs de C_{dp} et C_{gp} sont connues, il sera facile de déduire les valeurs de C_{gd} , C_{gs} et C_{ds} en utilisant les équations (II.20)–(II.22), respectivement [23].

Les capacités qui restent à déterminer sont C_{gse} , C_{gsi} , C_{gde} , C_{gdi} , C_{dse} et C_{dsi} . Comme la structure GaN HEMT est symétrique dans des conditions de polarisation à froid pincé, nous pouvons énoncer :

$$C_{gsi} = C_{gdi} \quad (II.26)$$

Selon (II.17) et (II.18), les valeurs des deux capacités C_{gdi} et C_{gsi} ne peuvent pas dépasser la valeur totale de C_{gd} et C_{gs} , respectivement. Donc les deux équations (II.13) à (II.14) nous donnent :

$$C_{gdi} = C_{gdo} - C_{gde} \quad (II.27)$$

$$C_{gsi} = C_{gso} - C_{gp} - C_{gse} \quad (II.28)$$

De la même manière, (II.24) et (II.25) peuvent être utilisées dans (II.27) et (II.28) pour déterminer C_{gsi} et C_{gdi} . Le point d'intersection des deux courbes [C_{gdi} versus $(C_{gdo} - C_{gde})$] et [C_{gsi} versus $(C_{gso} - C_{gse} - C_{gp})$] projeté en axe des abscisses donne la valeur d'une des capacités C_{gdi} ou C_{gsi} .

La valeur de C_{dse} peut alors être déduite de l'hypothèse utilisée dans la référence [23].

$$C_{dse} = 3C_{dp} \quad (II.29)$$

La valeur de C_{dsi} est ensuite calculée à partir de l'équation (II.15)

$$C_{dsi} = C_{dso} - C_{dp} - C_{dse} \quad (II.30)$$

II.5.2. Détermination des éléments intrinsèques

Après extraction des résistances, inductances et capacités extrinsèques, le circuit équivalent des éléments intrinsèques peut être représenté sous forme de branches d'admittance comme le montre la figure II.6 suivante :

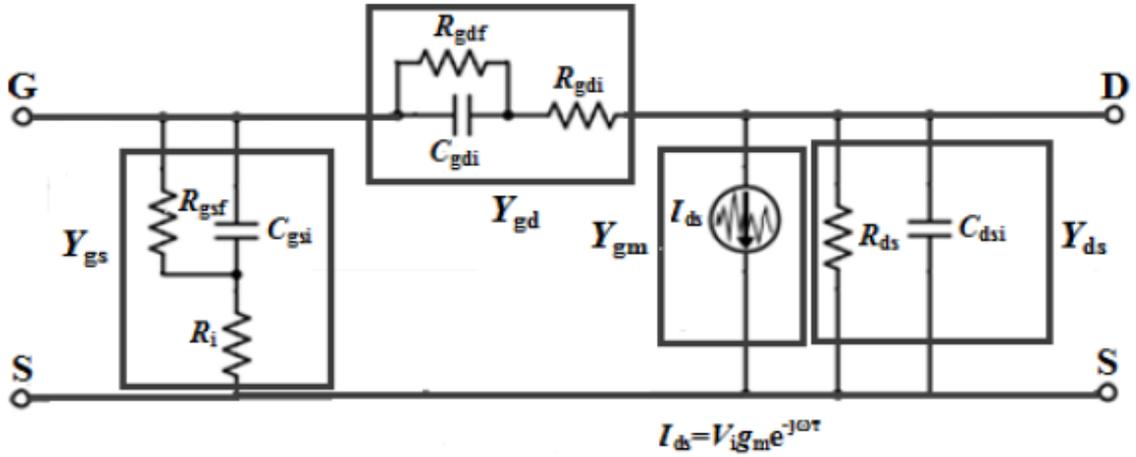


Figure II.6. Schéma équivalent des paramètres intrinsèques du transistor HEMT AlGaN/GaN en branche d'admittances [22].

II.5.2.1. Extraction de R_i , C_{gsi} , G_{gsf}

A partir de la figure II.6, L'admittance Y_{gs} pour la branche grille-source intrinsèque est donnée par l'expression suivante : [30]

$$Y_{gs} = Y_{i,11} + Y_{i,12} = \frac{G_{gsf} + j\omega C_{gsi}}{1 + R_i G_{gsf} + j\omega R_i C_{gsi}} \quad (\text{II.21})$$

- **Extraction de C_{gsi}**

A partir de l'équation (II.21), nous allons définir une nouvelle variable sous le nom de D [30], tel que :

$$D = \frac{|Y_{gs}|^2}{\text{Im}[Y_{gs}]} \quad (\text{II.22})$$

En séparant la partie réelle et imaginaire de Y_{gs} nous aboutirons à:

$$D = \frac{[G_{gsf}(1 + R_i G_{gsf}) + (\omega C_{gsi})^2 R_i^2] + (\omega C_{gsi})^2}{\omega C_{gsi} (1 + R_i G_{gsf})^2 + (\omega R_i G_{gsi})^2} \quad (\text{II.23})$$

Avec les approximations ($R_i G_{gsf} \ll 1$) et ($(\omega R_i G_{gsi})^2 \ll 1$) nous aurons :

$$D = \frac{|Y_{gs}|^2}{\text{Im}[Y_{gs}]} = \frac{G_{gsf}^2}{\omega C_{gsi}} + \omega C_{gsi} \quad (\text{II.24})$$

C_{gs} peut être déterminée à partir de la pente de la courbe de ωD en fonction de ω^2 [30].

- **Extraction de R_i**

$$\text{En redéfinissant : } D = \omega \frac{Y_{gs}}{\text{Im}[Y_{gs}]} = \frac{G_{gsf}(1+R_i \times G_{gsf})}{\omega C_{gsi}} + \omega R_i C_{gsi} \quad (\text{II.25})$$

Par remplacement directe sans approximation de la partie réelle et imaginaire de Y_{gs} dans l'équation (II.25), R_i peut être déterminée à partir de la pente de la courbe de ωD en fonction de $\omega^2 C_{gsi}$. [30]

- **Extraction de G_{gsf}**

$$\text{Re}(Y_{gs}) = \frac{G_{gsf}(1+R_i G_{gsf}) + \omega^2 C_{gsi} R_i}{(1+R_i G_{gsf})^2 + \omega^2 C_{gsi} R_i^2} \quad (\text{II.26})$$

Selon l'équation (II.26), G_{gsf} est obtenue à partir de la partie réelle de Y_{gs} en basse fréquence ou les éléments qui varient avec cette fréquence deviennent négligeables. [30]

II.5.2.2. Extraction de R_{gd} , C_{gd} , G_{gdf}

L'admittance Y_{gd} pour la branche grille-drain intrinsèque est donnée par l'expression suivante : [30]

$$Y_{gd} = -Y_{i,12} = \frac{G_{gdf} + j\omega C_{gdi}}{1 + R_{gd}G_{gdf} + j\omega R_{gd}C_{gdi}} \quad (\text{II.27})$$

- **Extraction de C_{gd}**

Avec les approximations ($R_{gd}G_{gdf} \ll 1$) et $((\omega R_{gd}C_{gdi})^2 \ll 1)$ nous aurons :

$$D = \frac{|Y_{gd}|^2}{\text{Im}[Y_{gd}]} = \frac{G_{gdf}^2}{\omega C_{gdi}} + \omega C_{gdi} \quad (\text{II.28})$$

C_{gd} peut être déterminée à partir de la pente de la courbe de ωD en fonction de ω^2 . [30]

- **Extraction de R_{gd}**

$$\text{En redéfinissant : } D = \omega \frac{Y_{gd}}{\text{Im}[Y_{gd}]} = \frac{G_{gdf}(1+R_{gd} \times G_{gdf})}{\omega C_{gdi}} + \omega R_{gd} C_{gdi} \quad (\text{II.29})$$

R_{gd} peut être déterminée par la même manière dont R_i a été déterminée, c'est à dire que R_{gd} aussi sera la pente. [30]

- **Extraction de G_{gdf}**

$$\text{Re}(Y_{gd}) = \frac{G_{gdf}(1+R_{gd}G_{gdf})+\omega^2C_{gdi}R_{gd}}{(1+R_{gd}G_{gdf})^2+\omega^2C_{gdi}R_{gd}^2} \quad (\text{II.30})$$

Selon l'équation (II.30), G_{gdf} est déterminé de la même manière que G_{gsf} . [30]

II.5.2.3. Extraction de G_m , τ

L'admittance Y_{gm} de la branche de transconductance intrinsèque est donnée par l'expression suivante [30]:

$$Y_{gm} = Y_{i,21} - Y_{i,12} = \frac{G_m e^{-j\omega\tau}}{1+R_i G_{gsf} + j\omega C_{gsi}} \quad (\text{II.31})$$

- **Extraction de G_m**

En combinant les deux équations (II.21) et (II.29) nous obtiendrons :

$$D = \frac{|Y_{gs}|^2}{|Y_{gm}|^2} = \left(\frac{G_{gsf}}{G_m}\right)^2 + \left(\frac{C_{gs}}{G_m}\right)^2 \omega^2 C_{gsi}^2 \quad (\text{II.32})$$

$$\text{Phase} \left\{ j\omega C_{gsi} \frac{Y_{gs}}{Y_{gm}} \right\} = -\omega\tau \quad (\text{II.33})$$

G_m peut être déterminé à partir de l'approximation linéaire de l'équation (II.32) en fonction de $(\omega^2 C_{gsi})$. [30]

- **Extraction de τ**

τ est la valeur de la pente de l'équation (II.33) en fonction de ω .

2.5.2.4.Extraction de C_{dsi} , G_{ds}

$$Y_{ds} = Y_{i,22} + Y_{i,12} = G_{ds} + j\omega C_{dsi} \quad (\text{II.34})$$

- **extraction de C_{ds}**

C_{ds} peut être extraite du tracé de la partie imaginaire de Y_{ds} en fonction de ω .

- **extraction de G_{ds}**

G_{ds} est déterminé à partir de la partie réelle de Y_{ds} .

II.6. Validation des procédures d'extraction

Après avoir effectué les différentes étapes de modélisation, il est évident de passer à l'étape incontournable qui est l'étape de validation des procédures d'extraction.

Il existe de multiples méthodes pour vérifier la validité des méthodes d'extraction des éléments du circuit équivalent, dans notre travail nous avons opté pour la méthode de comparaison entre les résultats de mesures et les résultats de simulation, ce que nous allons voir dans le dernier chapitre.

Pour une meilleure comparaison il est important d'utiliser un abaque de Smith, qui donnera une information mixte sur le module et la phase. Outre, pour valider un modèle en hyper fréquence il faut effectuer la comparaison aux différents points de polarisation et pas uniquement à un seul point [22].

II.7. Conclusion

Ce second chapitre a été consacré à l'aspect théorique de la modélisation des transistors HEMTs à base de GaN dans le but de déterminer et d'extraire les éléments constituant le schéma électrique équivalent petit signal.

Il existe plusieurs types de modélisations, nous avons opté pour la modélisation empirique et plus particulièrement les méthodes analytiques directes. Nous avons choisi une méthode précise qui permet l'extraction de tous les éléments (extrinsèques et intrinsèques) d'une façon directe. Cela est réalisé à l'aide des paramètres S mesurés transformés par la suite en paramètres impédance (Z) ou en paramètres admittances (Y).[31]

Dans cette méthode les éléments intrinsèques ne peuvent être extraits qu'après extraction des éléments extrinsèques.

Les valeurs des éléments du schéma électrique équivalent petit signal obtenues à l'aide de cette méthode seront présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Après avoir effectué le choix du circuit équivalent petit signal du transistor HEMT GaN, nous avons ensuite détaillé sur la méthode d'extraction de ces éléments, nous allons maintenant, dans ce présent chapitre, tester pour enfin valider nos résultats issus de cette méthode d'extraction tout en utilisant différents substrats tel que le carbure de silicium, le diamant et le silicium.

Pour vérifier la fiabilité de la procédure d'extraction. Les paramètres-S mesurés évoluent dans la gamme de fréquence allant de 0.1 GHz jusqu'à 40 GHz. La technique d'extraction est implémentée sous forme d'un programme Matlab. Ensuite, les valeurs extraites du schéma équivalent seront implémentées sous forme d'un circuit électrique dans un autre logiciel de simulation ADS (Advanced Design System). Enfin pour valider nous allons comparer entre les paramètres-S mesurés et les paramètres-S simulés issus du circuit électrique équivalent en utilisant le logiciel de simulation susmentionné.

Le logiciel de simulation ADS permet de simuler tout systèmes RF et microondes, du composant électronique au système complet de télécommunication, et ainsi de concevoir et tester des modèles de transmission radio très proches de la réalité grâce à une importante bibliothèque d'éléments.

III.2. Extraction des éléments du schéma équivalent petit-signal du transistor HEMT

III.2.1. Extraction des paramètres extrinsèques pour les différents substrats

III.2.1.1. Extraction des résistances extrinsèques

Pour extraire les résistances extrinsèques nous avons utilisé le schéma équivalent de pincement à froid à des fréquences plus élevées illustré dans la figure II.4 dans le chapitre II. La figure III.1 illustre les courbes des résistances R_g , R_d et R_s extraites à partir de la pente de la courbe $\omega^2 \cdot \text{Re}(Z_{ij})$ en fonction de ω^2 à l'aide des équations (II.4), (II.5) et (II.6) du chapitre II, respectivement.

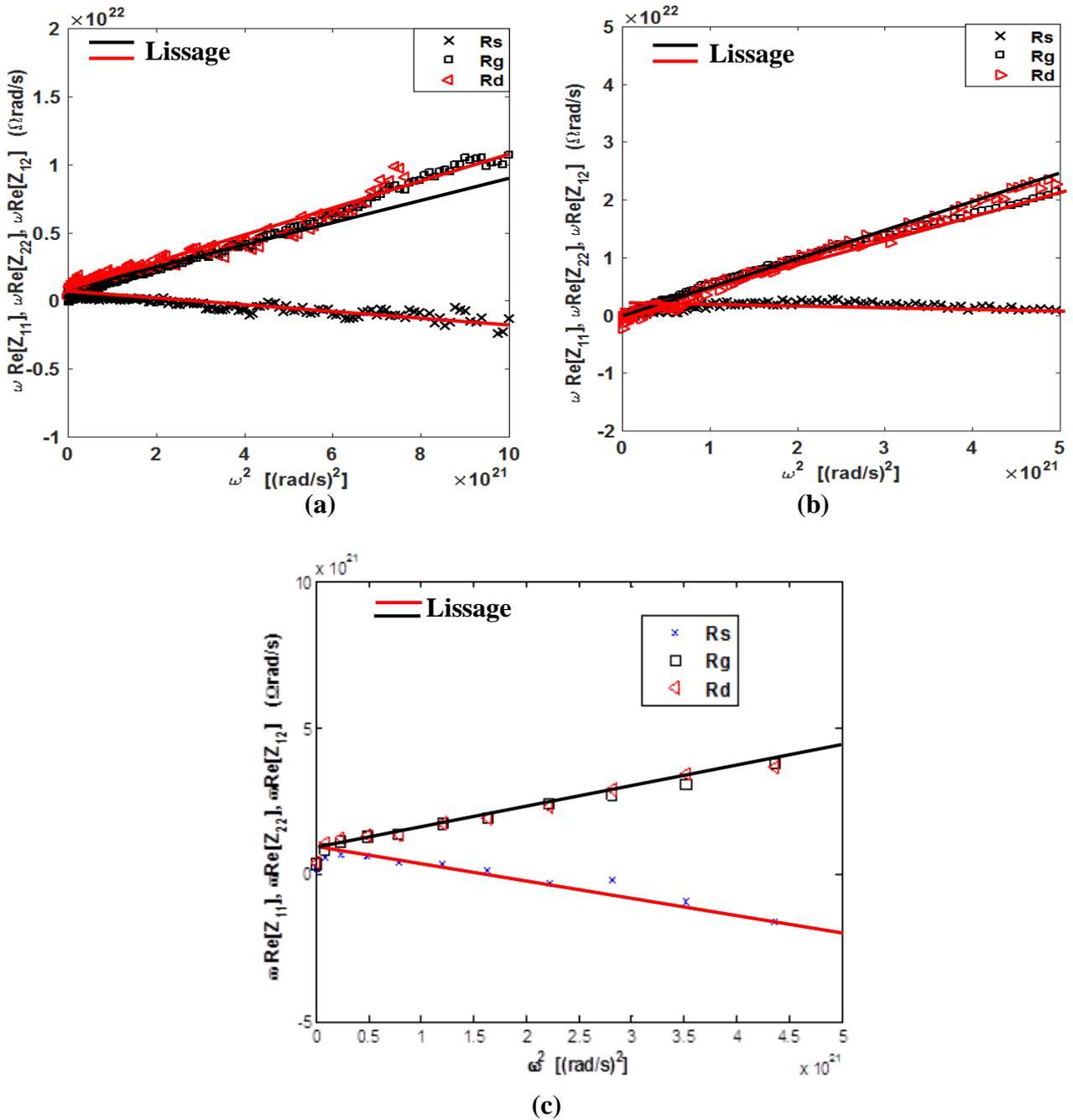


Figure. III.1 Extraction des résistances extrinsèques dans la gamme de fréquence 0.1-40 GHz à $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V. (a) HEMT GaN/SiC, (b) HEMT GaN/D, (c) HEMT GaN/Si

III.2.1.2. Extraction des inductances extrinsèques

Les inductances extrinsèques représentent la partie imaginaire des paramètres impédances-Z. la pente des courbes $\omega \text{Im}(Z_{ij})$ en fonction de ω^2 des équations (II.7), (II.8) et (II.9) du chapitre II permet de nous donner les valeurs des inductances L_g , L_d et L_s représentées en Figure III.2.

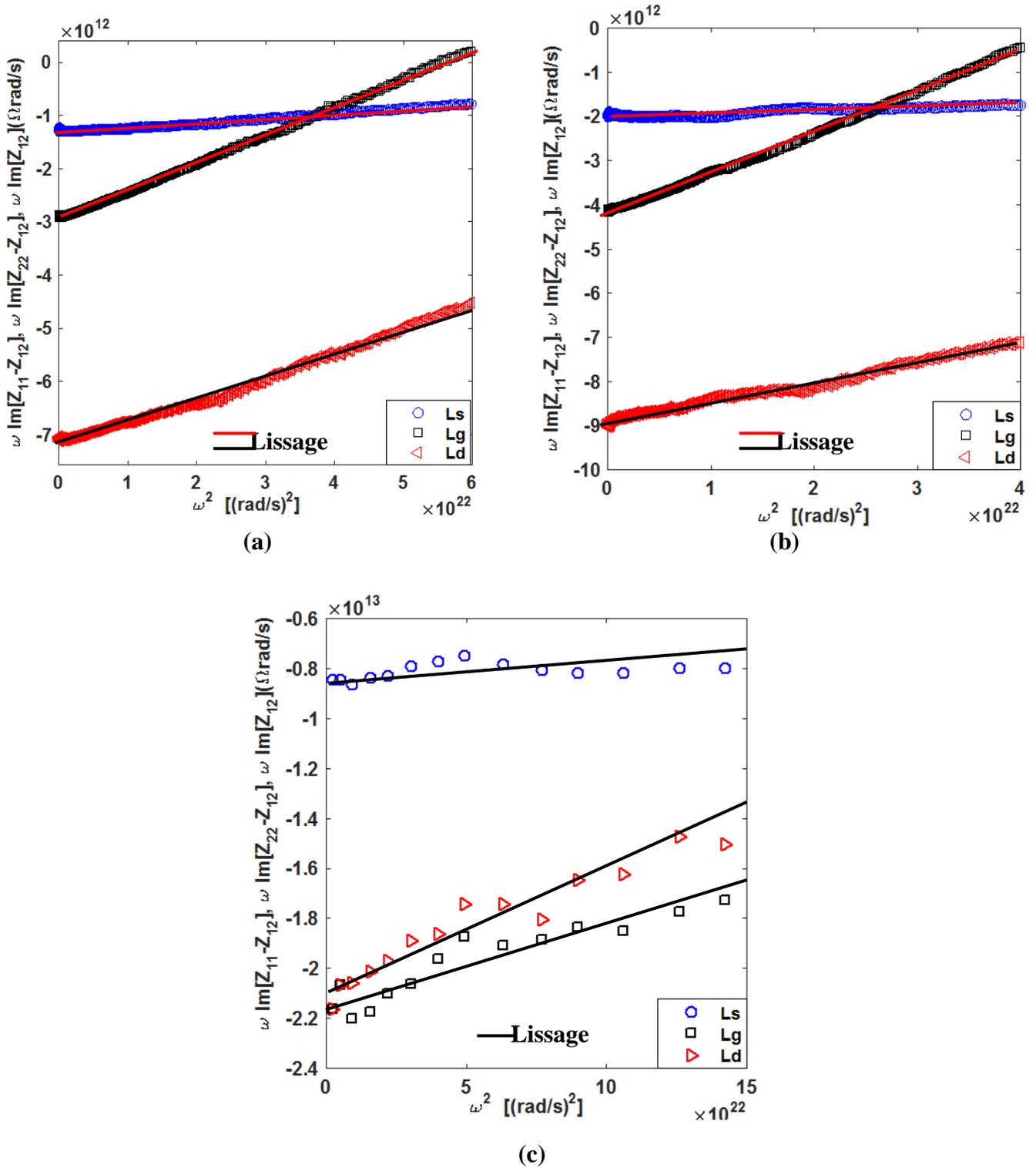


Figure. III.2 Extraction des inductances extrinsèques dans la gamme de fréquence 0.1-40 GHz à $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V. (a) HEMT GaN/SiC, (b) HEMT GaN/D, (c) HEMT GaN/Si

III.2.1.3. Extraction des capacités extrinsèques

La figure III.3 représente les capacités extrinsèques en fonction de la fréquence, tracées à partir de la partie imaginaire des paramètres-Y mesurés utilisant les équations II-10, II-11

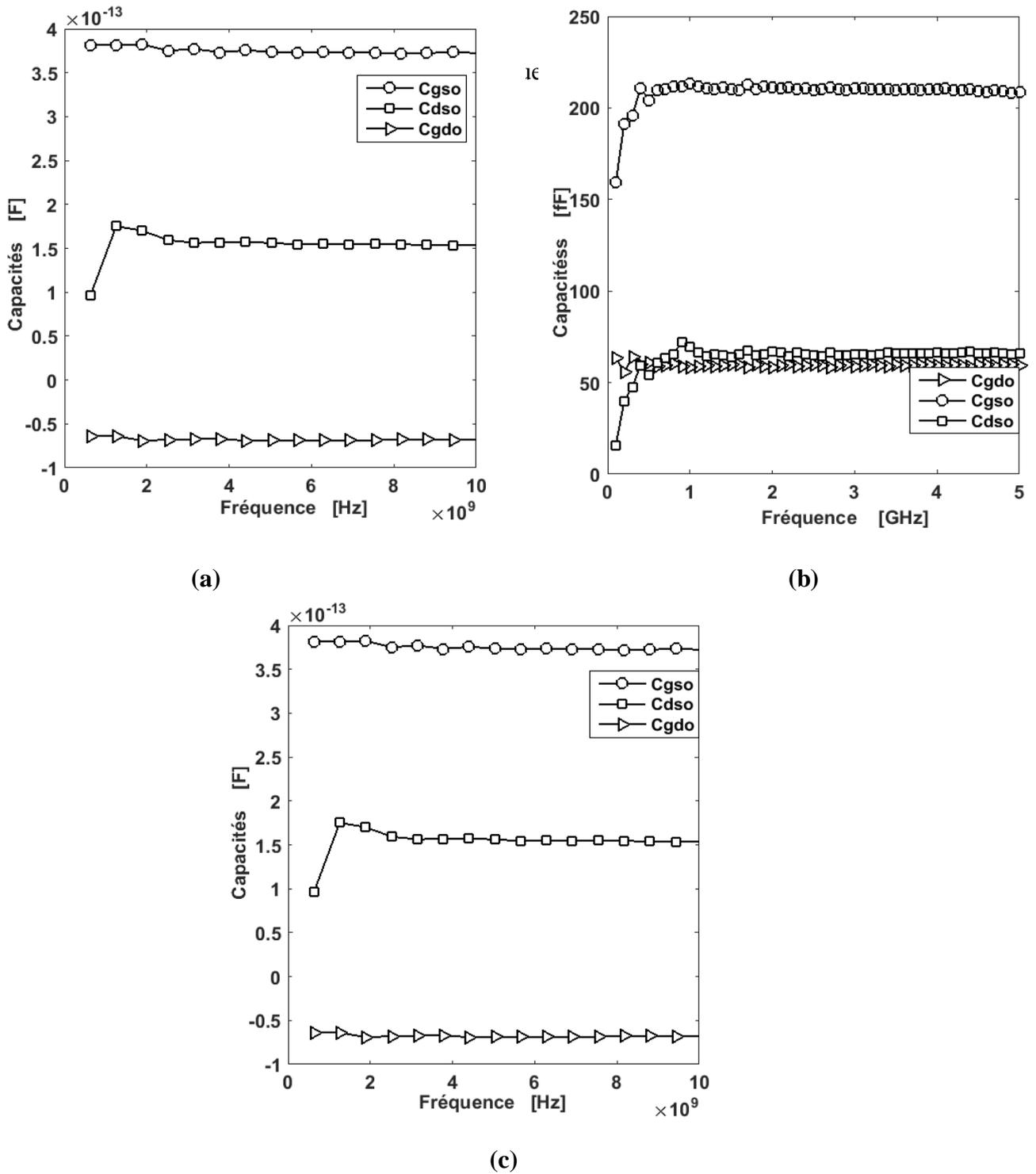


Figure. III.3 Extraction des capacités extrinsèques dans la gamme de fréquence 0.1-40 GHz à $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V. (a) HEMT GaN/SiC, (b) HEMT GaN/D, (c) HEMT GaN/Si

Le Tableau. III.1, Tableau.III.2 et Tableau.III.3 montrent les valeurs des résistances, inductances et capacités extrinsèques extraites du transistor HEMT GaN sur différents substrat à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$ (V_{th} représente la tension de seuil).

Tableau III.1 . Valeurs des paramètres extrinsèques du HEMT GaN /SiC à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$.

Les résistances (Ω)	Les capacités (fF)	Les inductances (pH)
$R_s = 0.21$	$C_{gso} = 234$	$L_s = 8.14$
$R_g = 0.93$	$C_{dso} = 95$	$L_g = 44$
$R_d = 1.07$	$C_{gdo} = 53.84$	$L_d = 42.86$
	$C_{dp} = 27.85$	
	$C_{gp} = 27.85$	
	$C_{ds} = 77.2$	
	$C_{gs} = 231.72$	

Tableau III.2. Valeurs des paramètres extrinsèques du HEMT GaN /D à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$.

Les résistances (Ω)	Les capacités (fF)	Les inductances (pH)
$R_s = 0.06$	$C_{gso} = 194.30$	$L_s = 8.2$
$R_g = 5$	$C_{dso} = 61.624$	$L_g = 88.97$
$R_d = 4.44$	$C_{gdo} = 51.652$	$L_d = 77.9$
	$C_{dp} = 0.47$	
	$C_{gp} = 0.87$	
	$C_{gs} = 193.43$	
	$C_{ds} = 61.154$	

Tableau III.3 . Valeurs des paramètres extrinsèques du HEMT GaN /Si à $V_{ds} = 0$ V et $V_{gs} < V_{th}$.

Les résistances (Ω)	Les capacités (fF)	Les inductances (pH)
$R_s = 0.6$	$C_{gso} = 143.91$	$L_s = 5.6$
$R_g = 1.7$	$C_{dso} = 260.76$	$L_g = 57.2$
$R_d = 2.3$	$C_{gdo} = 200$	$L_d = 54.5$
	$C_{dp} = 57.9$	
	$C_{gp} = 57.61$	
	$C_{ds} = 202.86$	
	$C_{gs} = 86.01$	

III.2.2. Extraction des paramètres intrinsèques

Les paramètres intrinsèques représentent la partie active du transistor, après l'épluchage des résistances, inductances et des capacités extrinsèques. Les paramètres intrinsèques qui dépendent de la polarisation sont obtenus à partir des équations II.21-II.34.

III.2.2.1. Extraction des capacités C_{gsi} et C_{gdi}

La figure III.4 représente respectivement les capacités intrinsèques C_{gsi} et C_{gdi} du transistor HEMT GaN sur substrat silicium (Si) et carbure de silicium (SiC) respectivement. Ces capacités ont été extraites à partir des pentes des courbes $\omega \cdot D$ en fonction de ω^2 et à l'aide des équations (II.21), (II.24), (II.27) et (II.28) du chapitre II.

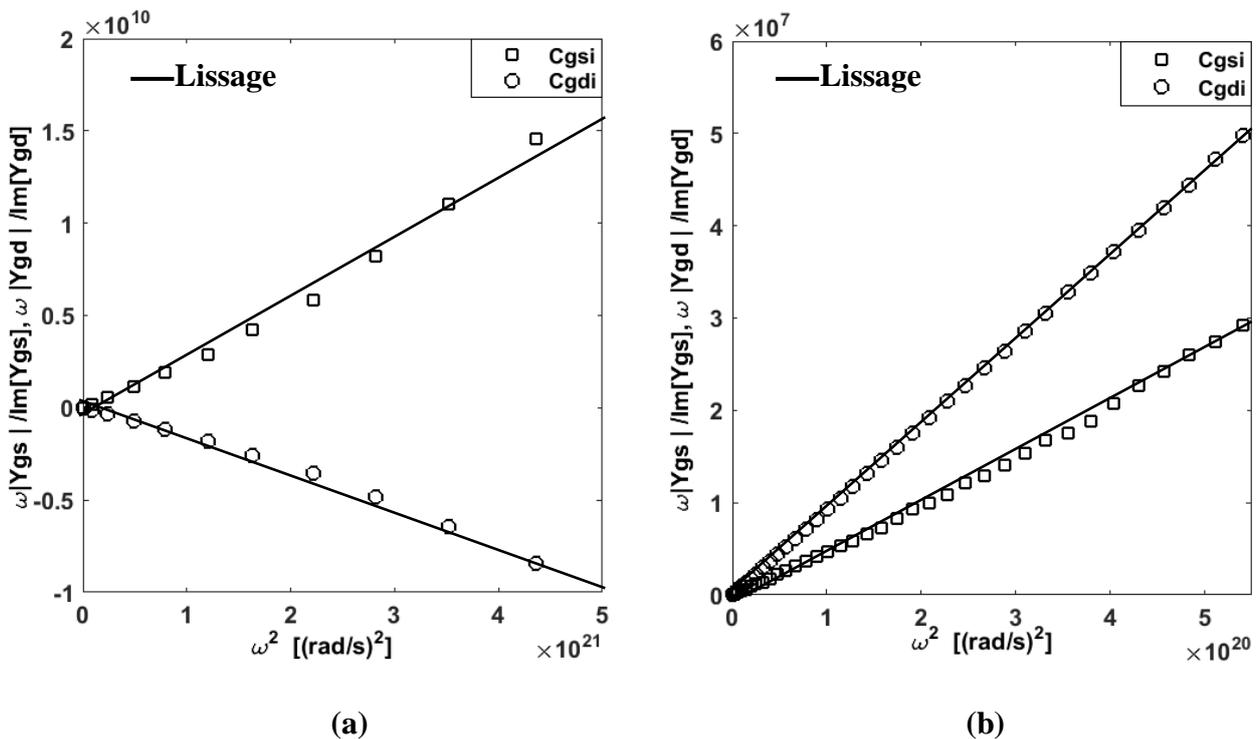


Figure III.4. Extraction des capacités intrinsèques $V_{ds} = 30$ V et $V_{gs} = -1$ V. (a) HEMT GaN/Si, (b) HEMT GaN/SiC.

III.2.2.2. Extraction des résistances R_i et R_{gd}

La figure III.5 montre les courbes des résistances R_i et R_{gd} extraites à partir des pentes de la courbe $\omega \frac{Y_{gs}}{Im[Y_{gs}]}$ et $\omega \frac{Y_{gd}}{Im[Y_{gd}]}$ en fonction de ω^2 utilisant les équations (II.25), (II.21), (II.29), (II.27) du chapitre II respectivement.

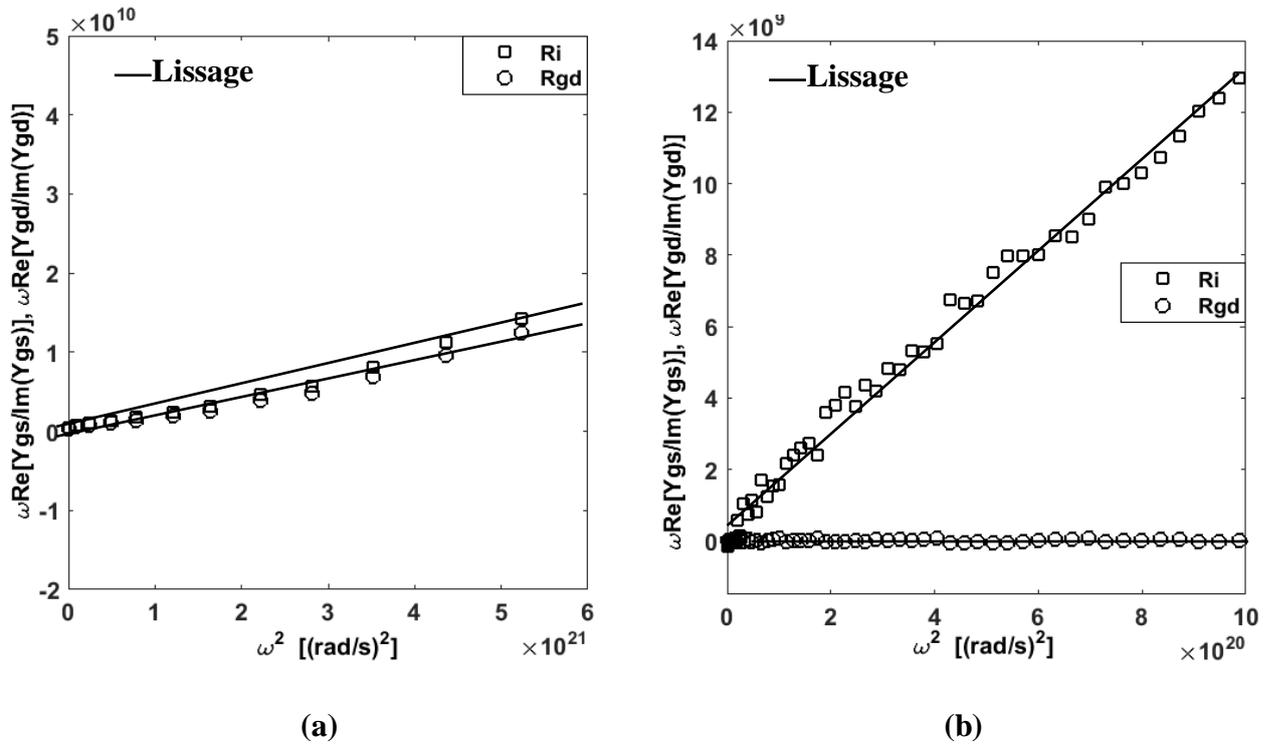


Figure III.5. Extraction des résistances intrinsèques à $V_{ds} = 30\text{V}$ et $V_{gs} = -1\text{V}$. (a) HEMT GaN/Si, (b) HEMT GaN/SiC.

III.2.2.3. Extraction de G_{ds} et τ

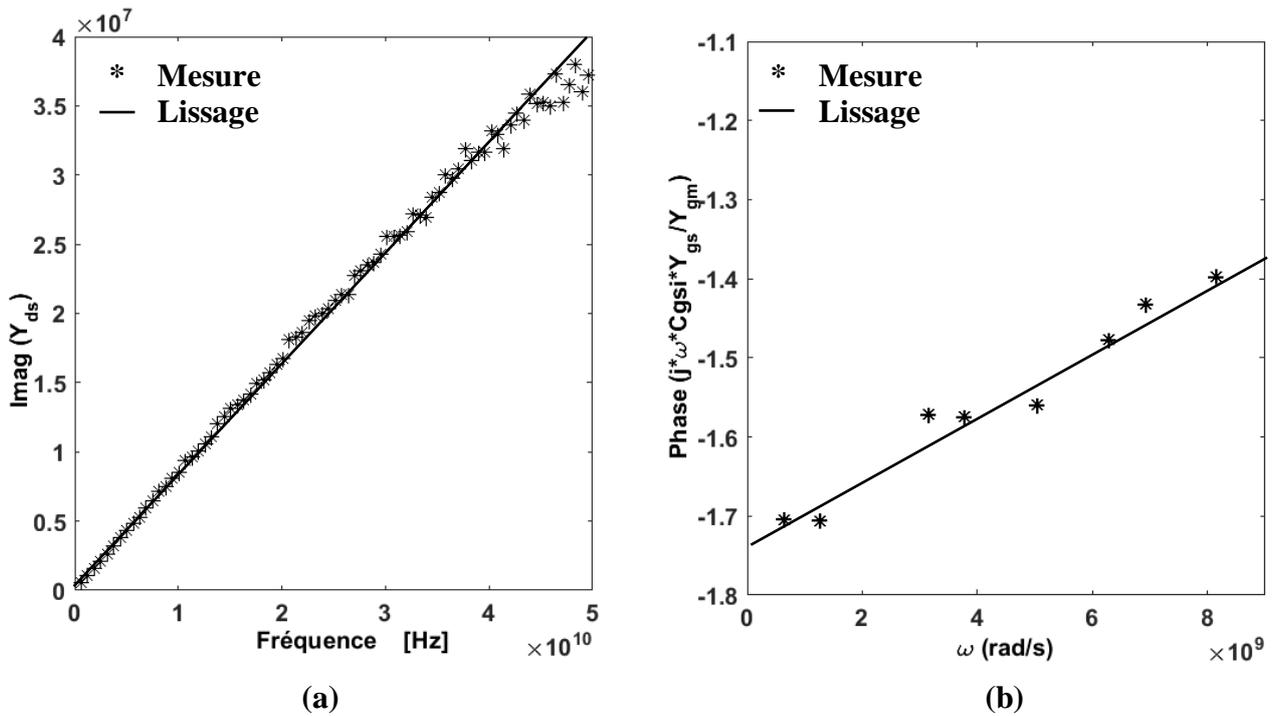


Figure III.6. Extraction de la conductance intrinsèque et le temps de retard et à $V_{ds} = 30\text{V}$ et $V_{gs} = -1\text{V}$ du transistor HEMT GaN/SiC. (a) Conductance, (b) temps de retard.

Après avoir effectué les calculs des valeurs correspondantes aux différents paramètres intrinsèques et à l'aides des courbes et des équations du chapitre II ; nous sommes arrivées à réaliser le tableau suivant:

Tableau III.4. Les valeurs extraites des éléments intrinsèques du circuit équivalent petit-signal du transistor HEMT GaN à $V_{ds} = 30$ V et $V_{gs} = -1$ V.

Les éléments intrinsèques	C_{gsi} (fF)	R_i (Ω)	τ (ps)	G_m (s)	C_{dsi} (fF)	G_{ds} (ms)	C_{gdi} (fF)	R_{gd} (Ω)	G_{gdf} (mS)	G_{gsf} (mS)
GaN/SiC	50.9	194.44	43.96	0.05	146.67	0.87	90	0	0	0
GaN/Si	133.3	100	36.3	0.28	249.9	0.15	132	4.069	0	0

III.3. Résultat de simulation du transistor HEMT à base de GaN

La validation des résultats obtenus se fait en utilisant un logiciel de simulation ADS (Advanced Design System), après avoir implémenté un circuit électrique équivalent petit signal issue des éléments extrinsèques et intrinsèques extrait de la figure III.7, dans la même fenêtre du logiciel ADS, on charge les datas de mesure dans une boîte noire (transistor S2P) montré en figure III.8, puis on simule les deux circuits au même temps, Dans le résultats de simulation on procède à la comparaison entre les paramètres-S de mesures (S2P) et ceux du circuit électrique équivalent.

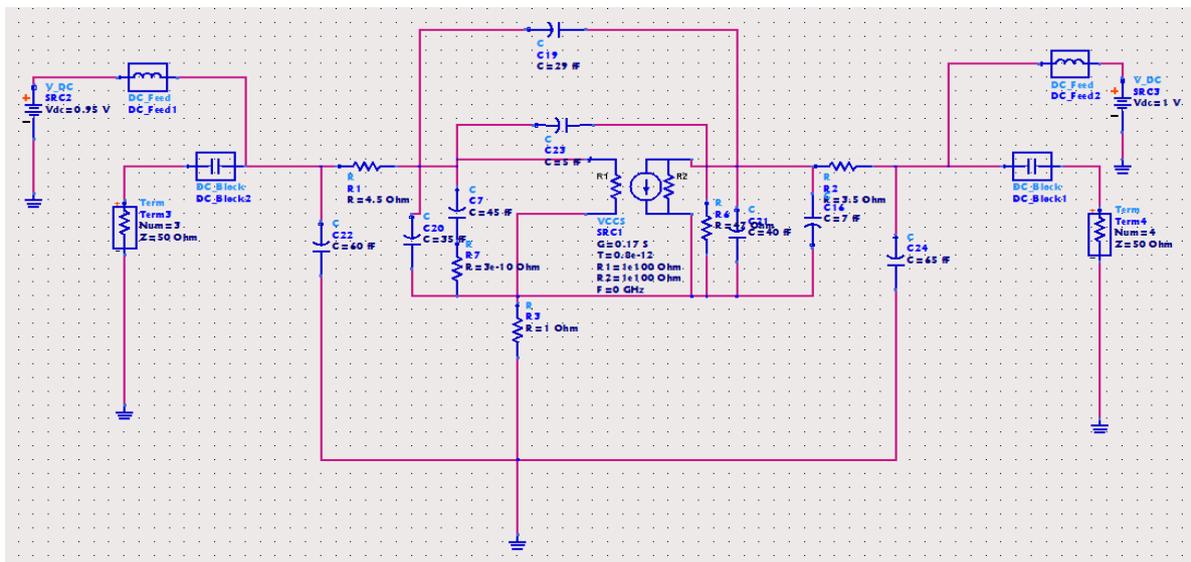


Figure III.7. Circuit électrique équivalent petit-signal sous ADS.

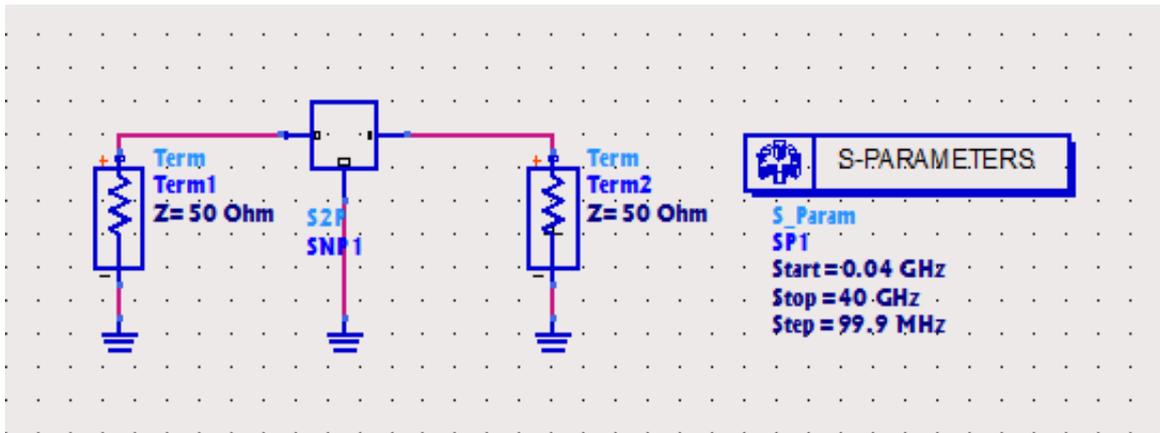


Figure III.8. Transistor S₂P sous ADS.

Les figures III.9 et III.10 montrent une bonne convergence entre les paramètres-S mesurés et les paramètres-S simulés basés sur les paramètres extraits du circuit équivalent petit signal du transistor HEMT GaN/Si et HEMT GaN/SiC à froid pincé et en saturation et ce sur une large gamme de fréquence. Le bon accord obtenu prouve l'efficacité de la méthode d'extraction proposée.

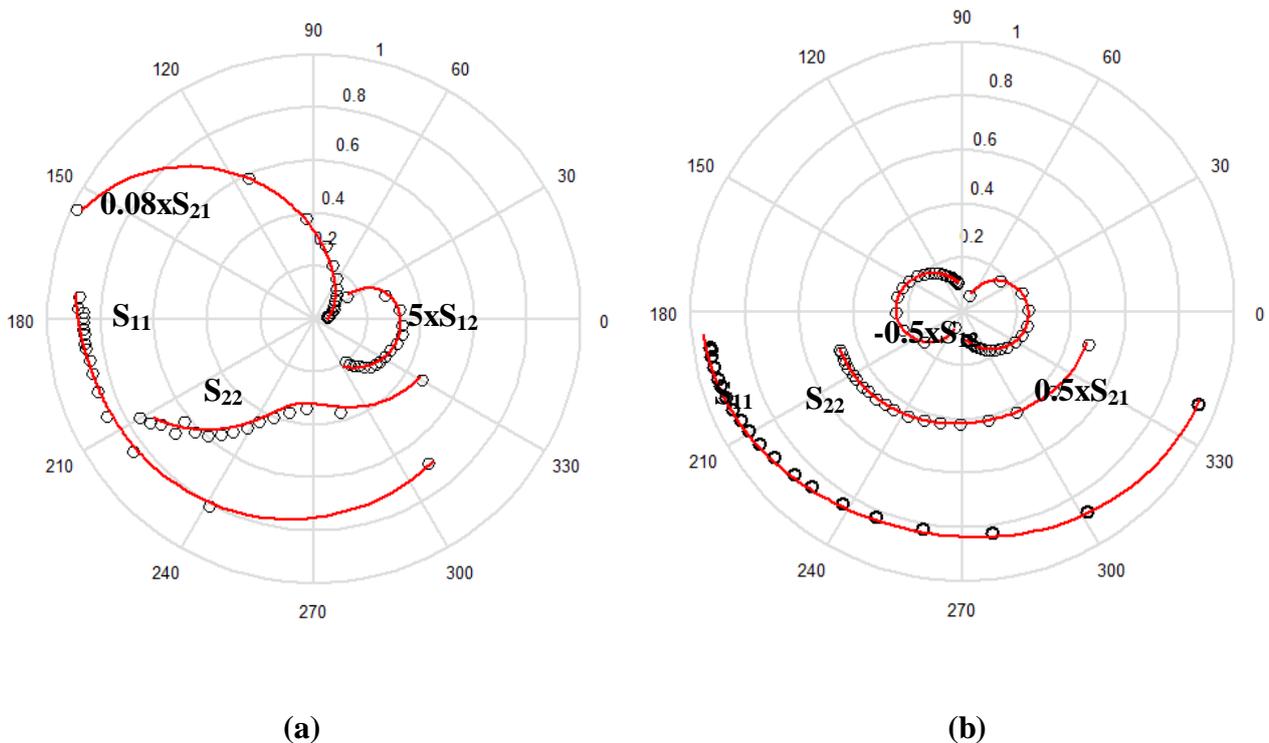


Figure III.9. Comparaison entre les paramètres-S mesurés (o) et simulés (ligne) du transistor HEMT GaN/Si dans la gamme de fréquence 0.5 à 20 GHz. (a) saturation $V_{gs} = -1$ V et $V_{ds} = 25$ V, (b) à froid pincé $V_{gs} = -1$ V et $V_{ds} = 0$ V.

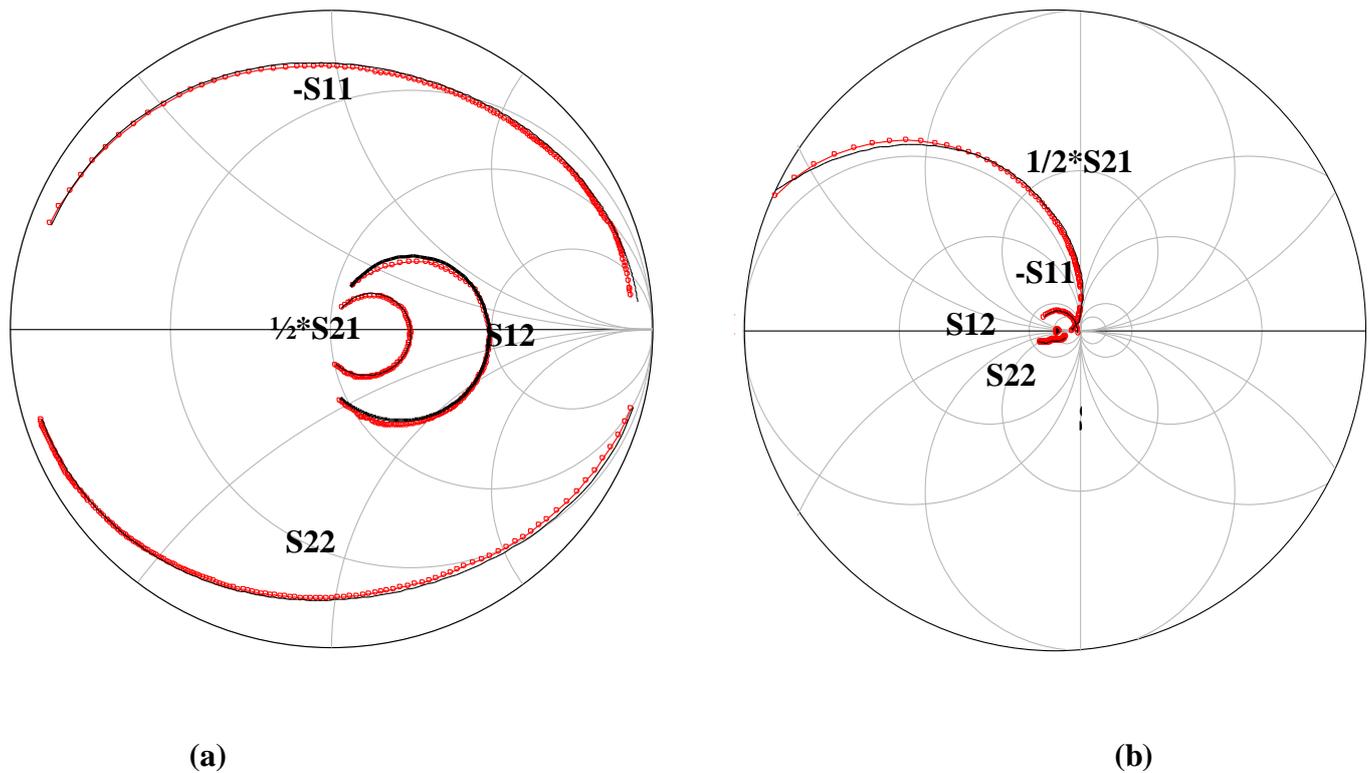


Figure III.10. Comparaison entre les paramètres-S mesurés (o) et simulés (ligne) du transistor HEMT GaN/SiC. (a) saturation $V_{gs} = -1$ V et $V_{ds} = 30$ V, (b) à froid pincé $V_{gs} = -4$ V et $V_{ds} = 0$ V.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode d'extraction directe et précise des éléments intrinsèques et extrinsèques du transistor GaN HEMT a été suivie. Les résultats obtenus et présentés dans les différentes figures de ce chapitre ont montré l'indépendance en fréquence des éléments extraits et confirme qu'ils sont extraits avec précision. Cette technique est vérifiée par l'accord entre les paramètres S mesurés et simulés jusqu'à 40 GHz.

Ainsi, un bon accord est obtenu entre les résultats simulés et mesurés pour des HEMT de différents substrats. Ceci valide donc la précision du modèle proposé et de la méthode d'extraction.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ces dernières années, Le transistor HEMT à base de GaN est devenu un composant électronique très utilisé, qui est surtout destiné à l'application de puissance hyperfréquence et à la conception de commutateurs pour les convertisseurs en électronique de puissance. Les applications de puissance hyperfréquence concernent les domaines militaires et civils dédiés aux télécommunications.

Les travaux effectués lors de ce projet portaient sur la modélisation large bande des transistors à effet de champ, notamment, les transistors HEMT à base de nitrure de gallium GaN. Il s'agissait d'extraire des paramètres constituant un schéma équivalent petit signal des transistors à effet de champ.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation des transistors à effet de champs en décrivant leurs caractéristiques ainsi que leurs fonctionnements. Nous avons ensuite Comparé le GaN au matériau de silicium (Si), ainsi qu'au matériau de GaAs, et nous avons constaté un certain nombre de mérites intrinsèques chez le GaN tel que La hauteur de sa large bande interdite qui lui confère des densités de courant élevées et la tension de claquage la plus élevée aujourd'hui, néanmoins ce dispositif présente des effets limitatifs (parasites) qui sont les pièges et la thermique. Les pièges capturent ou émettent des charges qui peuvent affecter les performances électriques des HEMTs en GaN. Et la puissance dissipée dans un transistor provoque une augmentation de la température du composant qui induit une chute de la mobilité des électrons et une diminution de son efficacité.

Le second chapitre a porté sur l'aspect théorique des différents types de modélisation des transistors HEMT à base GaN, dans lequel nous avons présenté différentes techniques d'extraction sur différents substrats. Ces méthodes ont porté sur l'extraction des éléments extrinsèques et intrinsèques schéma équivalent petit signal des transistors HEMT GaN. L'approche retenue a permis de déterminer les valeurs des résistances et les inductances extrinsèques dans les conditions de pincement à froids, et de même pour la déduction des capacités extrinsèques, puis nous avons déduit les éléments intrinsèques en saturation (résistances, transductance et capacités).

Enfin, pour valider l'approche décrite au chapitre 2, dans le dernier chapitre nous nous sommes concentrés sur l'affichage des résultats de simulation sur MATLAB. Ensuite, une comparaison a été effectuée entre ces simulations et les données des mesures sur le logiciel ADS, et nous avons obtenu un bon accord entre les deux. En effet cet accord reflète la fiabilité de la méthode proposée.

Références bibliographiques

- [1] N.DELTIMPL. « Etude et réalisation d'un amplificateur de puissance reconfigurable en technologie BiCMOS SiGe pour des applications multi-standards GSM/DCS/UMTS ». Electronique, thèse de doctorat Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2005.
- [2] M.LAREDJ, « Modélisation électrothermique de transistors en technologie GaN », Mémoire de maîtrise en génie électrique, université de québec, 2011.
- [3] https://stringfixer.com/fr/Field_effect_transistor, consulté le 04 septembre 2022
- [4] https://fr.wikibooks.org/wiki/%C3%89lectronique/Les_transistors_%C3%A0_effet_de_champ, consulté le 04 septembre 2022
- [5] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/what-is-field-effect-transistor-fet>, consulté le 04 septembre 2022
- [6] M.ABOU DAHER, « Réalisation et optimisation de Transistors HEMT GaN forte puissance et haute fréquence par technologie de transfert de couches sur substrat hôte » thèse de doctorat : Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2020,
- [7] N.SOPHIA, Cours « transistor a effet de champs », école Berner Fachhochschule BFH, Technik und Informatik, Suisse, pp 134-160, Suisse, 24 janvier 2018
- [8] A.BENYAHIA « effet quantique dans les composants puits quantiques » resumé du cours Physique des composants semi-conducteurs 3, université Batna 2.
http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/benhaya-abdelhamid/files/3_transistor_hemt.pdf, consulté le 13 septembre 2022
- [9] M.AVCU « Caractérisation des effets parasites dans les HEMTs GaN : développement d'un banc de mesure 3ω », Thèse de doctorat, université de limoges, 17 novembre 2014.
- [10] J.BARTHOLOMEUS, « Fiabilité de transistors industriels HEMTs de puissance basés sur la technologie AlGaIn/GaN », pp 189- 200, Revue scientifique, ECAM – Bruxelles, 31 Mai 2017.
- [11] G.CALLET « Caractérisation et Modélisation de Transistors HEMT AlGaIn/GaN et InAlN/GaN pour l'Amplification de puissance en Radiofréquences », Thèse de doctorat, université de limoges, 2011.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Gallium_nitride, consulté le 04 septembre 2022
- [13] E.AL ALAM, A.CAZZRE, F.MORANCHO, K.ISOIRD, Y.CORDIER. « Le Nitrure de Gallium : un Matériau d'Avenir pour la Conception de Composants de Puissance Haute Tension et Haute Température ». MGE 2008 4ème Colloque Matériaux du Génie Electrique, May 2008, TOULOUSE, France. 4 p.
- [14] L.PACE, « Caractérisation et modélisation de composants GaN pour la conception de convertisseurs statiques haute fréquence », thèse de doctorat Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université de Lille, 2019.

- [15] O.CHIHANI « Etude de la fiabilité de composants GaN en conversion d'énergie », thèse de doctorat, Electronique. Université de Bordeaux, 2018.
- [16] <https://www.final-materials.com/fr/15-carbure-de-silicium>, consulté le 04 septembre 2022.
- [17] F.SILVA, A.TALLAIRE, J.Achard, A.Gicquel « Un matériau dur : Le diamant », Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux C.N.R.S. UPR 3407 Université Paris XIII, Villetaneuse, France.
- [18] M.ABOU DAHER « Réalisation et optimisation de Transistors HEMT GaN forte puissance et haute fréquence par technologie de transfert de couches sur substrat hôte. », Thèse de doctorat, université de Toulouse.
- [19] L.PACE, « Caractérisation et Modélisation de Composants GaN pour la Conception de Convertisseurs Statiques Haute Fréquence », Thèse de Doctorat, École doctorale régionale Sciences Pour l'Ingénieur Lille.
- [20] S.BATRA, « Wide bandgap-HEMT device (GaN) modelling for High Power Amplifier Design.», , Indraprastha Institute of Information Technology, New Delhi,India, 2017.
- [21] ELIZA, S.AFREEN, «Modeling of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor for Sensors and HighTemperature Circuit Applications. » PhD diss., University of Tennessee.
- [22] D.MAAFRI, « Caractérisation et modélisation large bande des transistors à effet de champ », thèse de doctorat, université de l'USTHB,Alger, 2017.
- [23] D.MAAFRI, A.ABDELHALIM, SAADI, M.Al SABBAGH, and MUSTAPHA.C. E. YAGOUB, Senior Member, IEEE, «A New High-Frequency HEMT GaN Extrinsic Capacitance Extraction Technique », Consortium - Algeria (CERIST). UTC from IEEE Microwave and Wireless Components Letters.
- [24] H. Mathieu. 2004. « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 5ème Edition, Dunod, Paris. 720 p.
- [25] A. JARNDAL, « A simplified modelling approach for AlGaIn/GaN HEMTs using pinched cold S-parameters », 2013 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013, pp. 1-4.
- [26] A.JARNDAL, S. HUSSEIN, AHMED. «Hybrid small-signal model parameter extraction of GaN HEMTs on Si and SiC substrates based on global optimization.», International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2019.
- [27] M.Al SABBAGH, M . C. E. Yagoub,,J.Park, « New small-signal extraction method applied to GaN HEMTs on different substrates », RESEARCH ARTICLE,2020
- [28] F.DIAMANT, M.LAVIRON, « measurement of extrinsic series elements of a microwave MESFET under zero current conditions »,in Proc. 12th European Microwave conf.,pp 451-456, 1982.
- [29] G. DAMBRINE, A.CAPPY , « Détermination rapide et précise du schéma équivalent « petit signal » des transistors à effet de champ ». Ann. Télécommun. 43 , 274-281,

1988

[30] A. JARDNAL and G. KOMPA « A new small-signal modeling approach applied to GaN devices » *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 53, no. 11, pp. 3440–3448, Nov. 2005.

[31] J. LU, Y.WANG, L.MA, and Z.YU, « A new small signal modeling and extraction method in AlGa_N/Ga_N HEMTS Solid-State Electron. », vol. 52, no. 1, pp. 115–120, Jan. 2008.

Résumé

Le développement des systèmes de télécommunications motive la mise au point des systèmes de transmissions qui permettent des débits plus élevés sur des grandes distances. De ce fait les transistors utilisés dans ces systèmes doivent fonctionner à des fréquences et des puissances plus élevées. Le transistor HEMT (High Electron Mobility Transistor) en nitrure de gallium (GaN) permet d'obtenir des puissances élevées (obtenues grâce aux grandes densités de courant et aux tensions de polarisation élevées), et des fréquences de travail importantes.

Nous avons présenté une étude détaillée sur le fonctionnement du transistor HEMT en GaN, et nous nous sommes focalisées sur la modélisation petit-signal de ces transistors afin de choisir le circuit équivalent en suivant une méthodologie précise et extraire tous ses paramètres intrinsèques et extrinsèques, L'extraction a été effectuée à différents points de polarisation à partir des données expérimentales (paramètres [S]), disponibles au niveau du centre de développement des technologies avancées CDTA.

Mots-clés_ transistor, HEMT GaN, Modélisation petit signal, Intrinsèques et Extrinsèques

Abstract

The development of telecommunications systems is driving the development of transmission systems that enable higher speeds over long distances. As a result, the transistors used in these systems must operate at higher frequencies and powers. High Electron Mobility Transistor (HEMT) in gallium nitride (GaN) provides high power (obtained from high current densities and high bias voltages), and important working frequencies.

We presented a detailed study on the operation of the HEMT GaN transistor, and we focused on the small-signal modeling of these transistors in order to choose the equivalent circuit following a precise methodology and extract all its intrinsic and extrinsic parameters, The extraction was performed at various polarization points from experimental data (parameters [S]), available at the CDTA Advanced Technology Development Centre.

Keywords_ transistor, HEMT GaN, Small signal modeling, Intrinsic and Extrinsic

ملخص

يقود تطوير أنظمة الاتصالات السلكية واللاسلكية تطوير أنظمة النقل التي تسمح بسرعات أعلى لمسافات طويلة. نتيجة لذلك، يجب أن تعمل الترانزستورات المستخدمة في هذه الأنظمة بترددات وقوى أعلى. يوفر الترانزستور عالي التردد الإلكتروني في نيتريد الغاليوم قوة عالية (تم الحصول عليها من كثافة التيار العالية وفولتات التحيز العالية)، وترددات عمل كبيرة.

قدمنا دراسة مفصلة عن تشغيل ترانزستور، وركزنا على نمذجة الإشارات الصغيرة لهذه الترانزستورات من أجل اختيار الدائرة المكافئة باتباع منهجية دقيقة واستخراج جميع معالمها الجوهرية والخارجية، تم الاستخراج في نقاط استقطاب مختلفة من البيانات التجريبية، المتاحة في مركز تطوير التكنولوجيا المتقدمة.