



**HAL**  
open science

# Optimisation fiabiliste en mécatronique, application à des transistors de puissance

Abdelhamid Amar

► **To cite this version:**

Abdelhamid Amar. Optimisation fiabiliste en mécatronique, application à des transistors de puissance. Mécanique des structures [physics.class-ph]. Normandie Université; Université Hassan II (Mohammedia, Maroc). Faculté des sciences et techniques, 2022. Français. NNT : 2022NORMIR13 . tel-03977994

**HAL Id: tel-03977994**

**<https://theses.hal.science/tel-03977994v1>**

Submitted on 8 Feb 2023

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

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

## THÈSE

**Pour obtenir le diplôme de doctorat**  
**Spécialité : Génie Mécanique et Mécatronique**

**Préparée au sein de :**  
**Faculté des Sciences et Techniques de Settat**  
**Et**  
**Institut National des Sciences Appliquées de Rouen Normandie**

# Optimisation fiabiliste en mécatronique, application à des transistors de puissance

**Présentée et soutenue par**

**Abdelhamid AMAR**

**Thèse soutenue publiquement le 19/05/2022**  
**devant le jury composé de**

Mme. Ghita MANGOUB	Professeur de l'enseignement supérieur, FST de Settat, Maroc	Présidente
M. Ahmed MOUSRIJ	Professeur de l'enseignement supérieur, FST de Settat, Maroc	Examineur
M. Bouazza BRAIKAT	Professeur de l'enseignement supérieur, FS Ben M'sik Casablanca, Maroc	Rapporteur
M. Abdellah EL MOUDNI	Professeur des universités, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, France	Rapporteur
M. Pierre Richard DAHOO	Professeur des universités, Institut des Sciences et Techniques des Yvelines, France	Examineur
M. Abdelkhalak EL HAMI	Professeur des universités, INSA de Rouen Normandie, France	Directeur de thèse
M. Bouchaïb RADI	Professeur de l'enseignement supérieur, FST de Settat, Maroc	Directeur de thèse

**Thèse dirigée par M. Bouchaïb RADI (LIMII) et M. Abdelkhalak EL HAMI (LMN),**

*A la lune de mon chemin, à mes chers parents,  
A mes petits anges, chers frères et soeurs,  
Aux âmes de mes grands pères,  
A toute ma chère famille.*

---

## Remerciement

---

Ces travaux de doctorat se sont déroulés au sein du Laboratoire de Mécanique de Normandie (LMN) de l'INSA de Rouen et le Laboratoire Ingénierie, Management Industriel et Innovation (LIMII) de la faculté des sciences et techniques de Settat. Dans le cadre d'une convention de cotutelle de thèse entre l'université Hassan Premier et l'INSA de Rouen.

Je profite de l'occasion pour remercier un grand nombre de personnes qui ont contribué efficacement à mon travail de recherche et m'ont ainsi permis d'aboutir à l'élaboration et à la soutenance de cette thèse. En premier, j'exprime ma profonde gratitude et reconnaissance à mes directeurs de thèse d'avoir proposé et accepté de diriger cet agréable projet de recherche :

Mr. Bouchaïb RADI, notre cher professeur à la faculté des Sciences et Techniques de Settat, pour sa grande disponibilité durant toute la période de la préparation de cette thèse. Pour ses conseils judicieux, le partage de ses nombreuses connaissances et ses encouragements continus. Je lui témoigne toute ma reconnaissance pour ses qualités humaines et techniques qui ont vraiment un grand rôle pour le bon déroulement et la réussite de ce projet de recherche.

Mr. Abdelkhalak EL HAMI, notre cher professeur à l'INSA de Rouen, pour son accueil chaleureux et sa disponibilité pendant mes séjours au LMN durant ma thèse. Pour le partage de ses nombreuses connaissances scientifiques et professionnelles, son aide et ses précieux conseils avec une vision claire et synthétique.

Je remercie également Mme. Ghita MANGOUB, professeur à FST de Settat, d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse. Je remercie aussi Mr. Bouazza BRAIKAT professeur à FS ben M'sik et Mr. Abdellah EL MOUDNI professeur à l'UTBM d'avoir accepté la lourde tâche de rapporter cette thèse. Je remercie Mr. Ahmed MOUSRIJ professeur à FST de Settat et Mr. Pierre Richard DAHDO directeur de l'ISTY d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je remercie chacun des membres du Laboratoire IMII et du LMN pour leur soutien et leur disponibilité. Pour l'ambiance très optimiste et le climat d'entraide qu'ils ont su créer au sein des deux Laboratoires. Finalement, je tiens à remercier sincèrement tous les membres de ma famille pour leur soutien et leurs encouragements et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

La performance et la fiabilité des systèmes mécatroniques à haute puissance sont en fonction de celle de leurs composants. Parmi les composants les plus importants dans les systèmes complexes et les systèmes mécatroniques à haute puissance, on trouve les transistors à haute puissance. Parmi ces transistors, on trouve le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) est une technologie en cours du développement. Le HEMT a créé une révolution dans les différents domaines de l'industrie (automobiles, aéronautiques, etc.), grâce à ses propriétés électriques et thermiques qui sont plus pertinentes par rapport aux autres transistors. Pendant le fonctionnement de la technologie HEMT, plusieurs phénomènes apparaissent dans sa structure.

Dans cette thèse, on s'intéresse au HEMT. On va présenter la modélisation électrothermo-mécanique de ce dernier, qui va nous permettre d'observer ces phénomènes. La modélisation est faite par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel Comsol multiphysics. Cette modélisation permet d'étudier l'influence des conditions du fonctionnement sur le comportement thermique et mécanique du composant. Cette modélisation a permis également d'étudier le comportement multiphysique du transistor et d'observer les dégradations dans la structure du composant.

Par conséquent, une étude d'optimisation est nécessaire pour éviter les défaillances dans ce transistor. Dans ce travail, on a utilisé la méthode Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy (CMA-ES) pour résoudre le problème de l'optimisation posé, mais elle nécessite un temps du calcul très important. Par conséquent, on a proposé la méthode CMA-ES assistée par le krigeage (KA-CMA-ES), qui consiste à une intégration du métamodèle de krigeage dans la méthode CMA-ES, elle permet de résoudre le problème de l'optimisation et dépasser la contrainte du temps du calcul. L'intégration du modèle éléments finis développé sous Comsol Multiphysics et la méthode KA-CMA-ES sous Matlab, a permis d'optimiser le comportement multiphysics de ce transistor. On a fait une comparaison entre les résultats des simulations numériques de l'état initial et l'état optimal du composant. On a constaté que la méthode KA-CMA-ES est efficace pour résoudre ce type de problème.

Cependant, cette approche ne prend pas en considération le niveau de fiabilité. Pour cette

raison, on développe la méthode de l'optimisation fiabiliste RBDO (Reliability Based Design Optimization) hybride appliquée à la technologie HEMT dans le but d'améliorer sa performance et sa fiabilité. L'exécution du processus de la RBDO nécessite le développement et le couplage de deux modèles : le modèle éléments fins sous le logiciel Comsol multiphysics et le modèle RBDO sous le logiciel Matlab. Après l'application de ce processus, on a réussi à déterminer les valeurs optimales des variables de conception qui permettent d'optimiser le comportement multiphysics de la structure et le niveau de fiabilité du HEMT.

**Mots-clés :** Mécatronique, HEMT, Modélisation électro-thermomécanique, Fiabilité, Optimisation, RBDO.

The performance and reliability of high-power mechatronic systems depends on the performance of their components. Among the most important components in complex systems and high power mechatronic systems are high power transistors. Among these transistors, the high electron mobility transistor (HEMT) is a technology under development. The HEMT has created a revolution in different fields of industry (automotive, aerospace, etc.), thanks to its electrical and thermal properties that are more relevant compared to other transistors. During the operation of the HEMT technology, several phenomena appear in its structure.

In this thesis, we are interested in the HEMT. We will present the electro-thermomechanical modeling of the latter, which will allow us to observe these phenomena. The modeling is done by the finite element method using Comsol multiphysics software. This modeling allows to study the influence of the operating conditions on the thermal and mechanical behavior of the component. This modeling also allowed to study the multiphysics behavior of the transistor and to observe the degradations in the structure of the component.

Therefore, an optimization study is necessary to avoid failures in this transistor. In this work, we have used the Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy (CMA-ES) method to solve the optimization problem, but it requires a very important computation time. Therefore, we have proposed the Kriging-Assisted CMA-ES method (KA-CMA-ES), which consists in the integration of the Kriging metamodel into the CMA-ES method, and it allows solving the optimization problem and overcoming the computation time constraint. The integration of the finite element model developed with Comsol Multiphysics and the KA-CMAES method with Matlab, allowed to optimize the multiphysics behavior of this transistor. A comparison was made between the results of the numerical simulations of the initial state and the optimal state of the component. We have found that the KA-CMAES method is efficient to solve this optimization problem.

However, this approach does not take into consideration the reliability level. For this reason, we develop the RBDO (Reliability Based Design Optimization) hybrid optimization method applied to the HEMT technology in order to improve its performance and reliability. The execution of the RBDO process requires the development and coupling of two models : the finite element

model under Comsol multiphysics software and the RBDO model under Matlab software. After the application of this process, we have succeeded to determine the optimal values of the design variables that allow to optimize the multiphysics behavior of the structure and the reliability level of the HEMT.

**Keywords :** Mechatronics, HEMT, Electro thermomechanical modeling, Reliability, Optimization, RBDO.



---

## Nomenclature

---

$P_f$	probabilité des défaillances
$\beta_C$	Indice de fiabilité de Cornell
$\beta_{HL}$	Indice de fiabilité de Hasofer-Lind
$P_{diss}$	densité linéaire de la puissance dissipée
$T_{Ref}$	température de référence
$\alpha$	coefficient de dilatation thermique
AG	algorithmes génétiques
AlGaN	aluminium nitrure de gallium
Cgd	capacité grille-drain
CMA-ES	Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy
D	déplacements
Defxx	premier déformations principales
Defyy	deuxième déformations principales
Defzz	troisième déformations principales
E	module de Young
EG	bande d'énergie interdite
f(x)	fonction objectif standard
F(X,Y)	fonction objectif (cas de RBDO hybride)
FORM	First Order Reliability Method
ft	fréquence de transition
G(X)	fonction d'état limite
GaAs	arséniure de gallium

---

GaN	nitrure de gallium
gds	conductance
gm	transconductance
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HPA	amplificateurs à haute puissance
Ids	courant drain-source
K	Conductivité thermique
KA-CMA-ES	CMA-ES assistée par le krigeage
LDMOS	Laterally Doped Metal Oxyde Semiconductor
m	masse effective des porteur
MESFET	Metal Semiconductor Field Effect Transistor
MPFP	Most Probable Failure Point
Q	puissance dissipée
q	la charge élémentaire
R	fiabilité
RBDO	Reliability Based Design Optimization
RF	Radio-Fréquence
SE	stratégie d'évolution
Si	silicium
SiC	carbure de silicium
SiN	nitrure de silicium
SORM	Second Order Reliability Method
T	température
Vds	tension drain-source
Vgs	tension grille-source
X	vecteur des variables déterministes
Y	vecteur des variables aléatoires
$\mu$	Mobilité électronique

<b>Introduction générale</b> . . . . .	17
<b>1 Généralités sur les transistors à haute puissance</b> . . . . .	<b>18</b>
1.1 Introduction . . . . .	19
1.2 La mécatronique . . . . .	19
1.2.1 Définition . . . . .	19
1.2.2 Système mécatronique . . . . .	20
1.2.3 Ingénierie des systèmes mécatroniques . . . . .	22
1.2.4 Mode de défaillance dans les systèmes mécatroniques . . . . .	25
1.3 Les transistors à haute puissance . . . . .	28
1.4 Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) . . . . .	30
1.4.1 Les caractéristiques électriques du HEMT . . . . .	30
1.4.2 Les propriétés physiques des matériaux du HEMT . . . . .	32
1.4.3 La topologie du HEMT . . . . .	34
1.4.4 Les différentes couches du HEMT . . . . .	36
1.4.5 Fonctionnement du HEMT . . . . .	37
1.5 Le HEMT dans les systèmes mécatroniques à haute puissance . . . . .	39
1.6 Les mécanismes de dégradations du HEMT . . . . .	42
1.6.1 Les effets thermiques . . . . .	42
1.6.2 Effets parasites et mécanismes de dégradation . . . . .	43
1.7 Conclusion . . . . .	46
<b>2 Modélisation électro-thermomécanique du HEMT</b> . . . . .	<b>47</b>
2.1 Introduction . . . . .	48
2.2 Transfert thermique au sein du HEMT . . . . .	49
2.2.1 La conduction . . . . .	49
2.2.2 La convection . . . . .	50
2.2.3 Le rayonnement . . . . .	51
2.3 Approximation par la méthode des éléments finis . . . . .	52
2.4 Modélisation électro-thermomécanique . . . . .	53
2.4.1 Présentation du problème . . . . .	53

2.4.2	Modélisation électrothermique . . . . .	54
2.4.3	Modélisation thermomécanique . . . . .	57
2.5	Résultats de la simulation numérique électrothermique . . . . .	59
2.5.1	Influence de la température de référence . . . . .	62
2.5.2	Influence de la couche de nucléation . . . . .	63
2.5.3	La résistance thermique . . . . .	64
2.6	Résultats de la simulation numérique thermomécanique . . . . .	65
2.6.1	Calcul des déplacements . . . . .	65
2.6.2	Calcul des déformations . . . . .	67
2.6.3	Calcul des contraintes . . . . .	69
2.6.4	Influence des paramètres géométriques . . . . .	71
2.7	Conclusion . . . . .	75
<b>3</b>	<b>Optimisation du transistor à haute mobilité d'électrons</b>	<b>77</b>
3.1	Introduction . . . . .	78
3.2	Optimisation en mécanique . . . . .	79
3.2.1	Optimisation de dimensionnement . . . . .	79
3.2.2	Optimisation de forme . . . . .	80
3.2.3	Optimisation de la topologie . . . . .	81
3.2.4	Optimisation déterministe . . . . .	82
3.3	Optimisation à base des algorithmes évolutionnaires . . . . .	82
3.3.1	Algorithmes évolutionnaires . . . . .	82
3.3.2	Stratégies d'évolution . . . . .	83
3.3.3	Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy (CMA-ES) . . . . .	84
3.4	Approche basée métamodèle . . . . .	86
3.4.1	Présentation du métamodèle . . . . .	86
3.4.2	Métamodèle estimé dans la boucle d'optimisation . . . . .	87
3.4.3	Construction des métamodèles . . . . .	87
3.4.4	Plans d'expérience standards . . . . .	89
3.4.5	Méthodes de remplissage de l'espace (Space Filling Design) . . . . .	89
3.4.6	Les différents types de métamodèles . . . . .	90
3.5	CMA-ES assistée par le krigeage . . . . .	94
3.5.1	Mangement du métamodèle . . . . .	94
3.5.2	Qualité du métamodèle . . . . .	94
3.5.3	Algorithme KA-CMA-ES . . . . .	95
3.6	Approche par modèle éléments finis du HEMT . . . . .	95
3.7	Optimisation du transistor à haute mobilité d'électron . . . . .	96
3.7.1	Optimisation du comportement thermique du HEMT . . . . .	96
3.7.2	Optimisation électro-thermomécanique . . . . .	100
3.8	Conclusion . . . . .	102
<b>4</b>	<b>Optimisation fiabiliste appliqué au HEMT</b>	<b>103</b>
4.1	Introduction . . . . .	104
4.2	Fiabilité des structures . . . . .	105

---

4.2.1	Fonction de fiabilité . . . . .	105
4.2.2	Méthodes de calcul de la fiabilité . . . . .	107
4.3	Optimisation fiabiliste des structures . . . . .	112
4.3.1	Formulation de l'optimisation fiabiliste de conception (RBDO) . . . . .	113
4.3.2	Différentes approches de RBDO . . . . .	114
4.4	Application au HEMT . . . . .	117
4.4.1	Modèle éléments finis du HEMT . . . . .	117
4.4.2	Analyse de la fiabilité du HEMT . . . . .	118
4.4.3	Optimisation du HEMT par la méthode RBDO hybride . . . . .	120
4.4.4	Résultats numériques . . . . .	120
4.5	Conclusion . . . . .	123
	<b>Conclusion générale et perspectives</b> . . . . .	<b>125</b>
	<b>A Notions de base dans la thermique</b> . . . . .	<b>126</b>
A.1	Le champ de température . . . . .	126
A.2	Le gradient de température . . . . .	126
A.3	La chaleur . . . . .	127
A.4	Flux de chaleur et densité de flux . . . . .	127
A.5	La puissance dissipée . . . . .	127
A.6	Résistance thermique . . . . .	127
A.7	Impédance thermique et capacité thermique . . . . .	128
	<b>B Le logiciel Comsol multiphysics</b> . . . . .	<b>129</b>
B.1	Création d'un nouveau modèle . . . . .	129
B.2	Paramètres et variables . . . . .	132
B.3	Création de la géométrie . . . . .	133
B.4	Les propriétés des matériaux . . . . .	134
B.5	Charges et conditions aux limites . . . . .	134
B.6	Maillage . . . . .	135
B.7	Résultat . . . . .	136
	<b>C Algorithmes</b> . . . . .	<b>138</b>
C.1	Algorithm 2 : Modified approximate ranking procedure . . . . .	138
C.2	Algorithm3 : Kriging-assisted CMA-ES . . . . .	139
	<b>Bibliographie</b> . . . . .	<b>148</b>

---

## Table des figures

---

1.1	La mécatronique. . . . .	20
1.2	Système mécatronique. . . . .	21
1.3	Cycle V [1]. . . . .	23
1.4	Courbe en baignoire . . . . .	25
1.5	Les défaillances des composants électroniques . . . . .	26
1.6	Transistor LDMOD Si . . . . .	28
1.7	Le transistor HBT AsGa . . . . .	29
1.8	Le transistor MESFET . . . . .	29
1.9	Le transistor à haute mobilité d'électron. . . . .	30
1.10	Les différentes topologies du HEMT. . . . .	35
1.11	La structure du transistor à haute mobilité d'électron [2] . . . . .	36
1.12	Système aéroporté utilisé par la NASA . . . . .	40
1.13	Voiture hybride utilisant les HEMT [3] . . . . .	41
1.14	Satellite à base du HEMT [4] . . . . .	42
1.15	Localisation des dégradations de HEMT . . . . .	43
1.16	Dégradations thermiques dans le HEMT . . . . .	44
2.1	Le transfert de chaleur par conduction . . . . .	50
2.2	Le transfert de chaleur par convection . . . . .	50
2.3	Le transfert de chaleur par rayonnement . . . . .	51
2.4	Les différents modes de transfert de chaleur dans le HEMT [5]. . . . .	52
2.5	Interface de l'application de simulation. . . . .	56
2.6	Organigramme du processus de simulation électrothermique. . . . .	57
2.7	Organigramme de simulation électro- thermomécanique. . . . .	59
2.8	Distribution de la température dans la structure du HEMT. . . . .	60
2.9	Évolution de la température maximale du fonctionnement à une Tref de 25°C. . . . .	60
2.10	Évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la puissance dissipée à différentes températures de référence. . . . .	61
2.11	Évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la température de référence pour une puissance dissipée de 5 W/mm. . . . .	62

2.12	Évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la température de référence pour des différentes puissances dissipées. . . . .	63
2.13	Évolution de la température maximale du fonctionnement du HEMT en fonction de l'épaisseur de la couche de nucléation. . . . .	64
2.14	Évolution de la résistance thermique du HEMT en fonction de la puissance dissipée. . . . .	65
2.15	Distribution des déplacements au sein de la structure du HEMT. . . . .	66
2.16	Évolution des déplacements en fonction de la puissance dissipée. . . . .	66
2.17	Évolution des déplacements en fonction de la température de référence du HEMT. . . . .	67
2.18	Distribution des déformations principale dans la structure du HEMT. . . . .	68
2.19	Évolution des déformations principales en fonction de la puissance dissipée et la température de référence. . . . .	68
2.20	Distribution des contraintes maximales de von Mises au niveau de la structure du HEMT à $P_{diss}=9$ W/mm et $T_{ref}=150^{\circ}C$ . . . . .	69
2.21	Évolution des contraintes de von Mises en fonction de la puissance dissipée. . . . .	70
2.22	Évolution des contraintes de von Mises en fonction de la température de référence. . . . .	71
2.23	a. Evolution des contraintes von Mises . . . . .	72
2.24	b. Evolution des déplacements . . . . .	72
2.25	Evolution des contraintes von Mises et des déplacements en fonction de $th_{SiC}$ . . . . .	72
2.26	a. Évolution des contraintes von Mises . . . . .	73
2.27	b. Évolution des déplacements . . . . .	73
2.28	Évolution des contraintes von Mises <b>(a)</b> et des déplacements <b>(b)</b> dans la structure du HEMT en fonction de l'épaisseur de GaN $th_{GaN}$ . . . . .	73
2.29	a. Évolution des contraintes von Mises . . . . .	74
2.30	b. Évolution des déplacements . . . . .	74
2.31	Évolution des contraintes von Mises et des déplacements dans la structure du HEMT en fonction de l'épaisseur de AlGaN. . . . .	74
2.32	a. Évolution des contraintes von Mises . . . . .	76
2.33	b. Évolution des déplacements . . . . .	76
2.34	Évolution des contraintes von Mises et des déplacements dans la structure du HEMT en fonction de Z. . . . .	76
3.1	Modèle d'optimisation de dimensionnement. . . . .	79
3.2	Modèle d'optimisation de la forme. . . . .	80
3.3	Modèle d'optimisation topologique. . . . .	81
3.4	Organigramme du processus de construction d'un métamodèle. . . . .	88
3.5	Exemple échantillonnage par l'hypercube latin pour deux variables à cinq niveaux. . . . .	90
3.6	Le modèle éléments finis du HEMT pour l'optimisation. . . . .	95
3.7	Organigramme du processus d'optimisation. . . . .	97
3.8	Évolution de la température du HEMT avant et après l'optimisation. . . . .	98
3.9	Distribution de la température du HEMT avant et après l'optimisation. . . . .	99
3.10	Évolution des contraintes de von Mises dans le HEMT avant et après l'optimisation. . . . .	101
4.1	La fonction de performance. . . . .	106
4.2	Fonction de la fiabilité. . . . .	107

---

4.3	Représentation de la méthode de Monte Carlo. . . . .	107
4.4	Représentation graphique de l'indice de Rjanitzyne-Cornell. . . . .	109
4.5	Représentation géométrique de $\beta_{HL}$ pour un problème à deux variables aléatoires. . . . .	110
4.6	Principe de la méthode FORM. . . . .	111
4.7	Principe de la méthode SORM. . . . .	112
4.8	Processus de l'optimisation fiabiliste de conception. . . . .	113
4.9	Classification des différentes méthodes de la RBDO. . . . .	114
4.10	Algorithme de l'approche classique. . . . .	115
4.11	Algorithme de la méthode hybride. . . . .	117
4.12	Le modèle éléments finis du HEMT pour l'optimisation fiabiliste. . . . .	118
4.13	Organigramme du calcul de la fiabilité. . . . .	119
4.14	Processus de résolution du problème de l'optimisation fiabiliste. . . . .	121
4.15	Evolution de la valeur de la fonction objectif en fonction du nombre des itérations par la méthode RBDO hybride. . . . .	122
B.1	Logiciel Comsol . . . . .	129
B.2	Création d'un nouveau modèle . . . . .	130
B.3	Configuration de la dimension de l'espace . . . . .	130
B.4	Sélection de la physique . . . . .	131
B.5	Sélection de type d'étude . . . . .	132
B.6	Définition des paramètres de simulation . . . . .	133
B.7	La géométrie sur COMSOL . . . . .	133
B.8	Les propriétés des matériaux . . . . .	134
B.9	Application des conditions aux limites . . . . .	135
B.10	Application de charge . . . . .	135
B.11	Étape de maillage . . . . .	136
B.12	Résultat . . . . .	137
B.13	Résultat en graphe . . . . .	137



---

## Liste des tableaux

---

1.1	Facteurs de mérite de Johnson des matériaux utilisés pour les applications de puissance hyperfréquence . . . . .	34
2.1	Les propriétés thermiques des matériaux. . . . .	55
2.2	Les propriétés physiques des matériaux. . . . .	58
3.1	Les résultats de l'optimisation thermique du HEMT. . . . .	98
3.2	Résultats de processus l'optimisation par les deux approches CMAES et KA-CMA-ES . . . . .	101
4.1	Distribution des paramètres. . . . .	119
4.2	Résultats de fiabilité. . . . .	120
4.3	Variables de conception. . . . .	121
4.4	Résultats de RBDO. . . . .	122

---

## Introduction générale

---

La mécatronique est une nouvelle approche combinant la mécanique et l'électronique. Cette approche a fait apparaître des phénomènes de défaillance qui n'ont pas été abordés en profondeur et qui ne sont de ce fait pas suffisamment maîtrisés. Plusieurs travaux du laboratoire sont consacrés à l'analyse des causes de défaillances des composants des systèmes électroniques embarqués. Ce projet consiste à identifier, analyser et modéliser les mécanismes de défaillance des produits mécatroniques afin de garantir une conception robuste.

Le sujet proposé est centré sur la modélisation des systèmes mécatroniques embarqués, il s'agit de modéliser le comportement mécanique des structures mécatroniques soumises à des chargements électrothermiques. Un modèle numérique sous le logiciel Comsol multiphysics est développé. Ce travail sera réalisé en plusieurs étapes, bien ordonnées pour assurer la bonne réalisation des tâches.

1. La première partie sera une étude bibliographique sur l'optimisation fiabiliste, les systèmes mécatroniques et les transistors de puissance hyperfréquence en général et les transistors à haute mobilité d'électron en particulier, en cherchant sur les différentes sources d'information et les bases des données scientifiques, pour avoir assez d'information sur les notions de base de ce travail.
2. La deuxième partie c'est pour la modélisation électro-thermomécanique du transistor à haute mobilité, par la méthode des éléments finis avec le logiciel Comsol multiphysics afin d'avoir une idée claire sur le comportement multiphysique du composant.
3. La troisième partie s'intéresse à la réalisation d'une étude d'optimisation du comportement thermomécanique du HEMT, en minimisant les effets thermiques et mécaniques sur la structure du composant. Les différentes méthodes d'optimisation utilisées seront détaillées.
4. La quatrième partie c'est pour réaliser une étude d'optimisation fiabiliste du HEMT. On commence d'abord par une étude de la fiabilité afin d'estimer le niveau de la fiabilité du composant. Par la suite, on va réaliser une étude d'optimisation fiabiliste afin d'optimiser le niveau de fiabilité.

La validation du modèle numérique développé permettra ensuite d'intégrer la modélisation des mécanismes de dégradation des composants mécatroniques afin d'estimer la durée de vie de ces

composants. La considération des incertitudes est l'un des aspects fondamentaux de ce travail. En d'autres termes, le développement d'une approche probabiliste permettant de tenir compte de la propagation des incertitudes dans les performances mécaniques des systèmes mécatroniques et par conséquent sur leur durée de vie. L'utilisation des algorithmes d'optimisation fiabiliste permettra de minimiser les coûts de production en assurant une conception robuste. En outre, l'utilisation de l'optimisation fiabiliste pour la conception des systèmes mécatroniques visera à garantir d'une part, la robustesse de conception de ces produits et d'autre part, à apporter les améliorations nécessaires pour faire face aux spécifications croissantes de fiabilité et de longévité. Le sujet présente des aspects de recherche actuels et très bien insérés dans le contexte socio-économique actuel. Il répond aux préoccupations des industriels liés à la fiabilité des systèmes mécatroniques. Notre rapport de thèse est divisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre, nous traiterons la mécatronique comme étant une discipline d'actualité qui répond aux défis du développement et de l'industrie. Nous expliquerons l'importance des transistors à haute puissance dans les systèmes mécatroniques, et en particulier le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT). On finira par les mécanismes des défaillances et leurs effets sur les performances et la fiabilité du composant.

Le deuxième chapitre, nous présenterons le modèle électro thermomécanique que nous avons développé spécifiquement pour la filière HEMT. Nous étudierons à l'aide de ce modèle le comportement multiphysique du composant, l'impact des conditions du fonctionnement et l'effet des différentes topologies sur le comportement électro thermomécanique du transistor. Ainsi l'impact de tous ces facteurs sur la fiabilité et les performances du HEMT.

Dans le troisième chapitre, on va présenter l'optimisation en mécanique. Puis on va définir l'optimisation évolutionnaire et ses principes. On détaillera par la suite la méthode CMA-ES avec ses paramètres, les métamodèles de Krigeage et comment on obtient la méthode KA-CMA-ES. Dans la partie suivante, on va développer un couplage entre le modèle éléments finis et le modèle statistique KA-CMA-ES, grâce à ce couplage on va résoudre le problème de l'optimisation. A la fin on va présenter les résultats extraits et on fera une comparaison de la variation de la fonction objectif avant et après l'optimisation.

Dans le quatrième chapitre, nous détaillerons l'application de l'optimisation fiabiliste hybride à la technologie HEMT. Dans un premier temps, on va commencer par une description des méthodes de l'analyse de fiabilité : FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second Order Reliability Method) et La méthode de Monte Carlo. Par la suite, on va définir les différentes méthodes de l'optimisation qu'on va utiliser dans ce chapitre. Dans la section suivante, nous expliquerons le processus de l'application de la méthode RBDO Hybride pour améliorer la fiabilité du HEMT. La section finale sera consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus par l'application de la méthode RBDO hybride sur le HEMT.

---

## Généralités sur les transistors à haute puissance

---

### Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>19</b>
<b>1.2</b>	<b>La mécatronique</b>	<b>19</b>
1.2.1	Définition	19
1.2.2	Système mécatronique	20
1.2.3	Ingénierie des systèmes mécatroniques	22
1.2.4	Mode de défaillance dans les systèmes mécatroniques	25
<b>1.3</b>	<b>Les transistors à haute puissance</b>	<b>28</b>
<b>1.4</b>	<b>Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT)</b>	<b>30</b>
1.4.1	Les caractéristiques électriques du HEMT	30
1.4.2	Les propriétés physiques des matériaux du HEMT	32
1.4.3	La topologie du HEMT	34
1.4.4	Les différentes couches du HEMT	36
1.4.5	Fonctionnement du HEMT	37
<b>1.5</b>	<b>Le HEMT dans les systèmes mécatroniques à haute puissance</b>	<b>39</b>
<b>1.6</b>	<b>Les mécanismes de dégradations du HEMT</b>	<b>42</b>
1.6.1	Les effets thermiques	42
1.6.2	Effets parasites et mécanismes de dégradation	43
<b>1.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>46</b>

---

## 1.1 Introduction

La mécatronique est une discipline qui combine entre la mécanique, l'électronique et l'informatique. Actuellement, les systèmes mécatroniques embarqués connaissent une forte croissance, ils se présentent fortement dans de nombreux domaines. Par exemple, le domaine de la télécommunication avec des technologies innovantes, l'industrie automobile, l'aéronautique, etc. Assurer et évaluer la fiabilité de ces systèmes reste un défi majeur. En effet, lors de leur fonctionnement, les systèmes mécatroniques embarqués sont sollicités par des charges de différentes causes : climat (température, humidité), vibrations, électricité et électromagnétisme [6]. La plupart des défaillances des dispositifs mécatroniques sont causées par des effets thermiques, à cause de l'auto-échauffement de leurs composants. Afin de satisfaire aux attentes en matière de fiabilité, chaque composant doit être optimisé de manière fiable.

Les transistors à haute puissance sont parmi les composants les plus essentiels dans un système mécatronique, grâce à plusieurs fonctions qu'ils assurent. De plus, ils possèdent plusieurs caractéristiques physiques, qui lui permettent de fonctionner efficacement [7]. Les transistors à haute puissance peuvent se trouver sous plusieurs types, en fonction des systèmes d'utilisation et la fonction à assurer [8]. Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) est parmi les meilleurs éléments de cette famille, grâce à ses propriétés physiques et à son principe de fonctionnement qui est très particulier et très développé par rapport aux autres types de transistors, ce principe se base sur la création d'un gaz bidimensionnel d'électron (ou gaz 2-DEG) entre la couche de GaN et celle de AlGa<sub>N</sub>, pour assurer une grande mobilité des électrons à travers. Ce type de composant subit à plusieurs effets, les plus reconnus sont les effets thermiques, les effets pièges et les effets piézoélectriques. Ces mécanismes de dégradation seront détaillés dans la suite [9].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les systèmes mécatroniques : leur ingénierie et leurs modes de défaillance. Puis, on va faire un aperçu sur les différents types des transistors à hautes puissances. Dans la suite, on s'intéresse à l'étude du transistor à haute mobilité d'électron en réalisant une étude bibliographique de cette technologie, afin d'avoir une idée sur sa topologie, ses caractéristiques électriques et les propriétés physiques de ses matériaux. On abordera aussi le principe du fonctionnement de ce composant. Dans la section finale, on va détailler les mécanismes principaux de dégradations : thermiques, pièges et piézoélectriques.

## 1.2 La mécatronique

### 1.2.1 Définition

La Mécatronique peut être définie comme une nouvelle approche combinant la mécanique, l'électronique et l'informatique. L'origine du terme mécatronique (mechatronic en Anglais) vient pour la première fois d'une compagnie japonaise ; Yaskawa en 1969, à travers l'un de ses ingénieurs. Le terme combine deux parties : la première « mecha » pour désigner la mécanique et la deuxième « tronic » pour désigner l'électronique. La mécatronique peut avoir plusieurs définitions comme celle de la norme française NF E 01-010 "approche visant à l'intégration synergique de la mécanique, de l'électronique, de la théorie du contrôle et de l'informatique dans la conception et la fabrication de produits, afin d'améliorer et/ou d'optimiser ses fonctionnalités". La mécatronique a été définie par le Comité Consultatif de Recherche Industrielle et de dévelop-

pement de la Communauté Européenne comme étant une combinaison de l'ingénierie mécanique de précision, du contrôle électronique et du programme informatique pour concevoir et fabriquer des produits. Le comité établit le critère multidisciplinaire de la mécatronique qui rassemble de différents domaines d'activité et plusieurs technologies dans le processus de la conception et la fabrication d'un produit [10, 11].

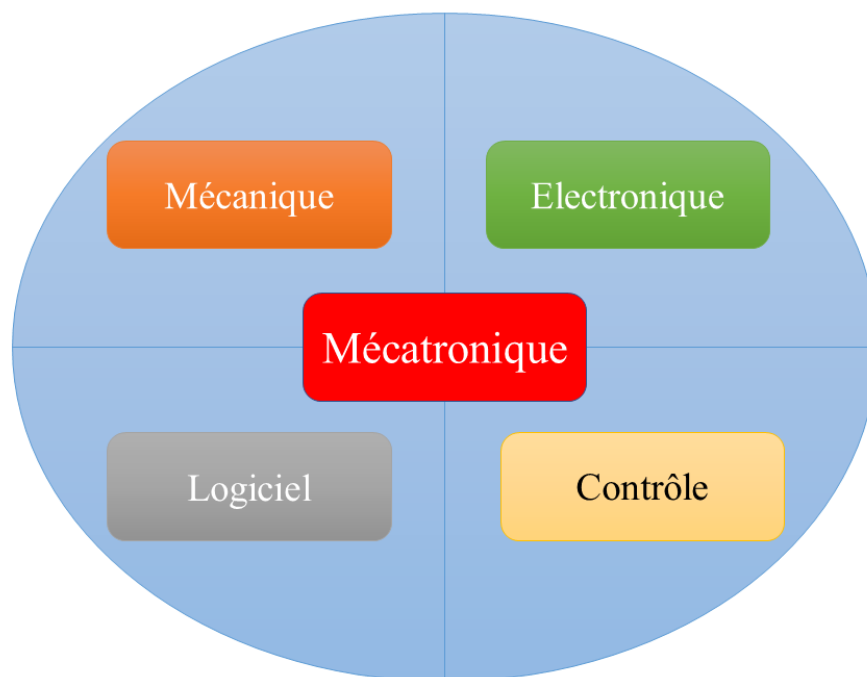


FIGURE 1.1 – La mécatronique.

La mécatronique n'est pas essentiellement une science ou une technologie, mais elle doit être considérée comme une attitude ou une manière fondamentale d'observer et de faire des choses. Par sa nature, elle exige une approche unifiée [11]. La mécatronique est ainsi une démarche rigoureuse, adaptée et concentrée sur l'optimisation des systèmes du point de vue du développeur. Cette approche globale permet aussi d'augmenter la fiabilité des systèmes exposés à des environnements éprouvants en réduisant les coûts [10].

### 1.2.2 Système mécatronique

Les systèmes mécatroniques ont joué un rôle très important dans la conception et la fabrication des systèmes complexes, ils ont créé une grande révolution dans le monde industriel avec ses différents domaines. Ces systèmes intègrent de la mécanique qui représente la partie opérative, de l'électronique et de l'informatique (logiciel) qui représente le système du pilotage, ce principe est simplifié dans un schéma comme le montre la figure 1.2. Ces systèmes peuvent intégrer aussi des systèmes thermiques, hydrauliques ou pneumatiques. L'exemple du schéma montre qu'il est nécessaire de concevoir un système sous forme d'un ensemble autant que possible [11].

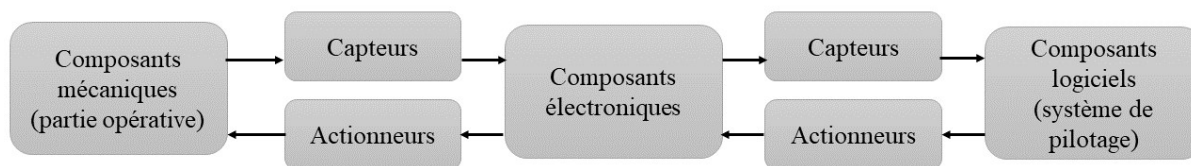


FIGURE 1.2 – Système mécatronique.

Le plus grand problème de ces systèmes mécatroniques est lié à l'évaluation de leur fiabilité qui est une préoccupation qui devient de plus en plus importante, poussée à la fois par l'évolution des technologies et par les demandes du marché. Cette fiabilité est souvent ressentie, par les industriels, comme étant l'un des points les moins maîtrisés et, pour certains, c'est le point le plus critique pour le déploiement et l'avenir des technologies mécatroniques.

Les méthodes d'évaluation de cette fiabilité dans ces différents domaines (mécanique, électronique et logiciel) sont en effet très différentes les unes des autres. Actuellement, il n'existe pas de procédé permettant de mesurer la fiabilité des systèmes intégrant plusieurs technologies, notamment ceux mêlant hydraulique et électronique ou l'expérience accumulée par l'industrie est faible. Les problèmes de ces systèmes mécatroniques résident aussi dans l'incompréhension et le manque de dialogue entre les différents domaines impliqués dans un développement mécatronique et sont souvent identifiés comme la cause principale des délais ou des erreurs commises.

La croissance des systèmes mécatroniques dans l'industrie (l'industrie automobile en particulier) a fait apparaître de nouvelles contraintes, telles que d'assimiler différentes technologies, combiner plusieurs entités fonctionnelles, prendre en compte la dynamique du système et aussi il est impossible d'effectuer des tests exhaustifs.

Afin de résoudre le problème majeur des systèmes mécatroniques, les concepteurs et les utilisateurs ont montré un grand intérêt pour l'évaluation de la fiabilité du système global, autrement dit pour la partie matérielle et pour la partie logicielle. Actuellement, la modélisation de la fiabilité du matériel et celle du logiciel ont pris des orientations différentes et sont souvent conduites séparément. Dans le cas d'un matériel comme pour un logiciel, la fiabilité décroît avec le temps si on ne répare pas mais elle croît avec le temps, dans le cas du logiciel, si on corrige les défauts. Malgré toutes ces contraintes, la mécatronique apporte des avantages indéniables comme : la minimisation des charges et des coûts, la proposition des solutions innovantes qui satisfait les besoins des clients. Tout ça se fait en répondant positivement aux exigences qui deviennent de plus en plus importantes actuellement, la réponse aux contraintes de la qualité, coût et la disponibilité imposés forcément par l'évolution rapide du marché, nécessite le développement d'une nouvelle approche de concevoir et fabriquer les systèmes afin de pouvoir intégrer des différentes technologies fiables dès la première phase de préparation [11, 1].

### 1.2.3 Ingénierie des systèmes mécatroniques

La concurrence dans le domaine industriel devient de plus en plus importante vu le développement rapide des besoins dans les différents domaines. D'où, l'adoption de la méthode traditionnelle qui se base sur l'enchaînement séquentiel des différents métiers (mécanique, électronique, etc.) pour concevoir, fabriquer, assembler et finalement distribuer n'est plus efficace. Dans ce sens, les projets actuellement deviennent multidisciplinaires dans la phase du développement et de la conception des systèmes qui ont devenu co-produits. En mobilisant des équipes affectées dans plusieurs services de la même entreprise ou par l'association des différentes entreprises sur le même projet. Par conséquent, il sera possible de développer rapidement des produits de haute qualité avec des coûts très compétitifs. Grâce à la mise en place d'un processus efficace du développement de produits en assurant un environnement d'équipes pluridisciplinaires, créatives et très performantes.

Généralement, la nouvelle stratégie de décision nécessite la mise en parallélisation d'un certain nombre d'activités de conception appelé ingénierie concourante. Cette ingénierie est un processus basé sur l'engagement parallèle des services, activités, tâches et des métiers nécessaires au développement du système. L'ingénierie concourante permet d'optimiser et améliorer la démarche de conception de projets collaboratifs, et d'assurer la meilleure coordination entre les parties essentielles du projet. La contribution principale de l'ingénierie concourante est avant tout un gain en termes de qualité et de temps.

La mise en place de l'ingénierie concourante comme dans le cas de l'ingénierie des systèmes mécatroniques, nécessite d'optimiser l'enchaînement des tâches en intervenant tous les éléments nécessaires et compatibles aux systèmes mécatroniques telles que : Analyse, spécification, conception, fabrication, vérification et validation que nous allons détailler dans la suite. La création et le développement d'un système mécatronique nécessite une équipe multidisciplinaire (mécanicien, électronicien, automaticien, etc) à cause de sa complexité. Cette équipe doit adopter le processus de l'ingénierie concourante qui est constitué d'un enchaînement logiques des étapes du développement des systèmes mécatroniques [11, 1].

#### Cycle de développement

Les systèmes complexes résultent d'une combinaison des sous-systèmes de différentes technologies, ce qui représente leur caractéristique principale. Le cycle en V est le premier modèle adopté pour le développement, des différentes technologies telles que la mécanique, électronique ou logiciel. Par la suite, il est généralisé au développement des systèmes mécatroniques en particulier, et des systèmes complexes en général, dans le but d'obtenir une terminologie commune et de proposer une méthodologie globale, avec des étapes communes aux différentes technologies. Le modèle de développement selon le cycle en V intègre les différentes phases de développement, depuis la spécification jusqu'à la validation du produit comme le montre la figure 1.3 :



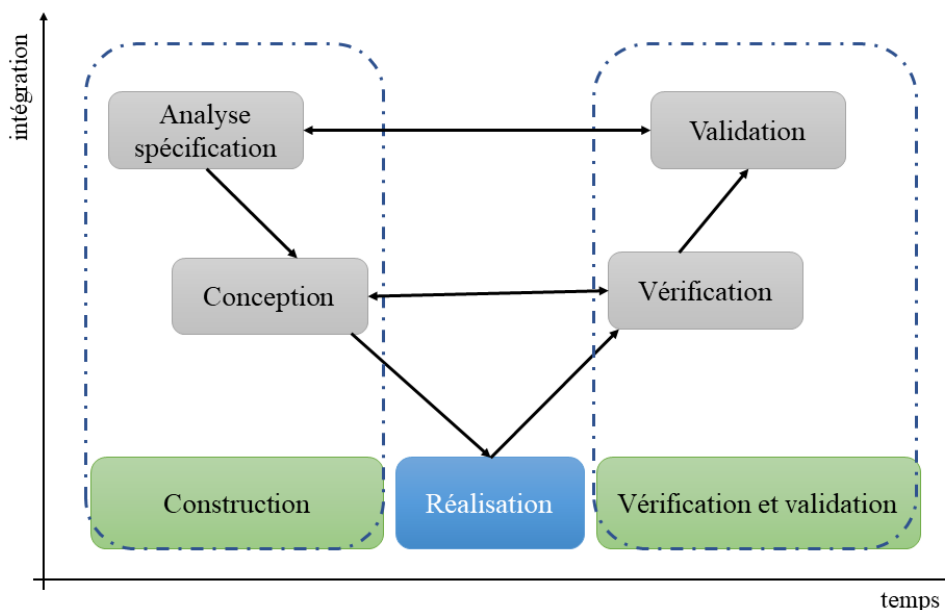


FIGURE 1.3 – Cycle V [1].

Le développement commence par la partie construction du système, dans la partie descendante du cycle en V, le système se décompose graduellement en ses divers sous-systèmes et modules jusqu'à ses composants. La partie de Vérification et Validation du système ou les composants qui représente la partie montante du cycle en V, dès que ces composants (ou systèmes) sont réalisés, ils seront intégrés dans des ensembles et des sous-systèmes plus grands, jusqu'à ce que le système complet sera bien construit. Par conséquent, on peut décrire le cycle en V comme étant une succession des cinq principales phases : analyse/spécification, conception, réalisation, vérification et validation [1].

### Analyse et Spécification

L'analyse des besoins et des spécifications représente la première phase dans le développement d'un système. Elle propose de définir les fonctionnalités, les interfaces, les exigences et les contraintes du système. Elle propose aussi de préparer un plan qualité et un plan de validation, étudier la faisabilité. Et finalement définir le niveau de la fiabilité souhaité du système. Pour un système mécatronique, la difficulté majeure est la traduction de la spécification système en spécifications particulières pour chaque composant selon les différentes technologies [1].

### Conception

La conception représente la deuxième phase du développement d'un système, qui commence par définir l'architecture du système, par suite les sous-systèmes et leur principe du fonctionnement, du plan de tests et de l'analyse des risques. La simulation du futur système qui combine toutes les technologies est effectuée dans le cas des systèmes mécatroniques. Dans cette phase, il faut prendre en considération la complexité du système et l'interprétation des spécifications par les différentes équipes [1].

### Réalisation

Quand on passe du résultat de la conception à un cycle d'activités d'industrialisation qui permet de fabriquer et assembler les composants d'un système, on est alors dans la phase de réalisation. Un fabricant ou un fournisseur des composants peut interpréter les spécifications légèrement différemment, malgré que les spécifications des composants pour le système mécatronique sont précises techniquement. Par conséquent, de livrer des composants qui ne sont pas complètement satisfaits aux spécifications [11, 1].

### Vérification

La phase de vérification est basée sur le test et la vérification de tous les modules ou sous-systèmes par rapport à la conception. Cette phase est complémentaire avec l'assemblage des modules et des sous-systèmes jusqu'à l'obtention du système final. Tester et vérifier la synchronisation des différents modules ou sous-systèmes du système mécatronique est une tâche difficile dans cette phase. Cette difficulté de synchronisation peut s'accroître à cause du manque des détails ou des ambiguïtés par rapport à la conception. Il est difficile aussi de détecter des changements de conception si la construction de système mécatronique n'est pas bien finie afin de réaliser des essais avec le système complet [11, 1].

### Validation

La phase validation fonctionnelle est très importante, elle permet de comparer les fonctionnalités et le niveau de qualité par rapport aux spécifications de cahier des charges et de besoins. La validation dans le cas d'un système mécatronique est un point sensible vu la combinaison et à l'interaction entre les différentes technologies. Par conséquent, le diagnostic et l'entretien du système mécatronique peut devenir plus difficile à cause de ces contraintes. Pendant le développement d'un système, le constructeur spécifie les objectifs à atteindre en termes de sûreté de fonctionnement et pas seulement les fonctionnalités. De plus, il est nécessaire actuellement d'intégrer la sûreté du fonctionnement dans l'approche système dès la première phase du cycle de développement. Cette intégration ramène à renforcer les études de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité, en complétant par la mise en place une méthodologie transversale qui favorise leur considération dans les projets et à travers les différents métiers liés au développement du système mécatronique. La procédure de validation pour vérifier que les objectifs ont été atteints doit accompagner la spécification de ces objectifs de sûreté de fonctionnement. Alors que, des méthodes et des techniques spécifiques de la sûreté de fonctionnement devront être appliquées pour atteindre les objectifs exigés tout au long du développement du système mécatronique. Notre objectif est d'évaluer quantitativement la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques en phase de conception afin de comparer les différents types d'architectures possibles proposées à l'issue des études en avance de phase.

### 1.2.4 Mode de défaillance dans les systèmes mécatroniques

Les systèmes mécatroniques en fonctionnement sont soumis à des mécanismes de défaillance et de vieillissement, ces mécanismes peuvent être liés aux conditions de fonctionnement ou bien à son environnement. La défaillance d'un équipement électronique d'un système mécatronique peut intervenir durant son cycle de vie. La durée de vie d'un équipement est composée généralement de trois phases principales qui sont en fonction des taux de défaillance spécifiques. Le taux de défaillance évolue suivant une courbe en baignoire composé de trois zones où la défaillance intervient lors de ces trois zones comme dans la figure 1.4 :

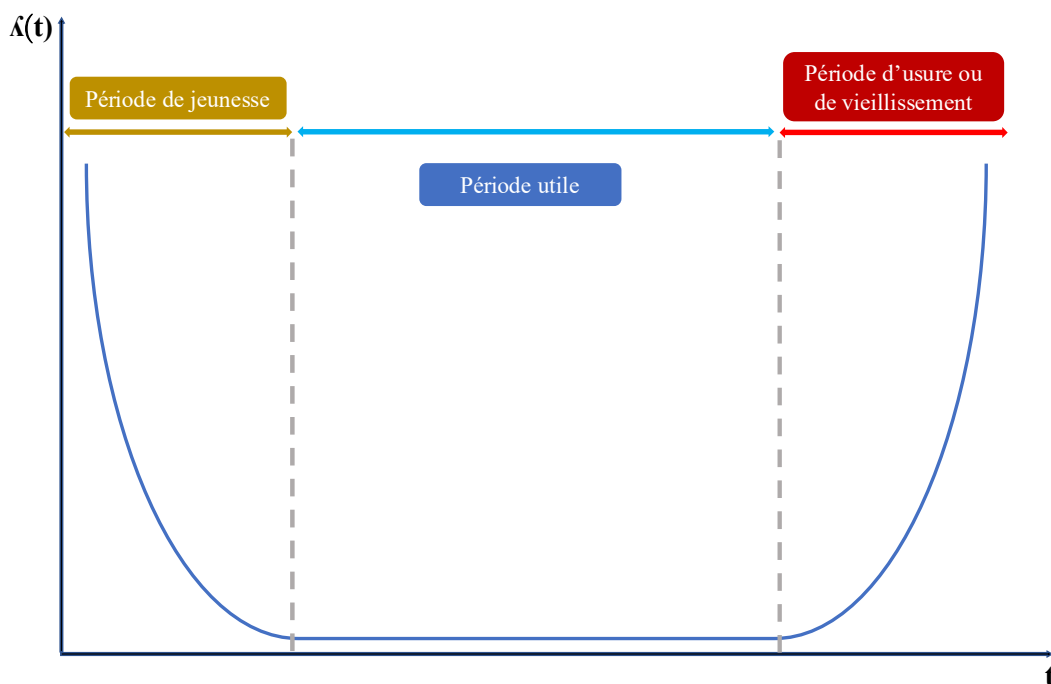


FIGURE 1.4 – Courbe en baignoire

**Zone de jeunesse :** est une période caractérisée par un taux de défaillance qui décroît en fonction du temps. Durant cette étape, les composants les plus fragiles ou présentant des défauts seront éliminés. Elle s'appelle en électronique la période de déverminage ou la période de rodage pour les matériels mécaniques. Elle traduit souvent les défaillances précoces causées par des problèmes de conception (mauvais dimensionnement ou design) ou par des défauts dans le processus de fabrication.

**Zone de vie utile :** Le taux de défaillance dans cette période est constant, d'autre part la défaillance est aléatoire et accidentelle. Autrement dit, la défaillance peut survenir principalement lorsque les conditions d'utilisation de l'équipement dépassent ses capacités nominales, et cette défaillance intervient instantanément. Ces modes de défaillance sont principalement dus à des causes externes au module. On considère souvent cette période comme période d'exploitation des composants, elle doit être supérieure ou égale à la durée de vie du composant.

**Zone d'usure ou de vieillissement** : durant cette période, le taux de défaillance augmente en fonction du temps. En effet, la durée de vie du composant n'est pas illimitée et le taux de défaillance augmente en fonction des sollicitations et du temps du fonctionnement. Cette période caractérise le vieillissement du composant à cause de plusieurs phénomènes physiques. Alors que la prédiction du vieillissement consiste à observer l'évolution du taux de défaillance. Ainsi, deux paramètres déterminants peuvent caractériser le vieillissement : l'instant d'apparition du vieillissement et la cinétique du vieillissement, une fois celui-ci est déclenché.

Dans les systèmes principaux comme les systèmes mécatroniques, les défaillances peuvent être causées par les sous-systèmes tels que les composants électroniques. On peut classer ces défaillances en deux familles : les mécanismes de surcharge et ceux d'usure :

- Le premier type (Les mécanismes de surcharge) amène à la défaillance du système sous l'effet d'une seule contrainte très forte qui dépasse le seuil de résistance maximale du composant. L'origine de la défaillance peut être mécanique ou électrique. La source de ces mécanismes peut être mécanique comme la rupture, la déformation plastique ou délamination inter faciale. Ou bien une source électrique telle que les radiations, les interférences électromagnétiques et autres.
- Le deuxième type (Les mécanismes d'usure) implique que l'action de défaillance est progressive et répétée pendant une longue période pour entraîner la panne du système. Celle-ci pourra se produire à une faible contrainte. Les origines de ces mécanismes peuvent être mécaniques (comme la fatigue, le fluage, usure), électriques (électromigration) et chimiques (corrosion, diffusion). Tous ces mécanismes sont classés dans le schéma de la figure 1.5. Dans la suite, on va détailler quelques mécanismes de défaillance les plus remarquables dans les systèmes mécatroniques [12].

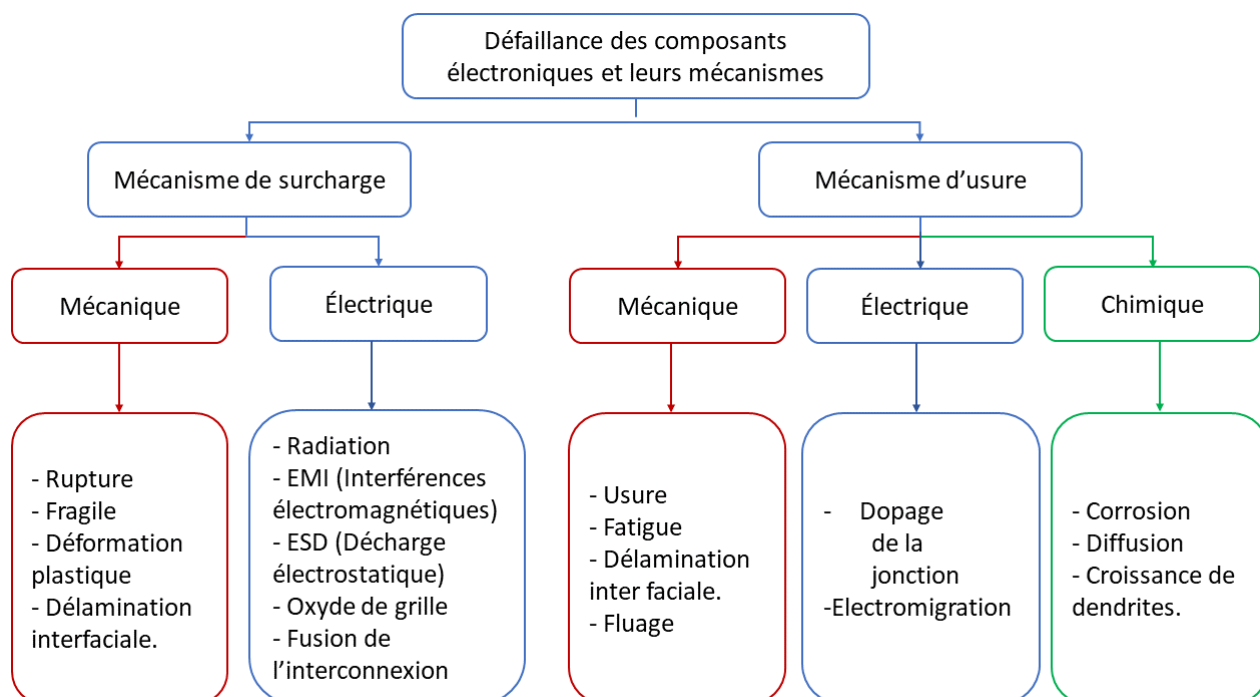


FIGURE 1.5 – Les défaillances des composants électroniques

**Fluage :** Sous des températures élevées, un matériau soumis à une contrainte inférieure ou supérieure à sa limite d'élasticité, présente une déformation plastique qui évolue en fonction de temps et peut mener éventuellement à la rupture. On parle alors du phénomène de fluage, il peut être la cause principale de la diminution de la durée de vie de certains matériaux, surtout pour ceux qui ont une faible température de fusion [12].

**Friction :** C'est un phénomène physique issu du frottement solide causé par le mouvement entre deux matériaux en contact. Il est difficile à modéliser par rapport au frottement fluide qui peut être modélisable en première approximation à une composante linéaire. Ce mécanisme peut entraîner des problèmes d'usure mécanique, de la génération de débris qui peuvent, à leur tour, être assimilés à des particules contaminantes [12].

**Fracture des substrats et des puces :** La plupart des matériaux utilisés dans le multicouche des composants électroniques sont fragiles. Par exemple, le silicium et le substrat à base de céramique répondent aux lois des matériaux dont le principal aspect en termes de fiabilité reste le fait qu'une rupture du matériau peut apparaître sans fatigue ni déformations plastiques préalables, puisque ces matériaux ont un comportement plus fragile que ductile. Ceci est à cause de la présence des micro-fissures qui dépassent une certaine longueur critique et suffisante pour ramener à la rupture. Ce type de défaillance apparaît dans la plupart des cas directement après la mise en service du composant. Mais les défauts qui ne dépassent pas une longueur critique peuvent se développer sous un chargement cyclique. Des ruptures du substrat peuvent être trouvées lors de sa phase de montage sur la plaque de refroidissement lorsque celle-ci présente des défauts de planéité, ce qui entraîne la mise en court-circuit de la puce. Les mêmes ruptures peuvent être remarquées dans la puce lors de chocs thermiques dans le cas où celle-ci est au départ relativement froid et génère un flux important entraînant de forts gradients de température [12].

**Fatigue thermique :** Dans les systèmes mécatronique en général et les sous-systèmes électroniques en particulier, la fatigue thermique représente la défaillance principale au cours de la durée du fonctionnement. Son impact est en fonction du type de sollicitations auquel est soumis le composant, comme les amplitudes thermiques qui induisent des contraintes thermo-mécaniques. Elles peuvent être des amplitudes thermiques importantes, mais apparaissant juste pendant la mise sous tension du module : le module passe alors d'une température ambiante, voire froide dans certains cas, à la température du fonctionnement. Comme elles peuvent être des amplitudes thermiques plus faibles, mais qui se répètent tout au long du parcours lors des différentes sollicitations sur un profil de mission donné en fonction de la puissance qui est demandée. Les équipements électroniques se constituent de plusieurs composants avec des matériaux différents. La fatigue concerne tous les composants de ces équipements et surtout les interfaces de deux matériaux différents. Pendant l'échauffement de l'équipement électronique, les matériaux se dilatent à des différentes amplitudes ce qui induit des contraintes et des déformations au sein de leur structure. Ces déformations peuvent devenir irréversibles et permanentes au cours des cycles thermiques. L'initiation d'une microfissure et la fatigue du matériau peuvent être engendrées par l'accumulation de ces déformations [1].

### 1.3 Les transistors à haute puissance

Dans les applications à haute puissance, comme les radars ou les stations de base, etc. La présence et le choix des composants électroniques est très important. Dans ce sens, les transistors à haute puissance jouent un rôle très important dans le bon fonctionnement de ces systèmes. Ils se trouvent en plusieurs types, parmi les types les plus connus on trouve :

- Le transistor bipolaire Si : Le transistor bipolaire à base de Silicium est une technologie parfaitement maîtrisée, avec un faible coût de fabrication. Malgré cela, elle n'est que rarement utilisée pour l'amplification de puissance en bande-S, du fait de sa limitation en fréquence, qui se manifeste surtout par des gains d'amplificateurs assez faibles [8].
- Transistor LDMOS : La technologie LDMOS (Laterally Doped Metal Oxyde Semiconductor) silicium possède des performances compatibles avec l'amplification en bande-S (2-3 GHz). Cependant, elle reste limitée au-delà de cette bande. En plus, les transistors discrets en silicium de forte puissance basés sur des plates-formes technologiques bipolaires et, en particulier, LDMOS, sont au cœur des amplificateurs de puissance linéaires requis par toutes les stations de base sans fil 2G, 3G et 4G. Ces structures de dispositifs à base de silicium ont historiquement été la technologie de choix en raison d'une combinaison de performances RF (Radio-Fréquence), de coûts et de la capacité à répondre aux limitations pratiques associées aux exigences de la chaîne d'approvisionnement qui ne peuvent être satisfaites que par la production en grand volume de 150 mm à 200 mm de dispositifs MOS [13].



FIGURE 1.6 – Transistor LDMOD Si

- Le transistor HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) : des technologies comme le HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) AsGa sont apparues comme des solutions. Afin de pallier les problèmes de montée en fréquence des transistors à base de Silicium. Cette technologie est très adaptée pour l'amplification en bande-S, mais aussi pour des fréquences bien supérieures. Le HBT bande-S a été développé afin d'améliorer le rendement en puissance ajouté des amplificateurs utilisant la technologie LDMOS. Cependant, il

n'existe que très peu d'offres commerciales en bande-S, et il s'agit la plupart du temps de filières de composants discrets de puissance.

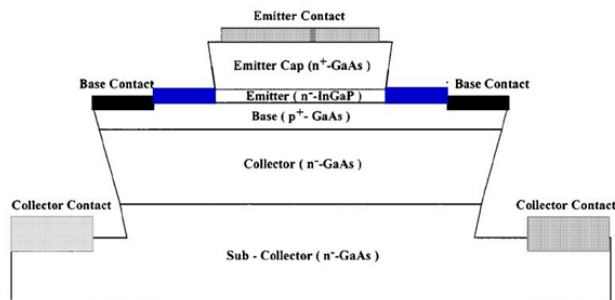


FIGURE 1.7 – Le transistor HBT AsGa

- Le transistor MESFET SiC : Les premiers transistors MESFETs (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) SiC (figure 1.8) ont été réalisés à partir du polytype 6H-SiC pour leur bonne qualité cristalline, mais rapidement le polytype 4H-SiC est apparu plus intéressant car il possède une mobilité deux fois supérieure à celle du 6H-SiC. Cependant, les transistors MESFET possèdent des fréquences maximales d'oscillation environ deux fois inférieures aux HEMT GaN. L'inconvénient de la structure MESFET est la présence de la grille métallique Schottky qui limite la tension de polarisation directe sur la grille pour activer la diode Schottky. Par conséquent, il est difficile de réaliser des circuits avec un grand nombre de MESFET.

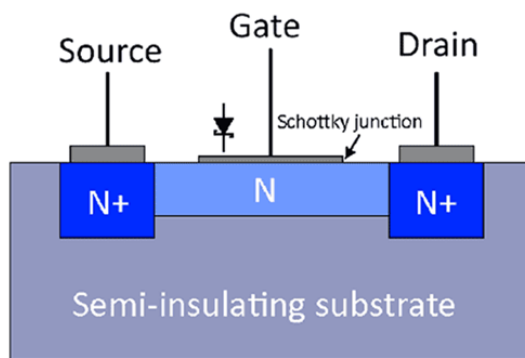


FIGURE 1.8 – Le transistor MESFET

- Le transistor HEMT GaN : Le transistor HEMT GaN fait l'objet depuis quelques années de très nombreux travaux de recherche grâce à ses caractéristiques qui ont montré des excellents résultats. Des transistors de petit développement (246 $\mu$ m) ont permis de démontrer des densités de puissance record de 40W/mm à 4 GHz. De même, des amplificateurs de forte puissance (supérieures à 100W) ont pu être réalisés, leurs transistors constitutifs atteignant alors des densités de puissance de l'ordre de 10W/mm, D. Maier et al. ont ainsi démontré le fonctionnement de transistors HEMT InAlN/GaN jusqu'à des températures de 800 °C dans l'air et jusqu'à 1000 °C sous vide. d'où le transistor HEMT reste le meilleur candidat pour les utilisations à haute puissance [14]. Dans le cas des transistors HEMT AlGaIn/GaN, la couche AlGaIn placée au-dessus du canal peut ne pas

être dopée, à la différence des transistors à base de GaAs. L'accumulation des électrons dans le canal est le résultat de l'effet cumulé de la polarisation spontanée présente dans les matériaux AlGa<sub>N</sub> et GaN, mais aussi de la polarisation piézoélectrique dans l'AlGa<sub>N</sub>. De plus, cette technologie n'est pas limitée à la bande-S et de nombreux travaux et réalisations d'amplificateurs de puissance couvrent différentes bandes, de la HF aux bandes Ku et Ka. Enfin, cette technologie est adaptée pour la réalisation de switches, LNA ou autres, permettant de concevoir des chaînes complètes d'émission/réception dans la même technologie [8].

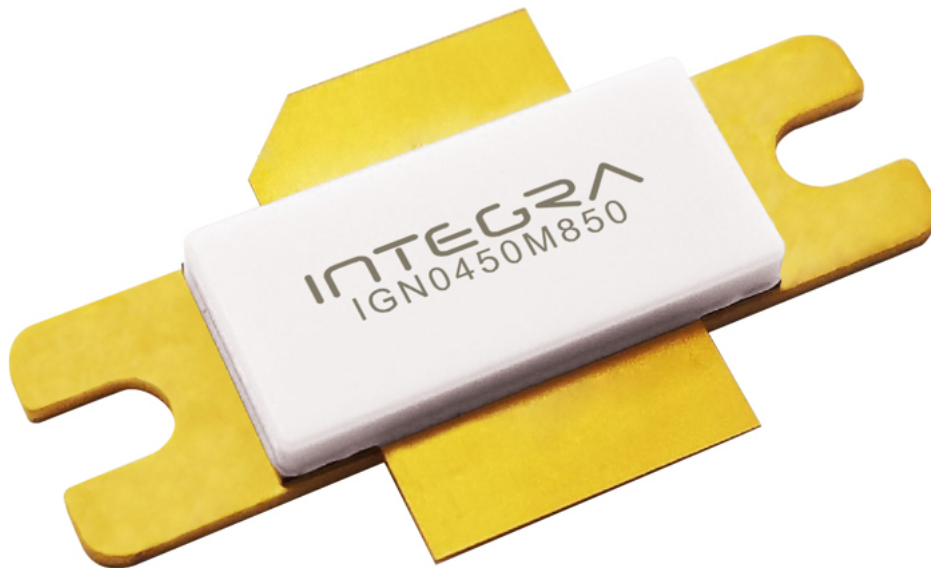


FIGURE 1.9 – Le transistor à haute mobilité d'électron.

## 1.4 Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT)

### 1.4.1 Les caractéristiques électriques du HEMT

Le transistor HEMT possède plusieurs caractéristiques électriques, qu'il faut savoir pour bien comprendre son principe de fonctionnement et avoir une idée sur l'origine de plusieurs phénomènes qui apparaissent. La particularité du HEMT, comparé aux autres types de transistors à effet de champ, provient de l'utilisation d'une hétérojonction. L'originalité de cette structure est la séparation spatiale des électrons libres qui participent au courant et des donneurs ionisés afin d'obtenir une haute mobilité des porteurs. Le matériau grand gap dopé, où règne un champ électrique important, diffuse les charges dans le matériau à plus faible bande interdite et forme un gaz à deux dimensions à l'interface. Les charges électriques du gaz 2D sont ainsi séparées de la région dopée, ce qui permet aux électrons d'acquérir une mobilité importante, les effets de diffusion par les impuretés ou le champ étant limités. En effet les ions donneurs participent aux effets de diffusion et limitent la mobilité électronique [15].



### Le courant drain source

Le courant drain source  $I_{ds}$  circule entre le drain et la source lorsqu'on applique une tension drain source  $V_{ds}$  en maintenant la tension grille source  $V_{gs}$  à une valeur constante. On peut séparer les caractéristiques en deux régions : une région linéaire dans laquelle le courant  $I_{ds}$  augmente en fonction de la tension  $V_{ds}$ , et une région dite de saturation due à la saturation des électrons où le courant de drain est sensiblement indépendant de la tension  $V_{ds}$ . Quand la tension  $V_{gs}$  augmente en valeur absolue, la diminution de la profondeur du puits de potentiel à l'hétérojonction entraîne celle de la densité surfacique des électrons, et donc du courant  $I_{ds}$ . Pour une tension de grille  $V_{gs}$  suffisamment négative, le canal est pincé. On peut définir cette tension de seuil comme une tension de pincement. La concentration des porteurs dans le canal est en fonction de l'épaisseur et du dopage de la zone de grand gap, ce qui rend la maîtrise de la tension de pincement difficile, créant une certaine dispersion technologique. Afin de modéliser le courant drain source de HEMT, il faut prendre en considération la contribution de trois éléments [8, 16] :

- Le courant principal résultant du déplacement des électrons du gaz bidimensionnel dans le puits quantique à l'interface de l'hétérojonction.
- Le courant de l'effet MESFET parasite sous la grille, dû à une déplétion incomplète.
- Les éléments parasites résistifs des chemins d'alimentation de drain, grille et source du transistor induisent des chutes des tensions  $V_{ds}$  et  $V_{gs}$ , et donc une diminution du courant  $I_{ds}$  et de la transconductance extrinsèque.

Enfin, il existe des tensions de claquage entre la grille et la source ( $V_{bgs}$ ), également entre la grille et le drain ( $V_{bgd}$ ), au-delà desquelles il se produit un phénomène d'avalanche (ou breakdown). Cette caractéristique est particulièrement importante en grand signal, car elle indique la limite des tensions de commande du transistor.

### La transconductance

La transconductance est l'expression du mécanisme de commande d'un transistor à effet de champ : c'est la variation du courant de drain en fonction de la polarisation de grille, à tension drain source constante. Les HEMTs se distinguent de tous les autres transistors à effet de champ par leur transconductance élevée. Elle est définie comme suit :

$$gm = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right|_{I_{ds}=C_{st}} \quad (1.1)$$

### La conductance

La conductance de sortie interprète la variation du courant de drain en fonction de la tension  $V_{ds}$  à polarisation de grille constante. Elle représente un indicateur de la saturation du courant drain source. Elle s'exprime comme suite :

$$g_{ds} = \frac{1}{R_{ds}} = \left. \frac{\partial I_{ds}}{\partial V_{ds}} \right|_{V_{gd}=C_{ste}} \quad (1.2)$$

### La capacité grille drain

Cette capacité grille drain représente les effets réactifs entre les deux électrodes (grille et drain). Elle reste très faible en régime saturé, son effet apparaît surtout en hautes fréquences ou dans le cas où la grille est chargée par une haute impédance. Elle est définie par :

$$C_{gd} = \frac{\partial Q}{\partial V_{gs}} \quad (1.3)$$

où  $V_{gs}$  représente la tension grille-source.

### La fréquence de transition

La fréquence de transition  $f_t$  est l'un des paramètres généraux qui caractérisent le HEMT, elle représente la fréquence pour laquelle le module du gain en courant est égal à 1. Cette fréquence est définie pour le transistor intrinsèque (transistor sans ses éléments d'accès), elle s'exprime comme suite [16] :

$$f_t = \frac{gm}{2\pi \cdot (C_{gs} + C_{gd})} \quad (1.4)$$

cette fréquence est en fonction de la transconductance ( $gm$ ), la capacité grille-source ( $C_{gs}$ ) et la capacité grille-drain ( $C_{gd}$ ).

## 1.4.2 Les propriétés physiques des matériaux du HEMT

Les propriétés physiques de ces différents matériaux ont un impact sur les performances électriques et thermiques des composants. Les composants hyperfréquences ont d'abord été réalisés en silicium (Si), puis en arséniure de gallium (GaAs) et phosphure d'indium (InP). Depuis quelques années l'amélioration des techniques de croissance des matériaux III-N ont permis d'envisager leur utilisation pour la fabrication de ces composants [17]. La compréhension du fonctionnement de cette technologie est liée fortement à la compréhension des propriétés physiques des matériaux de construction, dans la suite de cette partie on va citer les propriétés les plus importantes dans la structure de la technologie HEMT.

### Bande interdite

La bande d'énergie interdite  $EG$  d'un semi-conducteur, définie par la théorie des bandes, quantifie l'énergie nécessaire à la création d'un porteur libre par ionisation thermique des atomes du cristal. C'est le principe de base de tout matériau semi-conducteur. En physique du solide, la probabilité que ce porteur participe à la conduction électrique est régi par la statistique de Fermi-Dirac. En pratique, cela signifie que la concentration intrinsèque ni des électrons (ou trous) libres d'un matériau dépend de sa température [18] :

$$ni = T_2^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{EG}{2kT}} \quad (1.5)$$

La largeur de bande interdite de matériau GaN à 300K est  $EG_{GaN} = 3,39eV$ .

### Mobilité électronique

La vitesse moyenne des porteurs dans le réseau est proportionnelle au champ électrique appliqué. La mobilité  $\mu$  est ce coefficient de proportionnalité. Pour les faibles champs électriques, la mobilité est constante ( $\mu = \mu_0$ ), la vitesse moyenne est qualifiée de vitesse de dérive  $V_d$  et le composant fonctionne en régime de mobilité. La mobilité sera d'autant plus grande que le cristal sera pur et que la masse effective ( $m^*$ ) des porteurs sera faible [19].

$$\mu_0 = \frac{q\tau}{m} \quad [\text{cm}^2/\text{V/s}] \quad (1.6)$$

avec :

$\tau$  : le temps de relaxation des porteurs.

$m$  : la masse effective des porteur.

$q$  : la charge élémentaire.

### Conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité d'énergie sous forme de chaleur, flux ou puissance, transmise par un matériau sous une différence de température, autrement elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température, elle est liée aux autres paramètres physiques par la loi de Wiedemann-Franz qui s'exprime comme suit :

$$K = L.T.\sigma \quad (1.7)$$

où  $L$  est le nombre de Lorentz ( $2,45.10^{-8} \text{ W}.\Omega/\text{K}^2$ ),  $T$  la température en  $\text{K}$ ,  $\sigma$  la conductivité électrique en  $\text{S/m}$  et  $K$  la conductivité thermique en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Une conductivité thermique élevée favorise le transport de chaleur entre les points chauds du composant et les sources froides, et assure une conductivité thermique élevée, ce sont les intérêts du matériau [20, 8].

### Facteur de mérite

Le facteur de mérite de Johnson permet de comparer les semi-conducteurs entre eux et d'identifier ceux qui sont les plus adaptés aux applications à haute fréquence et forte puissance, il a pour expression :

$$JM = E_c^2 v_{sat}^2 / 4\pi^2 \quad (1.8)$$

Cette expression est en fonction de champ de claquage  $E_c$  et de la vitesse de saturation  $v_{sat}$  du semi-conducteur. Les matériaux les plus adaptés pour les applications hyperfréquences de puissance, sont ceux qui ont des facteurs de mérite plus élevés. Les valeurs du facteur de mérite des différents matériaux utilisés dans les applications hyperfréquences sont regroupées dans le tableau suivant [21] :

Facteur de mérite de Johnson				
Si	GaAs	SiC	GaN	Diamant
1	2,7	20	2 7,5	50

TABLE 1.1 – Facteurs de mérite de Johnson des matériaux utilisés pour les applications de puissance hyperfréquence

Le GaN possède un facteur de mérite plus élevé que celui des autres matériaux, notamment le GaAs qui était utilisé depuis plusieurs années pour la réalisation des composantes hyperfréquences [22]. La connaissance de ces propriétés est nécessaire pour bien choisir les matériaux convenables, pour des applications hyperfréquences.

### 1.4.3 La topologie du HEMT

Le HEMT se caractérise par une structure particulière qui se compose de plusieurs couches de différents matériaux, une couche en carbure de silicium qui représente le substrat sur lequel on construit le composant, une couche de nucléation qui sert à réaliser un accord des mailles entre le substrat et le GaN, une couche de GaN qui contient le 2DEG dans sa partie supérieure, AlGaIn sert à créer une hétérojonction avec la couche de GaN et autres couches qui assurent autres fonctions [23, 24].

Après une étude bibliographique, on a constaté que le HEMT a plusieurs structures, comme le montre la figure 1.10 : La structure (A) a été utilisée par Lény pour faire une modélisation thermique de ce type de transistor et mesurer sa température par des méthodes pratiques [21]. D'autre part Alim et al ont utilisé la structure (B) pour étudier la corrélation entre la température et la mobilité des électrons [25], et afin d'observer l'influence de fied plate sur la température maximale du transistor, Kara a choisi la structure (C) [26]. Kang a réalisé des simulations thermiques du transistor HEMT avec un substrat en nitrure d'aluminium AlN par la structure (E) [27], et dans le cadre d'une étude de l'influence des contacts ohmiques sur la puissance dissipée  $T_{Ref}$  a utilisé la structure (D) [28], d'autre part Stone Cheng a considéré la structure (F) dans son article pour étudier les effets de la conception de la structure et de son procédé de fabrication sur les performances du dispositif et de l'appareil, la résistance thermique a été étudiée aussi [29]. Autres structures différentes de celles qu'on a cité ont été utilisées dans d'autres travaux. On remarque clairement qu'il y a une différence entre ces structures concernant la topologie et les matériaux utilisés, tout cela nous ramène à conclure que le transistor à haute mobilité est une technologie qui est encore de développement et d'amélioration, afin de trouver la meilleure structure du HEMT qui permet d'augmenter la performance et sa fiabilité.

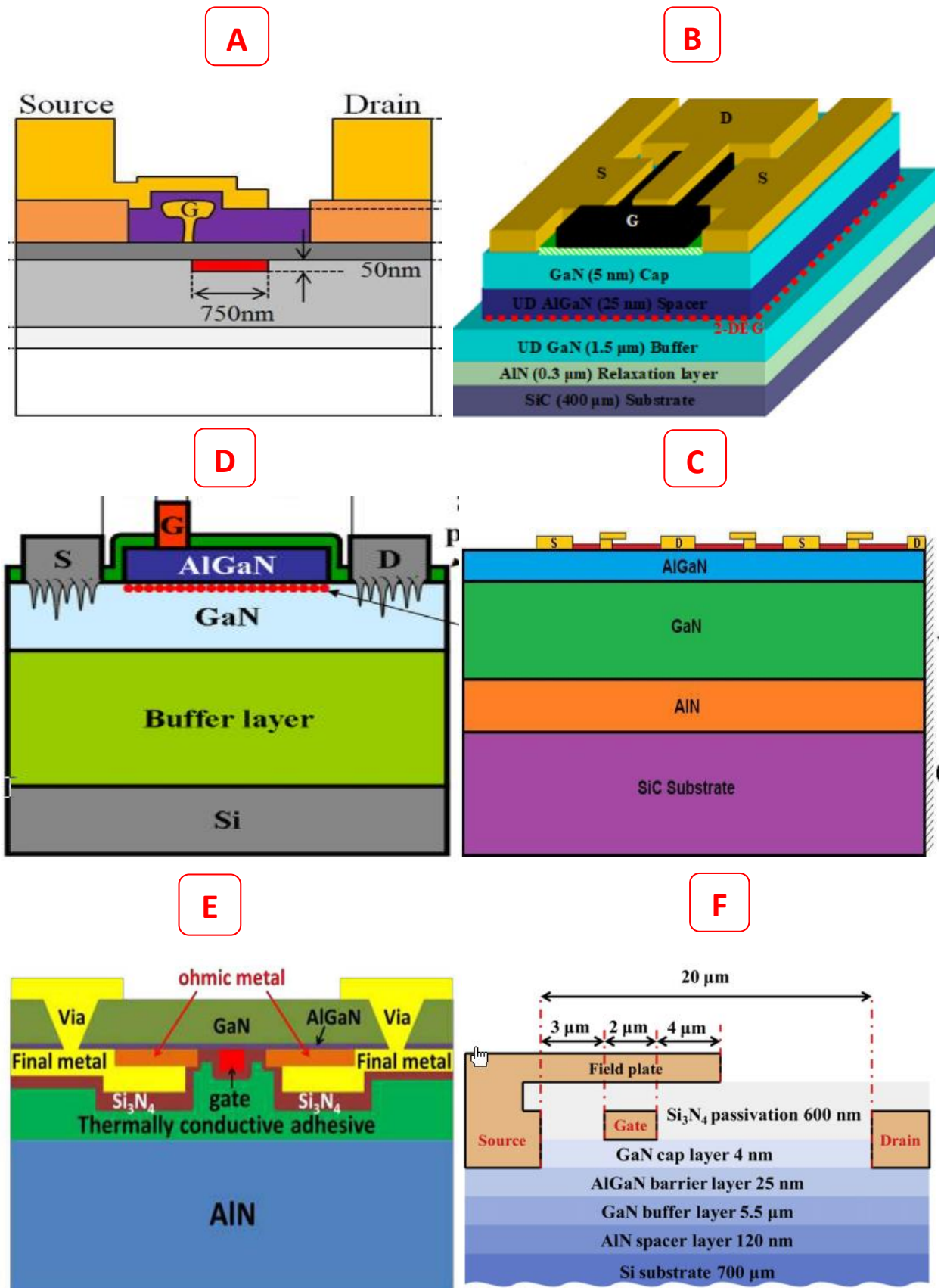


FIGURE 1.10 – Les différentes topologies du HEMT.

#### 1.4.4 Les différentes couches du HEMT

D'après la figure 1.10, on remarque que le HEMT est composé de plusieurs couches de matériaux, chacune assure une fonction bien déterminée. La figure 1.11 montre la structure complète du HEMT.

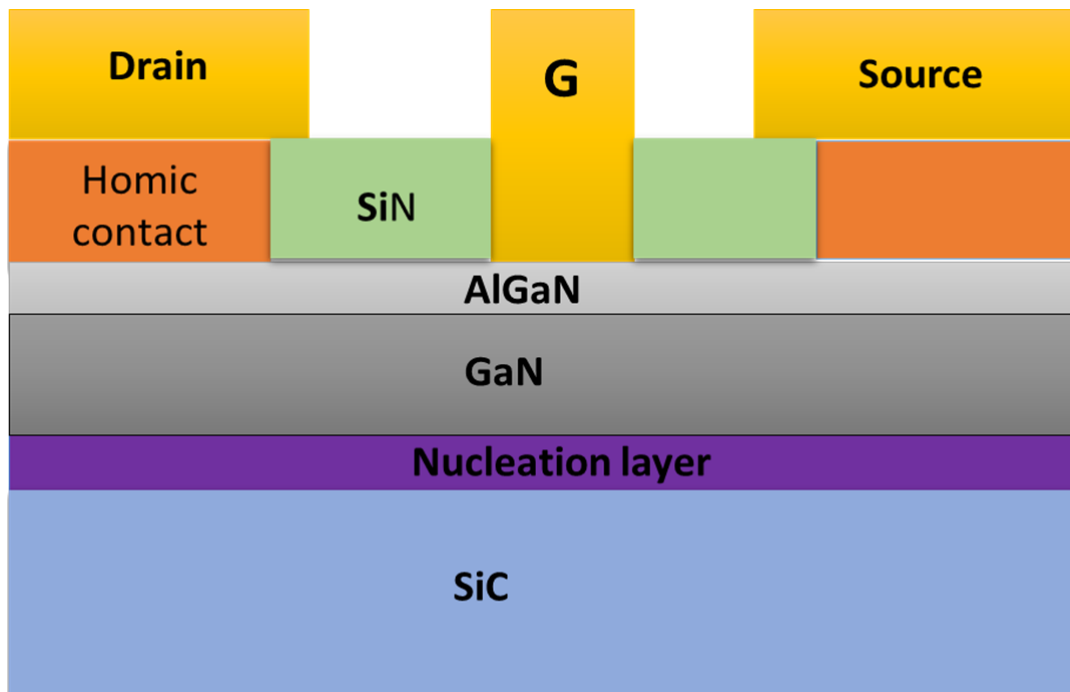


FIGURE 1.11 – La structure du transistor à haute mobilité d'électron [2]

Dans la suite, on va définir quelques couches importantes dans cette structure :

- La couche SiC : est utilisée afin de constituer le substrat, est un support en carbure de silicium sur celui-ci que sera réalisé le composant. Le substrat constitue le support de croissance. le substrat peut être de différentes natures (Si, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC etc...) servant de support mécanique et ayant une résistivité suffisante pour pouvoir présenter un caractère isolant notamment en hyperfréquence [30].
- La couche de nucléation : placé entre le substrat et la couche de GaN sera requise de manière à passer graduellement de l'accord de maille du GaN vers celui du SiC et inversement. La croissance directe de GaN sur un substrat de saphir par exemple et présentant un désaccord de paramètre de maille de 16%, est tridimensionnelle. La croissance se fait par îlots qui ne coalescent pas entre eux et de nombreux défauts étendus de forme hexagonale apparaissent. Ce comportement a toujours représenté un obstacle important au développement des nitrures. Pour surmonter cette difficulté, la croissance du GaN s'effectue en deux étapes principales. Une couche d'AlN de très faible épaisseur épitaxiée à basse température est tout d'abord déposée sur le substrat. Cette couche de nucléation joue le rôle de couche tampon, destinée à absorber la majorité des contraintes liées à la désadaptation entre le substrat et GaN. La nature de cette couche n'est pas exactement identifiée. Des études montrent qu'elle peut être cristalline et cubique ou encore amorphe. Il est possible aussi d'épitaxier une couche de nucléation en GaN, et elle a été identifiée comme cristalline et hexagonale [15].

- La couche GaN : cette couche de nitrure de gallium est placée juste au-dessous de la couche ternaire. Elle contient le gaz bidimensionnel (2DEG) d'électrons dans sa partie supérieure, répartis sur une épaisseur de quelques nanomètres.
- La couche AlGaN : une barrière qui fait quelques dizaines de nanomètres. La différence de gaps entre ce composé ternaire et le matériau en Nitrure de Gallium crée une hétérojonction dans laquelle les électrons seront confinés afin de constituer le gaz bidimensionnel d'électrons plus connu sous le nom de 2DEG [31].
- La couche de passivation : cette couche est souvent en SiN ou Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, elle protège la surface du composant des effets extérieurs et des courants de fuite à la surface du semi-conducteur est par exemple un élément pouvant être sensible aux hautes températures. Elle est primordiale pour la fiabilité des composants : Les transistors non passivés montrent de plus fortes dégradations que leurs similaires protégés. Cette couche, si elle n'est pas correctement contrôlée, elle présentera un risque de délamination. Ce genre de défaut va générer des états d'interfaces parasites à l'interface passivation/AlGaN, c'est l'une des causes du phénomène de grille virtuelle [32].

#### 1.4.5 Fonctionnement du HEMT

L'idée de base à l'origine de ce composant est d'utiliser comme canal conducteur d'un transistor à effet de champ, un gaz bidimensionnel (gaz-2D) d'électrons circulant dans un matériau peu dopé et résultant de l'occupation des niveaux d'énergie du puits de potentiel caractéristique d'une hétérojonction. Trois électrodes communément dénommées : source, grille et drain permettant de contrôler le courant et la tension de fonctionnement de transistor. Les contacts de sources et de drain sont de type ohmique, le contact de grille et de type Schottky.

Pour les applications concernant l'amplification de puissance le montage source commune est utilisé, l'électrode de source étant connecté à la masse. La grille permet de contrôler la densité de courant circulant dans le transistor en agissant électro-statiquement sur le gaz d'électrons situé à son aplomb : c'est l'électrode de commande basse puissance. Le drain permet de contrôler la tension de fonctionnement du composant : c'est l'électrode de commande forte puissance [33].

#### Hétérojonction AlGaN/GaN

Au niveau de l'interface entre deux semi-conducteurs de gap différents, un puits peut se former dans le semi-conducteur de plus petit gap en fonction du niveau de dopage des deux semi-conducteurs. A l'interface entre l'AlGaN et le GaN, un puits de potentiel se forme côté de GaN. Dans cette technologie, la création du puits dépend de l'ensemble de l'environnement électro-statique, c'est-à-dire du dopage des matériaux mais aussi de la polarisation de ceux-ci. Dans la suite on va détailler la polarisation dans la technologie HEMT.

#### Polarisation

Le matériau GaN ainsi que AlGaN sont le siège de deux types de polarisations : la polarisation spontanée et la polarisation piézoélectrique. Ces polarisations engendrent l'apparition de charges positives ou négatives aux interfaces entre ces matériaux et d'autres matériaux. Dans un empilement AlGaN/GaN, ces polarisations représentent l'origine du 2DEG.

## a- Polarisation spontanée

Les matériaux III-N sont caractérisés par une polarisation spontanée grâce à la nature polaire des liaisons chimiques (dues aux différences d'électronégativité entre les atomes constituant la maille) et du caractère non centro-symétrique de cette famille de matériaux. Par conséquent, même en l'absence de champ électrique externe, les composés III-N possèdent une polarisation électrique. L'électronégativité d'un atome caractérise sa capacité à attirer les électrons lors de la formation d'une liaison chimique avec un autre élément. La différence d'électronégativité entre ces deux éléments va déterminer la nature de la liaison covalente. La liaison sera dite apolaire quand cette différence est nulle, polaire si elle n'est pas nulle et ionique quand un des éléments attire complètement les électrons. L'azote, ayant une électronégativité supérieure à celle du gallium, de l'aluminium et de l'indium, va donc attirer les électrons. Le nuage électronique sera spontanément déformé et décalé vers les atomes d'azote induisant ainsi un champ de polarisation spontané  $P_{SP}$  [21].

## b- Polarisation piézoélectrique

La croissance de l'hétérostructure AlGa<sub>x</sub>N/GaN possède la particularité d'être pseudomorphique. Cela signifie que la couche de GaN relaxée impose son paramètre de maille à la couche d'AlGa<sub>x</sub>N lors de la croissance. Le paramètre de maille du GaN relaxé étant supérieur à celui de l'AlGa<sub>x</sub>N, une contrainte en tension bi-axiale apparaît dans la couche d'AlGa<sub>x</sub>N. Cette contrainte induit une polarisation piézoélectrique dans la couche d'AlGa<sub>x</sub>N. De plus, en raison des valeurs différentes des coefficients de dilatation thermique du GaN et de l'AlGa<sub>x</sub>N cette polarisation piézoélectrique varie avec la température. L'orientation du vecteur de polarisation piézoélectrique  $P_{PZ}$  est cette fois fonction du type de contrainte (tension ou compression) subie par le matériau [34].

## c- Polarisation totale

La polarisation totale (globale) de l'hétérostructure est la somme algébrique des polarisations spontanées  $P_{SP}$  et piézoélectriques  $P_{PZ}$  des matériaux constituant l'hétérostructure. La polarisation résultante induit une charge surfacique positive + localisée à l'interface AlGa<sub>x</sub>N/GaN :

La résultante des polarisations piézoélectriques et spontanées de l'AlGa<sub>x</sub>N et de la polarisation spontanée du GaN engendre l'apparition d'une charge surfacique positive à la surface inférieure de la couche d'AlGa<sub>x</sub>N. Cette charge de polarisation induit un champ électrique. Pour compenser celui-ci, des électrons libres vont s'accumuler au niveau de la surface supérieure de la couche de GaN. C'est le gaz d'électrons à deux dimensions. Avec l'augmentation du % d'Al présente dans la couche d'AlGa<sub>x</sub>N, la polarisation totale de l'AlGa<sub>x</sub>N va augmenter. Par conséquent, la charge surfacique va augmenter, ce qui engendrera une augmentation de la concentration d'électrons dans le gaz 2D. On voit donc que le gaz 2D est présente sans application d'une tension de grille et les dispositifs AlGa<sub>x</sub>N/GaN sont naturellement conducteurs. On les qualifie de dispositifs "normally-on" [34].



## d- Densité de porteurs dans le gaz 2-DEG

Afin de compenser la charge surfacique positive, les électrons présents dans le matériau vont migrer vers l'interface AlGa<sub>x</sub>N/GaN, côté GaN. La discontinuité des bandes interdites à l'hétérojonction AlGa<sub>x</sub>N/GaN conduit à la formation d'un puits de potentiel qui a pour effet de confiner les électrons et de former un gaz bidimensionnel d'électron (ou gaz 2-DEG). Il est possible de calculer la densité de porteurs libres du gaz 2-DEG, à partir de la polarisation totale de la structure et en tenant compte des paramètres physiques des matériaux. L'équation reliant la densité de porteurs avec les propriétés physiques de la structure a été établie par O. Ambache [35]. Elle a pour expression :

$$n_s(x) = \frac{\sigma_{\text{AlGa}_x\text{N}/\text{GaN}}(x)}{q} - \left( \frac{\varepsilon_{\text{AlGa}_x\text{N}}(x)}{d_{\text{AlGa}_x\text{N}} \cdot q^2} \right) [q \cdot \Phi_{\text{Schottky}}(x) + E_F(x) - \Delta E_C(x)] \quad (1.9)$$

avec :

- $d$  : la largeur de l'axe Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>. N,
- $e\Phi_b$  : la barrière Schottky d'un contact de grille,
- $E_F$  : le niveau de Fermi par rapport à l'énergie de la limite de la bande de conduction du GaN,
- $\Delta E_C$  : le décalage de la bande de conduction au niveau de AlGa<sub>x</sub>N/GaN.

## 1.5 Le HEMT dans les systèmes mécatroniques à haute puissance

Parmi les composants les plus importants dans un système mécatronique, on trouve les transistors, et lorsqu'il s'agit d'un système aéronautique ou aéroporté, on parle donc des transistors à haute puissance, dont on trouve plusieurs types. Le transistor J-FET, Le transistor MES-FET, Le Transistor à Haute Mobilité Électronique (HEMT) [8]. Le HEMT apparait comme une évolution majeure du MESFET. Mais La différence est que le HEMT utilise une hétérojonction, c'est-à-dire une jonction entre des matériaux ayant des bandes d'énergie différentes, de manière à faire passer les électrons constituant le courant drain-source dans un semi-conducteur non-dopé, afin de diminuer le temps de transit et donc augmenter les performances en fréquence. La vitesse des électrons est en effet d'autant plus grande que le dopage du semi-conducteur est faible, car la dispersion d'impuretés ionisées est réduite [36]. Le transistor à haute mobilité d'électrons possède des caractéristiques électriques et thermiques très pertinentes, grâce à ces caractéristiques le HEMT devient le meilleur candidat à utiliser dans des différents domaines et systèmes.

Dans les systèmes aéroportés (1.12) on trouve ces transistors au niveau de ses amplificateurs à haute puissance (HPA), ces amplificateurs à base de HEMT peuvent fonctionner à des conditions très particulières telles que des hautes fréquences et températures [21].



FIGURE 1.12 – Système aéroporté utilisé par la NASA

Au secteur automobile, les professionnels au domaine commencent récemment à utiliser le HEMT dans les véhicules hybrides et les circuits d'entraînement de moteurs, après des tests et des expériences qui ont montré la performance et les avantages de ces transistors par rapport aux autres (figure 1.13) [37]. Les progrès rapides des fabricants de dispositifs GaN dans les technologies des matériaux et des processus ont permis d'améliorer considérablement les performances et le coût des produits destinés aux applications de haute puissance à haute tension, comme les véhicules électrifiés (VE, PHEV et hybrides légers). L'une des autres propriétés importantes du GaN, qui l'a rendu précieux pour les véhicules électriques, est son intensité de champ électrique critique élevée ( $5 \times 10^6$  V cm), qui donne à un transistor GaN, une tension de claquage beaucoup plus élevée qu'un transistor en silicium de dimensions similaires. Cette propriété permet de fabriquer des dispositifs semi-conducteurs en GaN pour une plage de tension de fonctionnement donnée en utilisant des structures de transistors beaucoup plus petites. Ces structures plus petites permettent d'obtenir des dispositifs ayant une capacité distribuée beaucoup plus faible et pouvant fonctionner à des fréquences de commutation beaucoup plus élevées.



FIGURE 1.13 – Voiture hybride utilisant les HEMT [3]

Dans le domaine de la télécommunication, on trouve que le HEMT est particulièrement bien placé pour répondre aux exigences de performance, de structure des coûts, de capacité de fabrication et de flexibilité de la chaîne d'approvisionnement de l'infrastructure des stations de base sans fil 4G LTE et 5G [13]. Il se présente aussi dans les amplificateurs faible bruit LNA (low noise amplifier) [38]. Pour les satellites (figure 1.14), parmi les alternatives envisagées on cite les dispositifs à base de GaN et les matériaux connexes, qui permettent d'améliorer considérablement la puissance de sortie. Cet avantage devrait permettre aux amplificateurs à base de la technologie HEMT en GaN de remplacer les amplificateurs à tube à ondes progressives dans les systèmes satellitaires de la prochaine génération. Les amplificateurs de puissance à semi-conducteurs basés sur le GaN ont l'avantage par rapport aux autres amplificateurs. Car ils sont plus petits et plus légers, de plus ils fonctionnent à des tensions plus faibles, ils sont moins sensibles à quelques phénomènes comme celui d'électrons chauds et il n'y a pas de problème de temps de chauffage. En plus, ces composants se dégradent affablement au cours du temps, ce qui permet de réaliser différents niveaux de puissance en combinant un nombre variable de modules de base [4].



FIGURE 1.14 – Satellite à base du HEMT [4]

## 1.6 Les mécanismes de dégradations du HEMT

### 1.6.1 Les effets thermiques

En raison de la forte densité d'électrons et de la mobilité dans le canal l'AlGaIn/GaN. Les HEMTs présentent un énorme potentiel pour les applications à haute puissance. Cependant, l'appareil en fonctionnement à haute puissance peut produire un courant de drain réduit, ce qui est principalement attribué à la mobilité réduite des électrons causée par la température élevée du réseau, appelée effet d'auto-échauffement. Cet effet est encore plus marqué pour l'appareil à doigts multiples en raison de la diaphonie thermique entre les doigts. Par conséquent, une bonne gestion thermique serait nécessaire pour réduire l'effet d'auto-échauffement [39]. Ce changement de la température au sein du transistor influence plusieurs propriétés, on cite comme exemples :

- Hauteur de bande interdite : La hauteur de la bande interdite est inversement proportionnelle aux paramètres de maille du matériau. La maille se dilatant suivant l'axe « 001 » du réseau cristallin en fonction de la température, il en résulte une diminution de la hauteur de la bande interdite. L'équation donnant l'évolution de la hauteur de la bande interdite en fonction de la température est donnée ci-dessous et s'exprime de la manière suivante [8] :

$$E_G(T) = E_G(0) - \alpha \frac{T^2}{T + \beta} \quad (1.10)$$

Avec  $\alpha$  et  $\beta$  sont des coefficients propres aux matériaux exprimés en Kelvins. pour le GaN :  $E_G(0) = 3,42\text{eV}$ ,  $\alpha = 7,7 \times 10^{-4}$  et  $\beta = 600$ . La diminution de la hauteur de la bande interdite aura pour conséquence une diminution du champ de claquage. Cependant cette diminution n'aura pas de conséquence importante sur la tension de claquage, car le phénomène prépondérant dans l'espace grille drain est l'ionisation par impact.

- Mobilité électronique : L'augmentation de la température diminue également la mobilité des porteurs dans le matériau GaN. Quand on augmente la température le nombre de phonons augmente ce qui réduit le temps moyen entre deux collisions avec les phonons. Schwierz a montré que la mobilité dépend de la température suivant l'équation suivante [19] :

$$\mu(T) = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^\gamma \quad (1.11)$$

- Conductivité thermique : La conductivité thermique du matériau diminue également quand la température augmente. Ceci à cause de la réduction du libre parcours moyen des phonons. Dans la gamme de température de fonctionnement des transistors (300-600K), la conductivité thermique en fonction de la température du fonctionnement peut être décrite par une loi qui s'exprime comme suite [40] :

$$K(T) = K_{300} \left( \frac{T}{300} \right)^a \quad (1.12)$$

### 1.6.2 Effets parasites et mécanismes de dégradation

Pendant ces années dernières, plusieurs travaux reposent sur la détection et la compréhension des mécanismes de dégradation de la technologie HEMT AlGaN/GaN. Jusqu'à aujourd'hui, on n'a pas arrivé à identifier tous les phénomènes physiques à l'origine des défaillances du ce composant. Elles sont toujours à l'étude jusqu'à présent. En figure 1.15, Meneghesso et al. [41] ont représenté schématiquement une vue en coupe d'un HEMT AlGaN/GaN et les différentes parties du transistor où une dégradation peut apparaître. Ces dégradations sont généralement classées en 3 catégories : les mécanismes de dégradation par effet thermique, les effets de pièges et les effets piézo-électriques inverses. Nous allons détailler ces effets dans les parties suivantes. Elles sont situées au niveau des électrodes de grille et de drain, dans la passivation en SiN, dans la barrière AlGaN ou dans le buffer GaN.

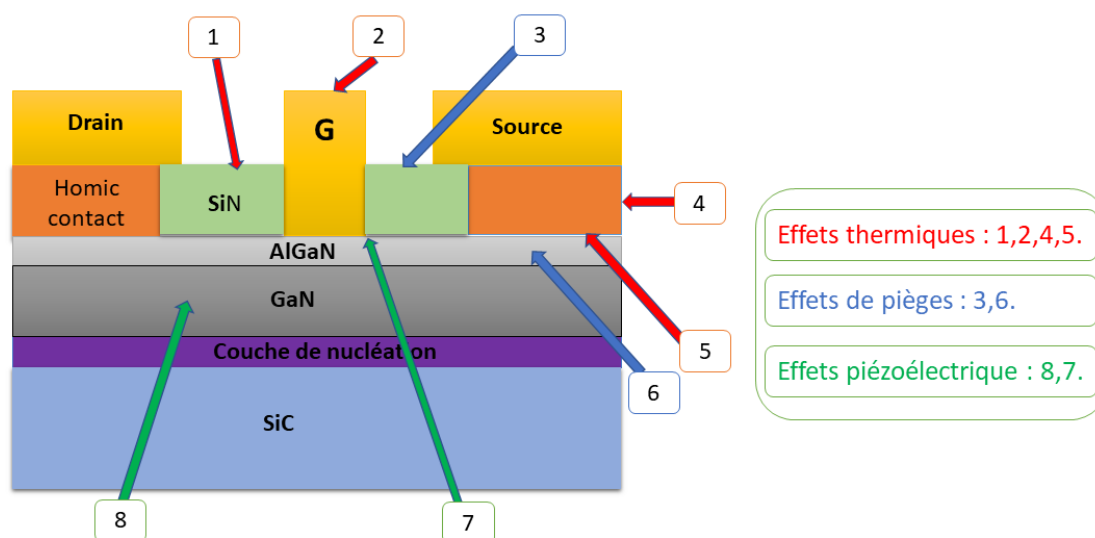


FIGURE 1.15 – Localisation des dégradations de HEMT

### Mécanismes de dégradation par effet thermique

Parmi les principaux mécanismes de dégradation activés thermiquement de cette technologie, on trouve l'enterrement de grille à cause de la diffusion du métal de grille dans le semi-conducteur. Ce phénomène de dégradation principal des MESFETS et HEMT. Elle existe aussi la dégradation du contact Schottky, pour des températures de jonction de l'ordre de 200°C une augmentation de la hauteur de barrière de la diode Schottky a été observée sur ces contacts. Cette augmentation a été attribuée à la présence d'une couche d'interface entre le contact Schottky et la couche de AlGaN. Ce qui engendre un changement de la tension de seuil et par conséquent une diminution du courant de drain [42]. Et pour les contacts ohmiques, elle apparait l'électromigration et une dégradation irréversible de leurs performances électriques à partir de 600°C qui résultent une diminution du courant de drain maximal. Comme indiqué dans la partie précédente, la couche de passivation sert à protéger la surface du composant des différents effets, cette couche est sensible aux hautes températures. Si elle n'est pas convenablement contrôlée, elle présentera donc un risque de délamination, ce qui va générer des états d'interfaces parasites à l'interface passivation/AlGaN ou dans l'interface, et faire apparaître du phénomène de grille virtuelle.

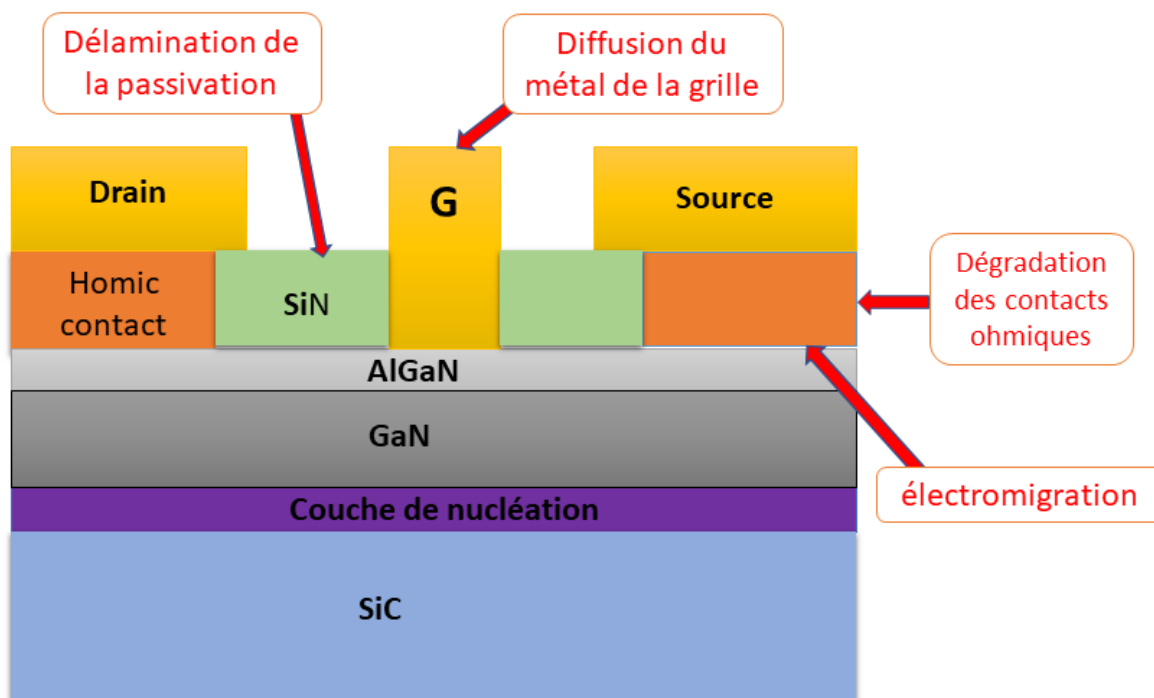


FIGURE 1.16 – Dégradations thermiques dans le HEMT

## Effets de piège

On peut observer les phénomènes de piégeage lorsque les techniques de dépôt des couches de matériaux ne sont pas suffisamment maîtrisées et contrôlées. Ces phénomènes sont très peu présents dans les technologies silicium, technologie de référence depuis le début de la micro-électronique, car elles possèdent un oxyde stable. Par contre, dans les technologies HEMT, le 2DEG est fortement influencé par les niveaux de pièges aux interfaces semiconducteur/nitruure. Ces phénomènes représentent aujourd'hui l'un des phénomènes parasites les plus importants de la technologie GaN [43]. Généralement, les centres de piégeage peuvent se remarquer en surface, dans la couche de AlGa<sub>N</sub>, au niveau du canal bidimensionnel (2-DEG) ou bien dans la couche de GaN. Elles existent de nombreuses explications opposées concernant l'origine et les causes des effets de piégeage, il semble cependant reconnu dans la littérature que les pièges situés en surface et dans le buffer soient les premiers responsables des dégradations des performances RF [42].

Les défauts profonds dans les structures HEMTs AlGa<sub>N</sub>/GaN représentent les causes principales des effets de pièges : ces défauts interagissent avec les porteurs de charge présents dans le canal, en capturant une partie des électrons qui participent au courant. Les pièges créeront des charges fixes supplémentaires dans le transistor : elles peuvent être soit positives si les pièges sont de type donneur soit négatif si les pièges sont de type accepteur, et influencer la densité d'électrons et donc le courant. La décharge de ces pièges a des constantes de temps lentes par rapport aux signaux RF car les centres de piégeages sont localisés en profondeur. Ces constantes de temps sont fonction du champ électrique appliqué au composant, défini par les tensions appliquées aux électrodes de commande. Certaines constantes de temps de dépiégeage (ou émission) peuvent être lentes par rapport au temps de la mesure (plusieurs minutes ou plus). Les centres de piégeages actifs sont localisés soit en surface, au niveau de la passivation, soit au niveau de la couche AlGa<sub>N</sub> sous la grille, soit dans le GaN, en particulier dans l'espace grille drain à la sortie de la grille où le champ électrique est concentré.

D'après Leny, un travail de développement et d'amélioration de la passivation à base de SiN a permis de limiter la présence de pièges localisés en surface, et l'amélioration des techniques de croissance et de la qualité des substrats de limiter les densités de pièges localisés dans le buffer. Malgré tout ça, les phénomènes de pièges restent, avec les effets thermiques, les premiers responsables des dégradations des performances électriques des HEMTs GaN [21]. Dans la suite, on va détailler les deux principaux mécanismes de piégeage qui ont été identifiés dans cette technologie : Mécanisme de "gate-lag" et Mécanisme de "drain-lag".

Mécanisme de "gate-lag" : les empilements AlGa<sub>N</sub>/GaN sont par défaut "normally-on". Il est nécessaire donc de polariser négativement la grille afin de dépléter le canal d'électrons. Lorsque le transistor est à l'état bloqué. L'application d'une différence de potentiel importante entre la grille et le contact de drain engendre l'apparition d'un fort courant électrique dans la zone grille drain du transistor. Ce qui peut entraîner l'injection d'électrons dans les états de surface de l'empilement AlGa<sub>N</sub>/GaN. Ces porteurs créent ainsi une grille virtuelle en surface du composant. D'autre part, au cours d'une impulsion positive sur la grille, le porteur de charge qui avait été capturé est lentement réémis, ce qui entraîne entre-temps une dégradation de la réponse des transistors avec une diminution du courant de sortie et une augmentation de la résistance à l'état passant [44].

Mécanisme de "drain-lag" : L'application d'un champ électrique important entre la source et le drain peut engendrer une chute brutale du courant de drain. Sous de fortes tensions de polarisation du drain, les électrons chauds du canal sont injectés et capturés par les pièges dans la couche GaN. Ceci provoque une désertion du canal et réduit le courant de sortie. Le courant de drain mesuré est alors en deçà de la valeur attendue et finit par se rétablir lorsque les pièges ont été réemis [45].

### Effet piézo-électrique inverse

Les matériaux principaux dans la structure de HEMT AlGaIn et GaN sont piézoélectriques, l'application d'un champ électrique intense entre la grille et le drain, donne naissance à des contraintes mécaniques dans la structure et causent des dégradations dans la couche d'AlGaIn. Autres défauts peuvent ainsi apparaître dans le matériau lors de la relaxation de ces contraintes : c'est l'effet piézo-électrique inverse [21]. Sarau et al [40] ont réalisé une étude par microscopie optique Raman, cette méthode a permis de faire une cartographie de la distribution des contraintes à la surface de HEMT. Il apparaît que des tensions mécaniques existent dans la région grille-drain et que ces tensions augmentent avec la polarisation grille-drain. Grâce à des simulations numériques 2D, il a été possible de corrélérer la contrainte mécanique mesurée en microscopie Raman avec le pic de champ électrique observé au bord du pied de grille côté drain. Dans le même sens de ces observations, plusieurs auteurs [46, 42, 47] ont émis l'hypothèse que la dégradation de HEMT à base de GaN au cours de différents tests électriques peut être due à la formation de défauts cristallins au travers de la relaxation de la contrainte piézoélectrique inverse. Cette hypothèse est supportée par le fait qu'il semble exister une tension seuil de dégradation, qui correspondrait à une énergie seuil pour permettre la relaxation de la contrainte et donc la formation de défauts cristallins.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes mécatroniques et leurs rôles importants dans le développement des nouvelles technologies dans les différents domaines. Nous avons présenté aussi les différents types de transistors à haute puissance, et on a montré l'importance et les avantages du HEMT. Les caractéristiques électriques, les propriétés des matériaux utilisées dans la structure du transistor et le principe du fonctionnement du HEMT ont été également présentés. La section finale a été sur les différents mécanismes de dégradation dans le HEMT : thermiques, pièges et effet piézoélectrique. Dans le chapitre suivant, nous allons entamer la modélisation multiphysique du HEMT afin d'étudier son comportement électro-thermomécanique en fonction des différents paramètres liées à son fonctionnement.



---

Modélisation électro-thermomécanique du HEMT

---

**Sommaire**

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>48</b>
<b>2.2</b>	<b>Transfert thermique au sein du HEMT</b>	<b>49</b>
2.2.1	La conduction	49
2.2.2	La convection	50
2.2.3	Le rayonnement	51
<b>2.3</b>	<b>Approximation par la méthode des éléments finis</b>	<b>52</b>
<b>2.4</b>	<b>Modélisation électro-thermomécanique</b>	<b>53</b>
2.4.1	Présentation du problème	53
2.4.2	Modélisation électrothermique	54
2.4.3	Modélisation thermomécanique	57
<b>2.5</b>	<b>Résultats de la simulation numérique électrothermique</b>	<b>59</b>
2.5.1	Influence de la température de référence	62
2.5.2	Influence de la couche de nucléation	63
2.5.3	La résistance thermique	64
<b>2.6</b>	<b>Résultats de la simulation numérique thermomécanique</b>	<b>65</b>
2.6.1	Calcul des déplacements	65
2.6.2	Calcul des déformations	67
2.6.3	Calcul des contraintes	69
2.6.4	Influence des paramètres géométriques	71
<b>2.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>75</b>

---

## 2.1 Introduction

Le transistor est un élément très important dans les systèmes mécatroniques, il assure plusieurs fonctions comme la commande et l'amplification des signaux. Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) à base de nitrure d'aluminium-gallium/nitrure gallium (AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>), est un composant électronique très important grâce à sa structure et ses matériaux. Le nitrure de gallium Ga<sub>N</sub> se caractérise par une grande mobilité d'électron, un champ de claquage électrique très élevé et une grande conductivité thermique [48]. Grâce à ces caractéristiques et autres, ces transistors ont été utilisés dans plusieurs applications à haute fréquence et à haute température [49, 50], tels que, la télécommunication, la guerre électronique (domaine militaire) et les systèmes aéroportés [37]. Le HEMT a été utilisé aussi dans plusieurs systèmes tels que les amplificateurs à haute puissance, les radars et les satellites [51], comme on a vu dans le chapitre précédent.

Lors de son fonctionnement sous une tension entre ses bornes, le HEMT dissipe une puissance au niveau de la zone active, cette puissance est en fonction de la tension appliquée et le courant qui circule dans le transistor, la dissipation de la puissance au sein du HEMT peut être accompagnée de plusieurs phénomènes physiques ; thermiques et mécaniques [52]. La plupart des caractéristiques telles que la mobilité des électrons, la conductivité thermique sont en fonction de la température, ces caractéristiques ont tendance à se dégrader avec l'élévation de la température dans la structure à cause du phénomène de l'auto échauffement [53, 54, 55]. Ce phénomène peut donner naissance aussi à des dégradations mécaniques dans la structure car quelques caractéristiques physiques des matériaux sont en fonction de la température et en fonction de déformation au même temps. Ces dégradations peuvent être sous forme des déplacements, déformations ou des contraintes. L'identification et la compréhension de ces dégradations reste un enjeu important pour assurer la fiabilité et la performance de la technologie HEMT.

Afin d'observer le comportement multiphysique du HEMT, plusieurs travaux ont traité la modélisation simple du HEMT soit électrique, thermique ou électrothermique par la méthode des éléments finis [56, 57, 22]. Dans le but d'étudier le comportement électrique ou thermique du HEMT, et d'identifier l'interaction entre les paramètres électriques et thermiques lors de fonctionnement du composant, ils ont fait des simulations pour déterminer l'influence de la tension appliquée aux bornes du transistor sur son comportement thermique en général et sur la variation de la température en particulier [51, 58, 59]. Mais peu des travaux ont traité la modélisation complète (électro thermomécanique) ou juste mécanique afin d'identifier l'interaction entre les variables électriques, thermiques et mécaniques [60, 52, 61]. A cause de la complexité et le nombre des équations qui apparaît lors de la modélisation complète. Et aussi la difficulté de réaliser une étude expérimentale mécanique de ce micro-composant. La modélisation permet de visualiser et identifier les défaillances dans la structure.

Dans ce chapitre nous allons étudier la technologie HEMT par une nouvelle approche en réalisant une modélisation multiphysique complète, qui permet de simuler le comportement électrothermomécanique, grâce au couplage faible électrothermique et le couplage fort thermomécanique que nous avons développé en utilisant le logiciel Comsol. Ce qui va nous permettre de comprendre le comportement de sa structure, sous les conditions de fonctionnement et déterminer les paramètres qui influencent sa performance et sa fiabilité. Dans un premier temps on va étudier théoriquement le comportement multiphysique du HEMT. Par la suite, on va développer le modèle éléments finis par le logiciel Comsol multiphysics, qui permettra d'étudier

l'influence des conditions du fonctionnement ainsi les paramètres géométriques de la structure sur le comportement électro thermomécanique du HEMT.

## 2.2 Transfert thermique au sein du HEMT

L'étude du transfert thermique est une science qui permet de décrire l'échange de l'énergie d'un système avec le milieu externe. D'autre part, le deuxième principe de la thermodynamique dit que le transfert de l'énergie se fait du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid d'une manière irréversible. Dans notre cas, l'énergie dissipée au niveau de la zone active de transistor, sous forme de flux de chaleur peut être transféré et évacué par les différents modes du transfert thermique : conduction, convection et rayonnement. D'où la nécessité de citer et détailler ces mécanismes du transfert.

### 2.2.1 La conduction

La conduction thermique correspond à l'échauffement et à la propagation de la chaleur dans un corps, sans déplacement de matière. Elle est causée par les oscillations des atomes, proportionnelles au gradient de la température et au coefficient caractérisant la conductivité thermique du matériau. Dans le cas d'un milieu solide, homogène et isotrope, les atomes sont liés par le réseau cristallin. Les vecteurs élémentaires du transfert thermique sont les phonons et les électrons libres. Le flux de chaleur est relié au gradient de température par la loi de Fourier qui s'exprime comme suite [22, 20] :

$$\vec{\varphi} = -K_{TH}A\overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (2.1)$$

avec :

- $K_{TH}$  la conductivité thermique [W/m/K] ;
- $A$  la surface d'échange en  $m^2$  ;
- $T$  la température en K.

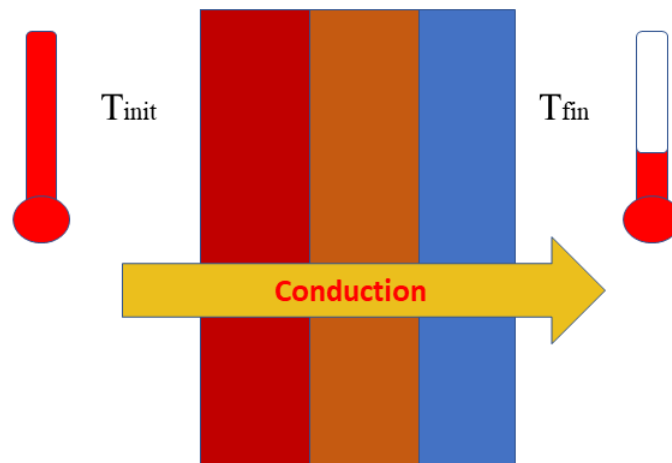


FIGURE 2.1 – Le transfert de chaleur par conduction

### 2.2.2 La convection

Dans le cas des composants électroniques, la convection se traduit par l'échange de la chaleur du composant avec l'air ambiant ou l'inverse, comme dans le cas de refroidissement. Il existe des différents types de convection en fonction de la nature du fluide et son écoulement aussi. La convection naturelle apparaît normalement si on a un gradient de température. D'autre part, la convection forcée apparaît si le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure au système. Dans le cas où il y a une combinaison des deux types précédents (naturelle/forcée), on parle alors de la convection mixte. On considère que le composant est échauffé à une température  $T_c$  et l'air (fluide) qui entoure le système à une température  $T_{inf}$  [20].

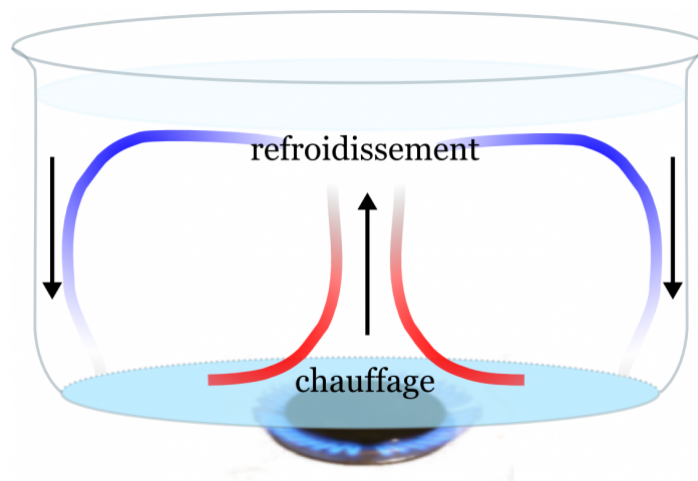


FIGURE 2.2 – Le transfert de chaleur par convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par dépla-

cement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton [20] :

$$\varphi = h \cdot A (T_p - T_\infty) \quad (2.2)$$

avec :

- $\phi$  : Flux de chaleur transmis par convection (W),
- $h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $\text{Wm}^{-2}\text{oC}^{-1}$ ),
- $T_p$  : Température de surface du solide ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $T_\infty$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $A$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $\text{m}^2$ ).

### 2.2.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert thermique par vibration d'ondes électromagnétiques entre deux corps qui ne sont pas en contact. Le rayonnement est classé selon sa longueur d'onde. Plus la température du corps sera élevée, plus le flux rayonné sera énergétique [20] :

$$\varphi = \varepsilon \sigma A (T_P^4 - T_\infty^4) \quad (2.3)$$

avec :

- $\phi$  : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W),
- $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67.10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4]$ ),
- $\varepsilon$  : Facteur d'émission de la surface,
- $T_P^T$  : Température de la surface (K),
- $T_\infty^m$  : Température du milieu environnant la surface (K),
- $A$  : Aire de la surface ( $\text{m}^2$ ).

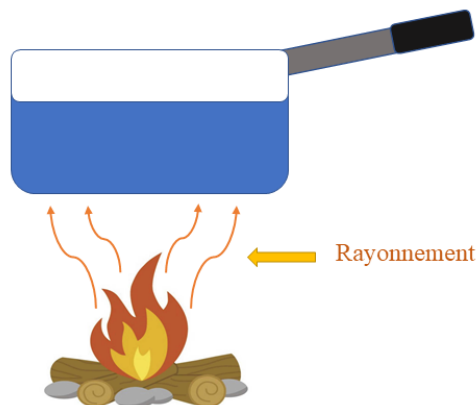


FIGURE 2.3 – Le transfert de chaleur par rayonnement

R. Meanddru et al [5] ont présenté une étude de transfert thermique dans le transistor HEMT,

ils ont observé la puissance dissipée pour les trois modes de transfert de chaleur en fonction de la température du composant. Les résultats sont présentés dans la figure 2.4.

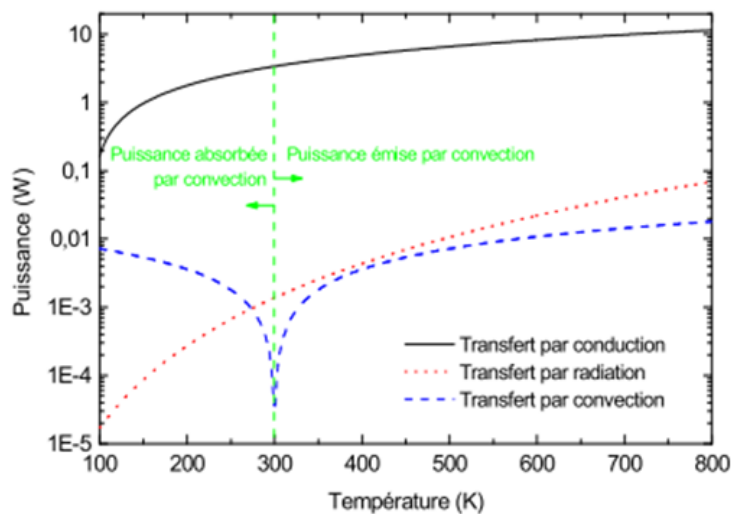


FIGURE 2.4 – Les différents modes de transfert de chaleur dans le HEMT [5].

Pour les températures supérieures à la température ambiante, on observe que la contribution de la radiation et la convection est de l'ordre de 1,5 % par rapport à la contribution de la conduction. C'est la raison pour laquelle nous allons négliger dans la suite de notre étude le transfert de chaleur par radiation et même par convection [5].

## 2.3 Approximation par la méthode des éléments finis

### La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est l'une des méthodes adaptées à la résolution des équations aux dérivées partielles avec des conditions aux limites, telles que l'équation de Poisson. Toutefois, elle est mal adaptée à l'équation de conservation des électrons ou à l'équation de conservation de l'énergie. Elle permet de transformer un système d'équations différentielles en un système numérique pouvant être résolu par des techniques numériques. Afin d'implémenter le couplage entre les modèles physique et thermique, la solution a été effectuée en utilisant une discrétisation par la méthode des éléments finis des équations de transport dans la zone active du composant et de la partie thermique dans toute la structure à étudier à l'aide du logiciel Comsol [62].

### Le logiciel Comsol multiphysics

Le logiciel Comsol multiphysics est un environnement interactif pour la modélisation d'applications industrielles et scientifiques avec la méthode des éléments finis. Il est basé sur la résolution des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), stationnaires ou temporelles, linéaire ou non linéaire : équations fondamentales pour la description de très nombreux phénomènes physiques. Ce logiciel a été écrit en C++ et est utilisable sous un système d'exploitation Unix ou Windows. Différents types de problèmes peuvent être résolus : en mécanique des fluides, en électronique, en thermique, en mécanique, etc. Le couplage de plusieurs équations peut éga-

lement être réalisé. L'avantage majeur de ce logiciel est la rapidité des calculs avec une bonne précision. Il permet d'effectuer des simulations en deux ou trois dimensions. Il ne nécessite pas de grandes ressources informatiques [63]. Plus d'informations sur le logiciel et son utilisation sont détaillées dans l'annexe 2.

## 2.4 Modélisation électro-thermomécanique

### 2.4.1 Présentation du problème

Le but de cette simulation, c'est de savoir l'influence des différents paramètres dont la puissance dissipée, la température de référence, sur le comportement et le fonctionnement du transistor. Après avoir réalisé le modèle électro-thermomécanique du transistor, l'étape suivante sera l'étude de l'influence des paramètres cités sur le comportement multiphysique du HEMT. Dans ce cadre, le logiciel Comsol multiphysics possède une interface agréable pour la modélisation, il permet de réaliser des modèles dans plusieurs disciplines mécanique, électrique, thermique... , avec une performance du calcul et des possibilités des modifications qui se font facilement par rapport aux autres logiciels, la première étape consiste au paramétrage de modèle en introduisant tous les paramètres nécessaires à la modélisation. Ensuite, on passe à la conception assistée par ordinateur, qui vise à reproduire géométriquement en 3D un modèle du composant, on se basant sur les paramètres géométriques dans la partie précédente, après on affecte les matériaux à chaque couche, le maillage se fait de manière automatique, puis on applique les conditions aux limites représentées par la température du milieu extérieur appliquée au-dessous du substrat qu'on appelle la température de référence, la contrainte mécanique et la charge sera la puissance dissipée au niveau de la zone active du transistor.

### Conception du modèle de simulation

La conception assistée par ordinateur est la première étape pour réaliser une modélisation électro-thermomécanique de transistor, elle s'agit de reproduire géométriquement et électro-thermomécaniquement, à l'identique, le transistor en 3 dimensions. Ce modèle de transistor doit prendre en compte l'ensemble des couches et leurs propriétés géométriques et physiques. Afin de développer le modèle thermique du transistor, nous avons utilisé le logiciel Comsol. Pour réaliser notre étude, on a utilisé comme données géométriques la longueur de la source et du drain  $L_s=L_d=45\ \mu\text{m}$ , la longueur de grille  $L_G=5\ \mu\text{m}$ , la largeur de grille  $100\ \mu\text{m}$ . Pour les couches, on a l'épaisseur du substrat  $100\ \mu\text{m}$ , épaisseur de GaN  $1.7\ \mu\text{m}$  et AlGaIn  $0.03\ \mu\text{m}$ . Les étapes sont en détails dans l'annexe 2.

### Les conditions aux limites

Réaliser une simulation thermomécanique nécessite la définition des conditions aux limites à imposer à notre système, dans ce cas on a trois qui sont très importantes :

- a. La température de référence : cette condition nous permet de mettre notre modèle dans les circonstances de son environnement de fonctionnement, c'est la température d'échange avec le milieu externe (entourage).
- b. La puissance dissipée : cette condition est considérée comme une charge à appliquer au sien

de notre système, sous forme de chaleur, et précisément dans la zone active de transistor, dont il est nécessaire de connaître son extension ainsi sa localisation, cette puissance est dissipée au niveau de la sortie de grille et du coté de drain.

c. Déplacement imposé : une condition au limite mécanique fixe appliquée au-dessous de substrat.

### 2.4.2 Modélisation électrothermique

Dans cette partie, on s'intéresse à l'étude de comportement électrothermique du transistor à haute mobilité d'électron (HEMT). Dans ce cadre, lors de son fonctionnement, ce transistor dissipe une puissance au niveau de la zone active à la sortie de grille [64], Leny et al ont localisé et dimensionné la zone active [21]. La puissance dissipée est en fonction de la tension appliquée et le courant qui circule entre les bornes de transistor telle que [21] :

$$P_{\text{diss}} = V_{ds} * I_{ds} \quad (2.4)$$

avec  $V_{ds}$  la tension drain source et  $I_{ds}$  le courant drain source. Pour définir le comportement thermique de transistor, il faut étudier le transfert thermique au sein du composant, ce transfert se fait principalement par conduction, la convection et le rayonnement sont négligeables car ils ne représentent que moins de 1,5% [15]. A base de ce mode d'échange thermique l'équation de la chaleur sera [65] :

$$k \cdot \nabla^2 T = \rho \cdot C_P \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + Q \quad (2.5)$$

avec :

- Q : la puissance dissipée en joules.
- K : conductivité thermique ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).
- $\rho$  : densité ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).
- $C_P$  : la capacité thermique massique ( $\text{J.Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).
- T : la température (K).

Cette équation nous permet de décrire le comportement thermique du transistor, pour une meilleure modélisation on va utiliser la méthode des éléments finis qui va nous permettre de résoudre ce problème à l'aide de logiciel Comsol multiphysics. Pour assurer la fiabilité des systèmes mécatroniques à travers la fiabilité des transistors, il est nécessaire de construire un modèle électro-thermomécanique propre à ce composant, qui ressemble à la réalité. Ce qui va permettre de maîtriser son comportement multiphysique ainsi observer toute variation de température et des paramètres mécaniques en fonction des conditions du fonctionnement : la puissance dissipée, la température de référence.



### Les propriétés thermiques des matériaux

La construction d'un modèle thermique du transistor nécessite la définition des propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité thermique massique et densité) des différents matériaux représentés dans ce modèle. Il existe de nombreux articles donnant des valeurs, celles-ci dépendent notamment dans le cas du GaN de la qualité cristalline du matériau [66]. Dans nos modèles, nous avons pris des valeurs issues de la littérature [67] et de travaux précédents [40, 68]. Ces valeurs sont regroupées dans le tableau 2.1.

Materials	$\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> )	K (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$C_p$ (J.g <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
Au	19300	310	137
SiN	3300	10	713
AlGaN	5470	$25. \left( \frac{293}{273+T} \right)^{L35}$	548
GaN	6100	$161. \left( \frac{293}{273+T} \right)^{1.45}$	490
SiC	3220	$416. \left( \frac{293}{273+T} \right)^{1.45}$	690

TABLE 2.1 – Les propriétés thermiques des matériaux.

### Code et interface de simulation

Pour extraire les résultats, il est nécessaire de revenir au logiciel pour chercher et varier les paramètres, et aller par suite à la section résultat pour obtenir les valeurs de la température et observer sa distribution dans la structure du HEMT. Puisque nous avons besoin de réaliser plusieurs simulations, alors cette méthode n'est pas praticable et reste coûteuse en terme du temps. Par conséquent, nous avons pensé à créer une interface de calcul ( figure 2.5) qui nous permet de choisir les paramètres à varier et les résultats à extraire, sans avoir besoin de revenir et modifier dans le logiciel. Les variables dans ce cas sont la température de référence, la puissance dissipée et les paramètres géométriques, le résultat sera la variation de la température au sein du transistor.

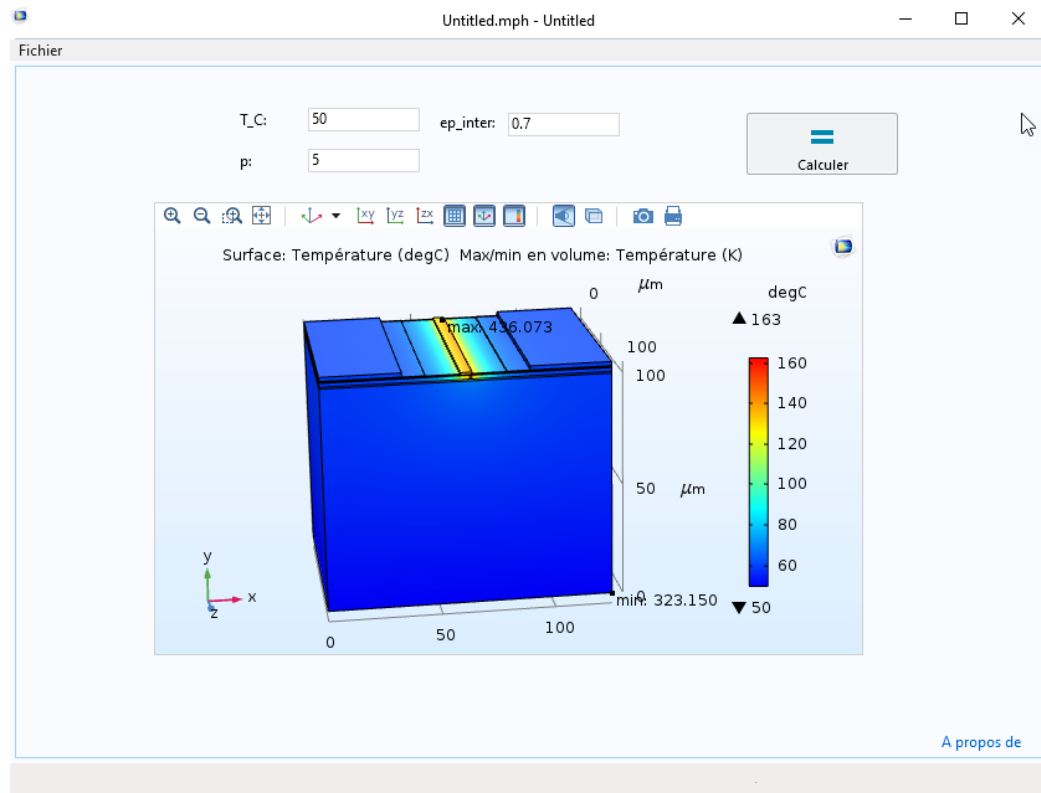


FIGURE 2.5 – Interface de l'application de simulation.

Cependant, cette interface reste coûteuse en terme du temps de calcul, dans le cas où on aura besoin d'effectuer plusieurs simulations (des centaines) pour chaque paramètre et extraire les résultats, ce qui n'est pas praticable. Par conséquent, on a pensé à optimiser le processus des simulations. Dans ce cadre, nous avons développé un code de simulation avec le logiciel Matlab, ce code assure un couplage des deux logiciels Comsol multiphysics et Matlab, et permet d'effectuer plusieurs simulations pour plusieurs paramètres en un temps de calcul raisonnable. Le code développé assure le bon déroulement du processus des simulations numériques et l'extraction des résultats, la nouvelle démarche de calcul s'effectue suivant l'organigramme de la figure 2.6.

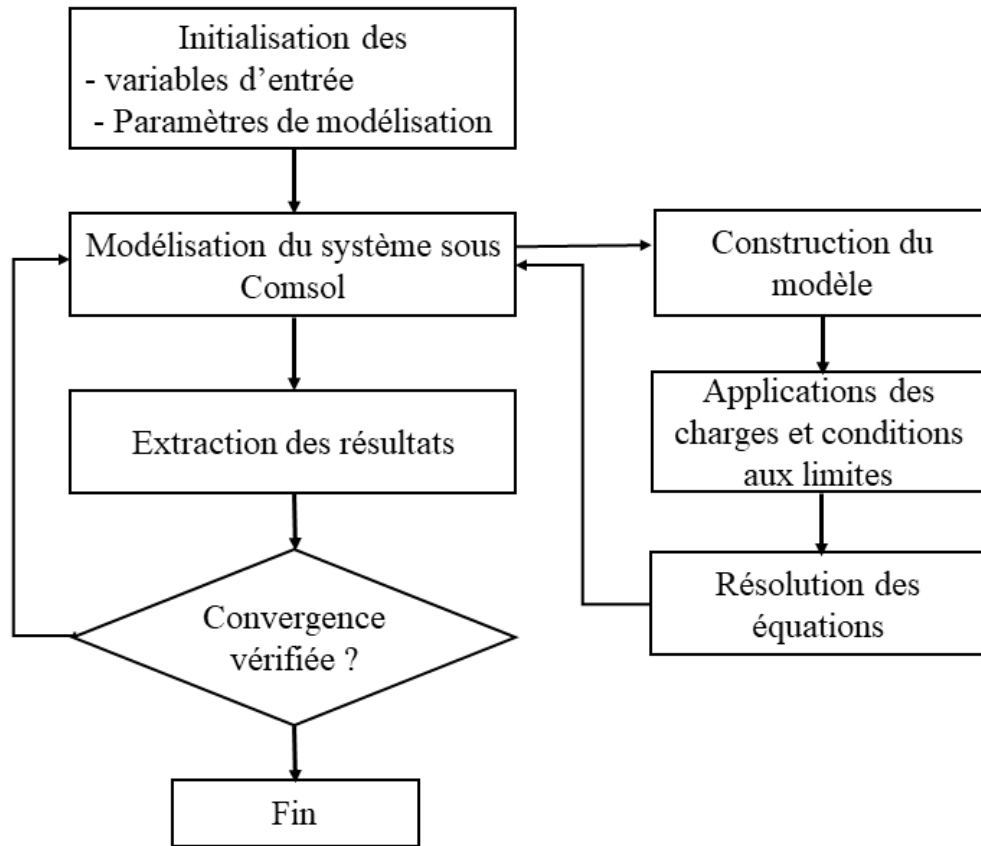


FIGURE 2.6 – Organigramme du processus de simulation électrothermique.

### 2.4.3 Modélisation thermomécanique

Dans cette partie, on va entamer une modélisation thermomécanique, elle permet d'étudier l'influence du comportement thermique sur le comportement mécanique de la structure du HEMT. La distribution et l'élévation de la température au sein du HEMT à cause du phénomène de l'auto échauffement lors de son fonctionnement sous des charges électriques, influencent le comportement mécanique du composant. Cette influence peut donner naissance à des phénomènes et des dégradations mécaniques dans la structure du HEMT, sous plusieurs formes : déplacements, contraintes et déformations. Pour étudier ces phénomènes on fait appel à un modèle électro thermomécanique, ce modèle est basé sur l'injection de la puissance dissipée qui est en fonction de la tension et du courant électrique, au niveau de la zone active du transistor. Ce modèle permet de lier les paramètres thermiques comme la température aux paramètres mécaniques telles que les contraintes, déformations ou autres. Le couplage du modèle électrothermique au modèle mécanique peut se traduire sous forme des équations, grâce aux équations de la thermoélasticité, on peut définir les déformations et la densité d'entropie par les expressions suivantes [7] :

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1}\{\sigma\} + \{\alpha\}\Delta T \quad (2.6)$$

$$\{S\} = \{\alpha\}^T\{\sigma\} + \frac{\rho \cdot C_P}{T_0}\Delta T; \Delta T = T - T_{\text{ref}} \quad (2.7)$$

avec  $\{\varepsilon\}$  est le vecteur de déformation totale, il est en fonction de vecteur des contraintes  $\{\sigma\}$ , le vecteur des coefficients de dilatation thermique  $\{\alpha\}$ , la différence de la température  $\Delta T$  et l'inverse de la matrice de rigidité élastique  $[D]$ . Dans l'équation 2.7, l'entropie est en fonction de plusieurs paramètres thermiques et mécaniques tels que les contraintes et la variation de température et autres. D'après la deuxième loi de la thermodynamique, la densité de l'entropie peut être remplacée par la densité de chaleur suivant cette équation :

$$Q = T_0 \cdot S \quad (2.8)$$

D'autre part, le vecteur des coefficients thermoélastiques  $\{\beta\}$  s'exprime comme suit :

$$\{\beta\} = [D]\{\alpha\} \quad (2.9)$$

Notant aussi  $C_v$  la chaleur spécifique à volume constant son expression est :

$$C_v = C_p - \frac{T_0}{T} \{\alpha\}^T \{\beta\} \quad (2.10)$$

L'intégration entre les équations précédentes nous permet d'obtenir des nouvelles formules des équations principales qui deviennent donc :

$$\{\varepsilon\} = [D]\{\varepsilon\} - \{\beta\} \Delta T \quad (2.11)$$

$$Q = T_0 \{\beta\}^T \{\varepsilon\} + \rho \cdot C_v \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

avec :

- $\{\beta\} = [D]\{\alpha\}$  : vecteur des coefficients thermoélastiques.
- $C_v = C_p - \frac{T_0}{T} \{\alpha\}^T \{\beta\}$  : chaleur spécifique à volume constant.

Ces deux équations assurent le couplage thermomécanique, il permet de lier les paramètres thermiques avec les paramètres mécaniques. Les deux couplages élémentaires : électrothermique et thermomécanique assurent le couplage global électro-thermomécanique.

### Les propriétés physiques des matériaux

Les propriétés physiques des matériaux nécessaires pour réaliser le modèle éléments finis tels que le module de Young  $E$ , le coefficient de dilatation thermique et le coefficient du poisson, sont classées dans le tableau 4.1 [69, 61]. Quelques propriétés sont déjà intégrées dans la bibliothèque des matériaux de Comsol multiphysics.

Materials	E (GPa)	$\alpha[1/K]$	Poisson's ratio
Au	70	14.2	0.44
SiN	250	$1.5e^{-6}$	0.27
AlGaN	212.75	$5.2425e^{-6}$	0.319
GaN	181	$8.6e^{-6}$	0.352
SiC	748	$4.3e^{-6}$	0.45

TABLE 2.2 – Les propriétés physiques des matériaux.

### Interface de modélisation électro-thermomécanique

Le modèle électro-thermomécanique développé par le logiciel Comsol multiphysics permet de modéliser le comportement multiphysique du HEMT. La modélisation nécessite un grand nombre des simulations numériques, alors que l'exécution du modèle éléments finis nécessite des dizaines des minutes pour une seule simulation. Afin de dépasser cette contrainte, nous avons développé un code de simulation sous le logiciel Matlab. Le code permet d'assurer le couplage entre les deux logiciels : Comsol multiphysics et Matlab. Ce code s'exécute suivant le processus détaillé dans la figure 2.7. On commence par la déclaration des variables d'entrée qui peuvent être les densités de puissance, les températures de références ou les paramètres géométriques. On doit aussi déterminer les paramètres de sortie. Par la suite le code fait appel au modèle éléments finis pour faire les calculs nécessaires. Et à la fin il nous renvoie les vecteurs de sortie. L'avantage de ce code consiste à faciliter le processus de la modélisation, et il permet aussi d'obtenir plusieurs résultats comme les déplacements, les contraintes, les déformations. etc. pour une seule simulation. De plus, grâce à ce code on a remarqué que le temps des simulations a parfaitement diminué. Ce qui optimise le temps du calcul et de simulation.

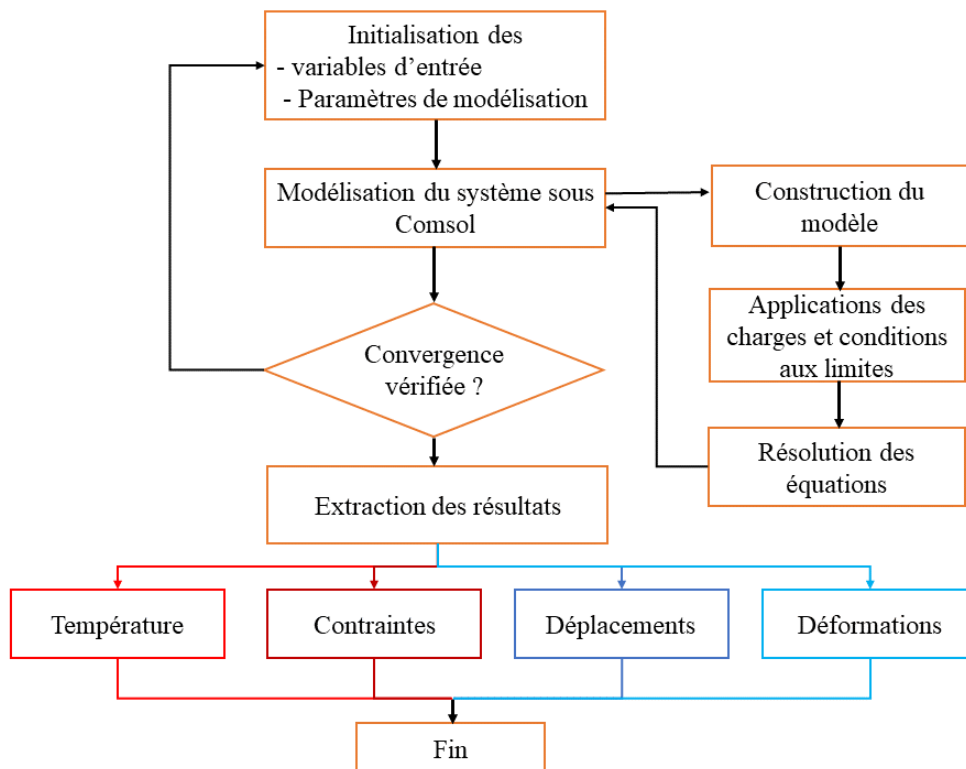


FIGURE 2.7 – Organigramme de simulation électro-thermomécanique.

## 2.5 Résultats de la simulation numérique électrothermique

### Influence de la puissance dissipée

Parmi les conditions du fonctionnement on trouve la puissance dissipée au niveau de la zone active du HEMT. Afin d'observer l'effet de cette puissance sur le comportement thermique du transistor, on varie la densité linéaire de cette puissance dans le modèle éléments finis développé

précédemment, en gardant les autres paramètres constants, la température de référence était 25°C. La figure 2.8 montre la distribution de la température dans toute la structure du HEMT. On remarque que la température est importante au niveau de la couche d'AlGaN à la sortie de la grille et les alentours dans la couche de passivation et le long de la grille.

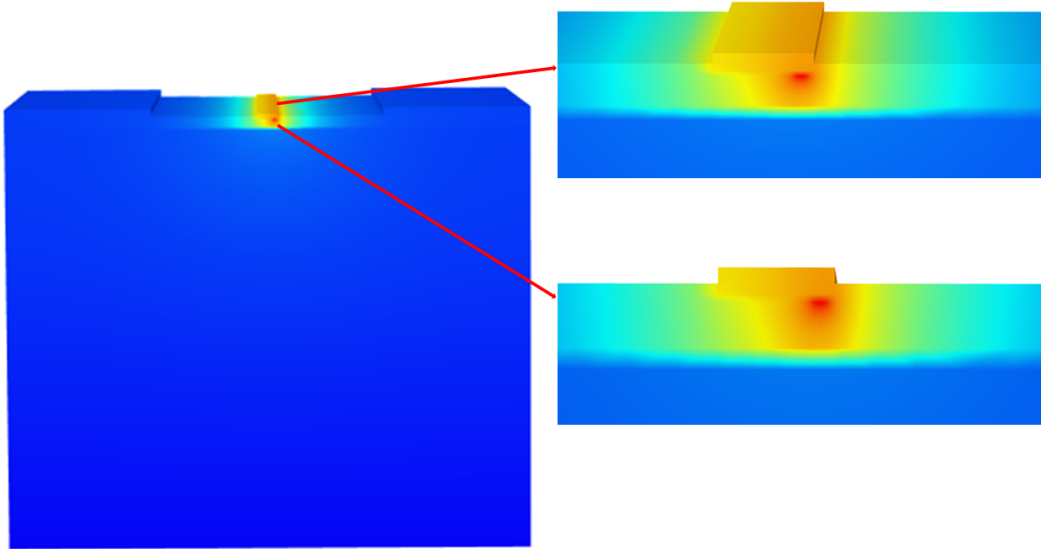


FIGURE 2.8 – Distribution de la température dans la structure du HEMT.

Pour étudier l'évolution de la température du fonctionnement en fonction de la puissance dissipée, nous avons effectué plusieurs simulations numériques. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 2.9 avec les résultats expérimentaux obtenus par la méthode optique de micro-spectrométrie Raman.

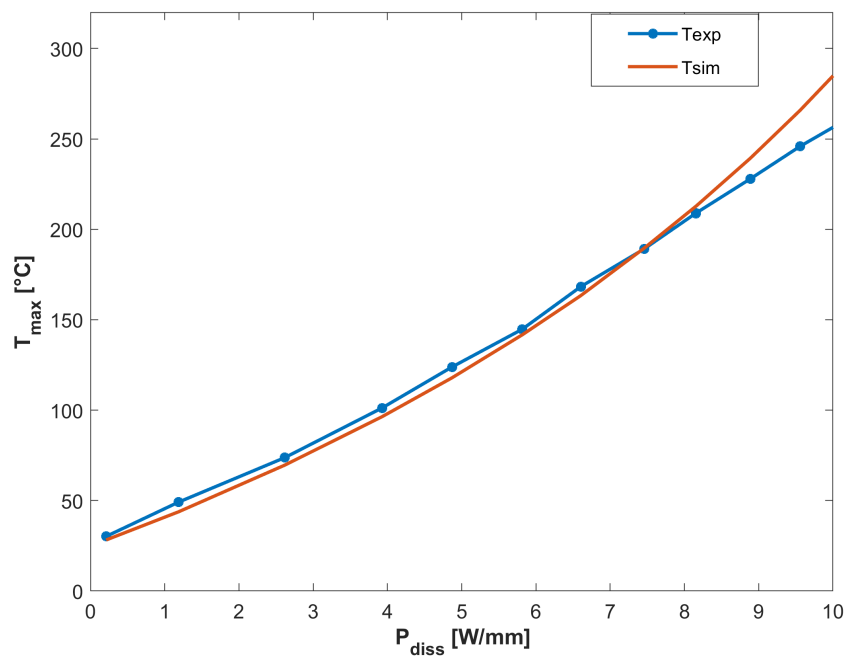


FIGURE 2.9 – Évolution de la température maximale du fonctionnement à une Tref de 25°C.

D'après cette figure, on constate clairement que la température du HEMT augmente en fonction de la puissance dissipée suivant une évolution non linéaire, elle atteint des valeurs assez importantes dans le cas d'une puissance dissipée élevée. Les courbes des résultats de simulations et de l'expérimental sont en bonne corrélation, le désaccord entre les deux courbes, et surtout pour la haute puissance est dû au fait que nous avons négligé les autres modes d'échange thermique comme nous avons décrit précédemment, il est lié aussi aux incertitudes des propriétés des matériaux et des outils de mesure. On va considérer que ce critère est suffisant pour valider notre modèle éléments fins.

Afin d'avoir plus de détails sur l'influence de cet effet sur la température de fonctionnement de composant, nous avons réalisé plusieurs simulations thermiques sur notre modèle, en variant la densité de la puissance dissipée à différentes valeurs de la température de référence, les résultats obtenus sont présentés dans la figure 2.10.

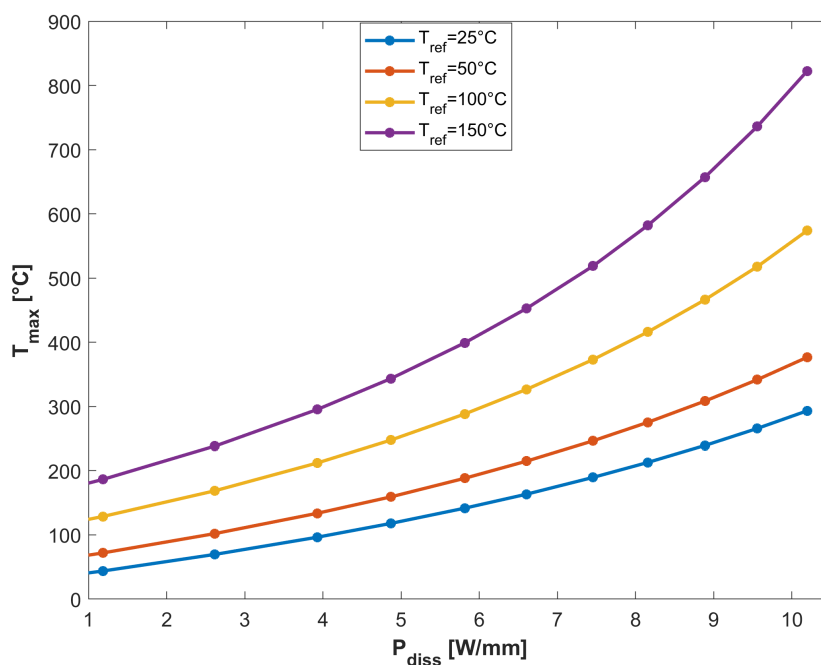


FIGURE 2.10 – Évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la puissance dissipée à différentes températures de référence.

D'après cette figure, on constate que la température du HEMT augmente toujours en fonction de la puissance dissipée suivant une évolution non linéaire dans les différentes valeurs de la température de référence, en augmentant la température de référence, la température maximale du fonctionnement du HEMT augmente et peut atteindre des valeurs assez importantes telles que 800 °C dans le cas d'une puissance dissipée de 10 W/mm et une température de référence de 150 °C. Par conséquent, la puissance dissipée au niveau de la zone active présente un grand impact sur la température du fonctionnement du HEMT ce qui influence automatiquement sa fiabilité et sa performance, car plusieurs caractéristiques telles que la mobilité des électrons vont se dégrader avec l'élévation de la température. Ça peut engendrer autres formes des dégradations comme l'enterrement de grille, les dégradations du contact Schottky, et la dégradation de l'interconnexion des métaux d'alimentation, etc.

### 2.5.1 Influence de la température de référence

La température de référence représente la température reçue du milieu extérieur, elle s'applique au-dessous du substrat. Dans le but d'identifier la relation entre la température de référence et la température de fonctionnement du HEMT, il faut effectuer des simulations numériques en se basant sur le modèle éléments finis développé, par la variation de la température de référence entre 25 et 300 °C. La figure 2.11 montre l'évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la température de référence, avec une puissance dissipée fixe de 5 W/mm, on peut remarquer clairement que la température du composant augmente avec la variation de  $T_{Ref}$ .

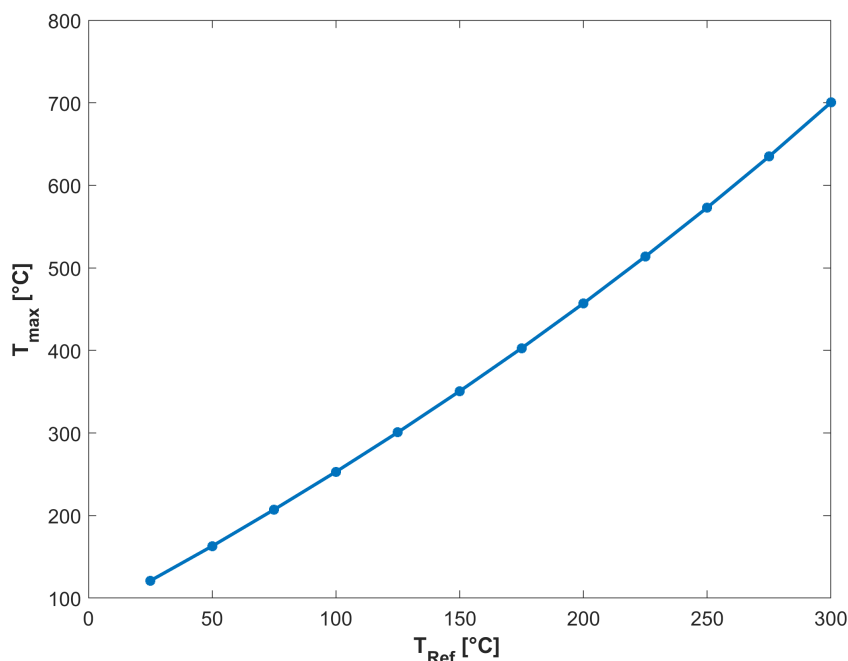


FIGURE 2.11 – Évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la température de référence pour une puissance dissipée de 5 W/mm.

Pour bien observer cette influence, nous avons réalisé plusieurs simulations dans les différentes valeurs de la puissance dissipée. La figure 2.12 montre que la température de fonctionnement augmente toujours en fonction de la température de référence dans les différentes valeurs de la puissance dissipée. Par conséquent, la température de référence représente un grand impact sur le comportement thermique du HEMT.



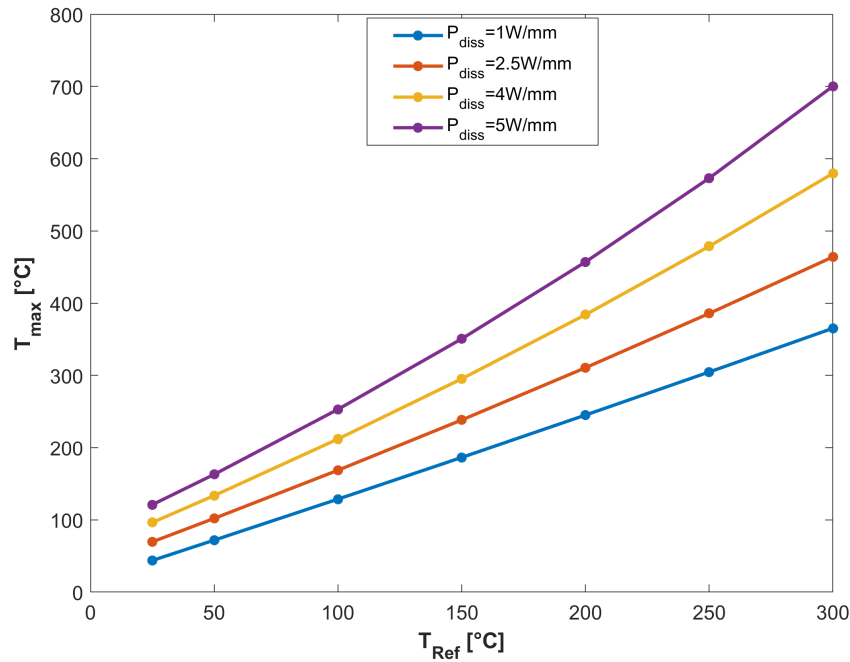


FIGURE 2.12 – Évolution de la température maximale du HEMT en fonction de la température de référence pour des différentes puissances dissipées.

### 2.5.2 Influence de la couche de nucléation

Les paramètres géométriques ont un impact sur la performance du transistor, afin de montrer l'influence de ces paramètres sur le comportement thermique de HEMT et précisément sur la température du fonctionnement, dans cette partie on s'intéresse à l'étude de la couche de nucléation et son influence sur la température de fonctionnement. Comme on a déjà cité précédemment, la couche de nucléation joue un rôle très important dans la structure du HEMT. Nous avons réalisé des simulations numériques pour les différentes épaisseurs de la couche de nucléation en gardant la puissance dissipée et la température de référence constantes. Les résultats obtenus sont mentionnés dans la figure 2.13.

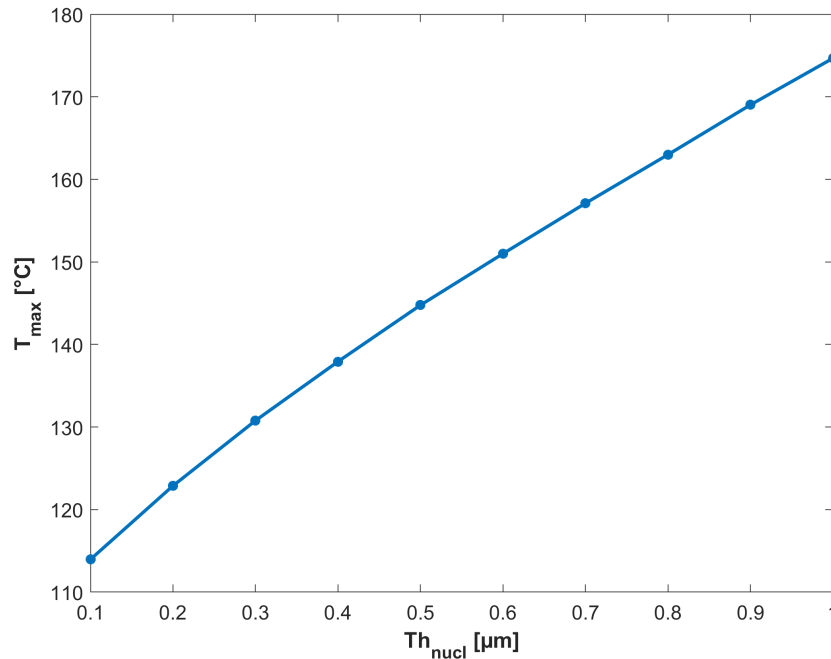


FIGURE 2.13 – Évolution de la température maximale du fonctionnement du HEMT en fonction de l'épaisseur de la couche de nucléation.

D'après cette figure, on remarque clairement que la température de fonctionnement évolue non linéairement en fonction de l'épaisseur de la couche de nucléation, on constate donc que malgré son épaisseur qui est très petit (moins de 1 μm), cette couche a un grand impact sur la température du fonctionnement du HEMT. D'où la nécessité de prendre en considération les paramètres géométriques dans toute étude du développement.

### 2.5.3 La résistance thermique

La résistance thermique est une notion thermique qui permet de quantifier le gradient de la température entre deux points, est un paramètre qui permet de mesurer la performance thermique d'un composant, elle est en fonction de la température et la puissance dissipée [21] :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} = \frac{T_{max} - T_{ref}}{P_{diss}} \quad (2.13)$$

avec  $T_{ref}$  est la température de référence et  $T_{max}$  c'est la température maximale de transistor HEMT, pour avoir plus de détails sur l'effet de la puissance dissipée sur la résistance thermique, nous avons exploité les résultats des simulations numériques précédentes. La figure 2.14 présente l'évolution de la résistance thermique en fonction de la puissance dissipée.

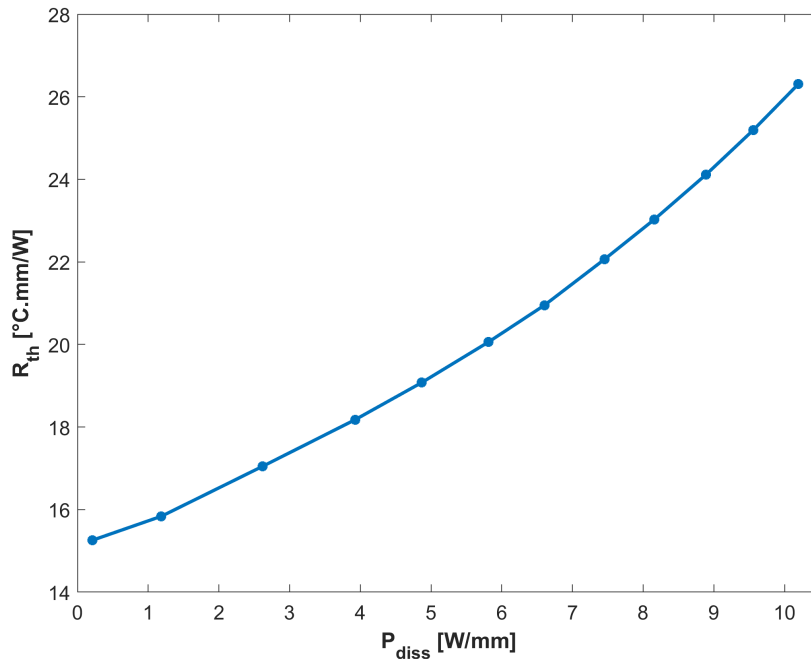


FIGURE 2.14 – Évolution de la résistance thermique du HEMT en fonction de la puissance dissipée.

D'après cette figure, on remarque que la résistance thermique augmente en fonction de la puissance dissipée suivant une évolution non linéaire. Par conséquent, la puissance dissipée influence le comportement thermique du HEMT en augmentant sa résistance thermique et donc diminuer sa conductivité thermique, ce qui peut amener à des dégradations d'origine thermique comme déjà cité précédemment.

## 2.6 Résultats de la simulation numérique thermomécanique

### 2.6.1 Calcul des déplacements

Comme nous avons vu dans la partie précédente, la puissance dissipée influence le comportement thermique du HEMT. Pour étudier l'impact de ce facteur sur le comportement mécanique du HEMT, nous avons effectué des simulations numériques par le modèle multiphysique développé, par la variation de la puissance dissipée en gardant les autres paramètres fixes. La figure 2.15 montre la distribution des déplacements dans la structure du HEMT dans une puissance dissipée de 10 W/mm et une température de référence de 25°C. Les déplacements sont très importants au niveau des trois électrodes du HEMT et surtout la grille, en notant qu'ils sont caractérisés par un coefficient de dilatation thermique très important par rapport aux autres couches. Ce qui explique les défaillances qui se passe au niveau de ces électrodes.

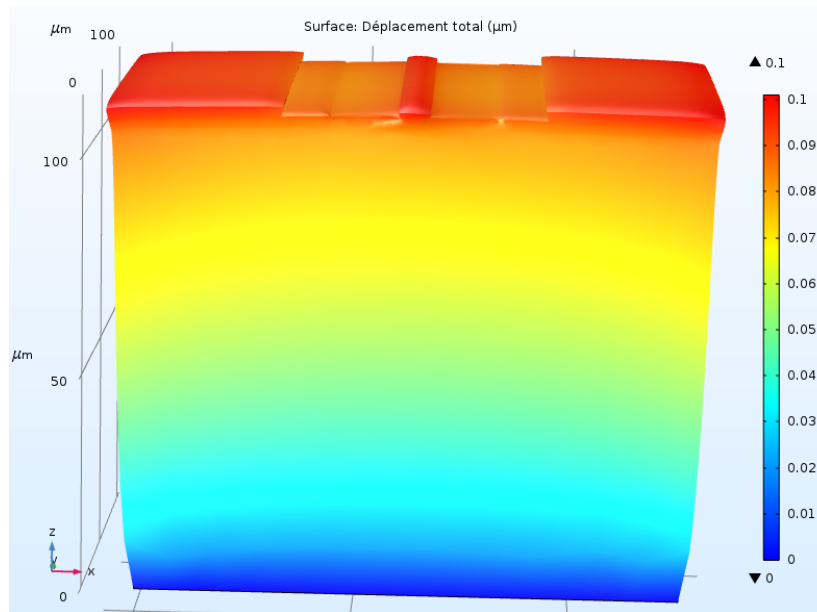


FIGURE 2.15 – Distribution des déplacements au sein de la structure du HEMT.

La figure 2.16 montre aussi l'évolution des déplacements en fonction de la puissance dissipée, cette variation se fait suivant une évolution non linéaire, dans une température de référence de  $25^{\circ}\text{C}$  et une puissance dissipée de  $12\text{ W/mm}$ , les déplacements peuvent atteindre une valeur de plus de  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ .

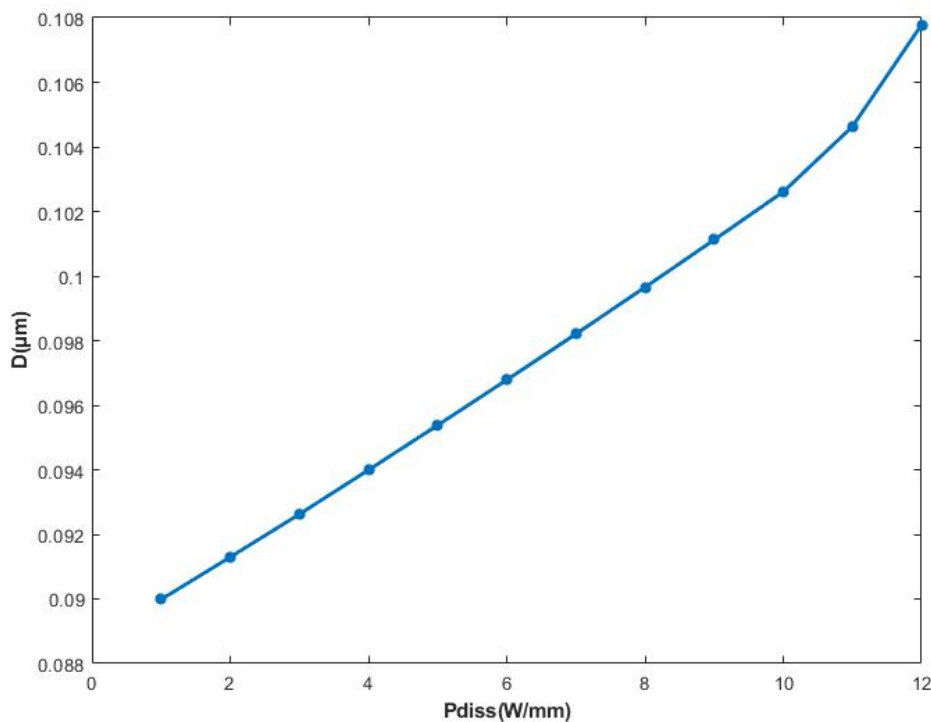


FIGURE 2.16 – Évolution des déplacements en fonction de la puissance dissipée.

Lors du fonctionnement le transistor reçoit une température du milieu extérieur au niveau du substrat, le but est d'identifier l'influence de cette température sur le comportement thermique

et mécanique du HEMT, et précisément sur les contraintes, les déplacements et les déformations. La température de référence est une condition du fonctionnement du HEMT, qui s'applique au-dessous du substrat. Pour étudier l'influence de ce facteur sur le comportement mécanique du transistor, nous avons réalisé des simulations numériques par la variation de cette température en gardant les autres paramètres constants. Les résultats numériques obtenus sont présentés dans la figure 2.17.

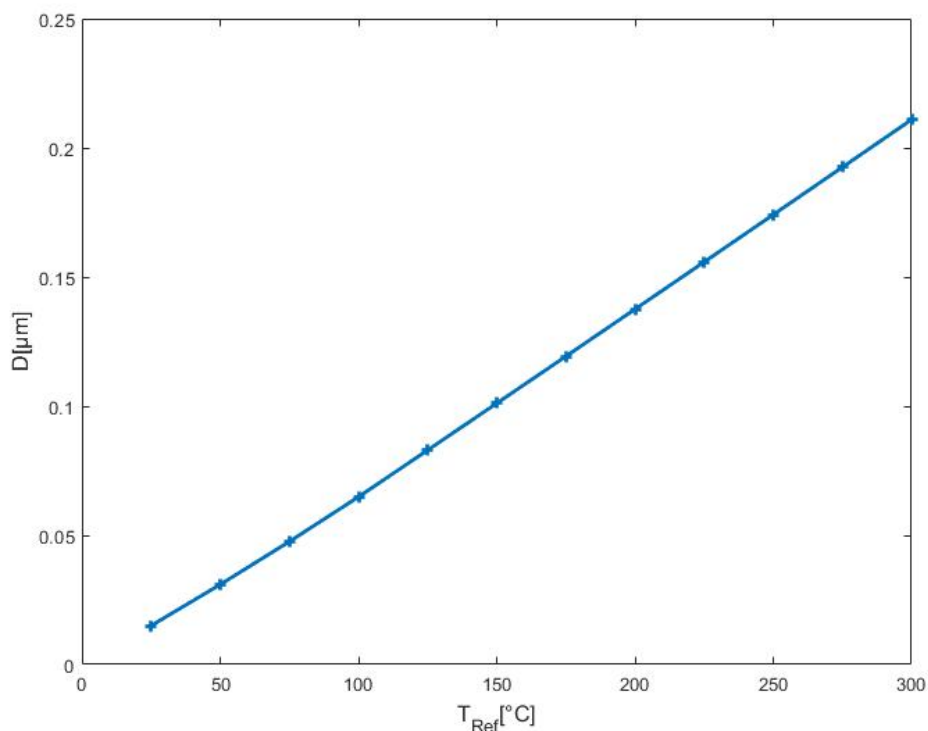


FIGURE 2.17 – Évolution des déplacements en fonction de la température de référence du HEMT.

D'après cette figure on remarque que la variation des déplacements en fonction de la température de référence est presque linéaire. Ce facteur représente un grand impact sur le comportement mécanique du HEMT, les déplacements peuvent atteindre une valeur de  $0.2 \mu\text{m}$ . On peut remarquer aussi que l'influence de ce facteur est très importante par rapport à celle de la puissance dissipée.

### 2.6.2 Calcul des déformations

L'étude de déformation sert à quantifier de quelle manière les longueurs ont été dilatées-contractées et les angles ont changé dans une structure. Pour évaluer les déformations dans la structure du HEMT, on fait des simulations par le modèle éléments finis développé précédemment. La figure 2.18 montre la distribution des déformations principales : la première et la deuxième. La première déformation est très élevée au-dessus et à la sortie de la grille. La deuxième déformation principale est plus élevée que la première, elle est très importante sur une grande partie de la grille. Les conditions du fonctionnement engendrent des déformations dans la structure du HEMT, les valeurs maximales sont observées au niveau de la grille aussi. Sachant que la grille est une couche très importante dans la structure et le fonctionnement du

composant, une élévation des déformations peut amener à la défaillance du HEMT.

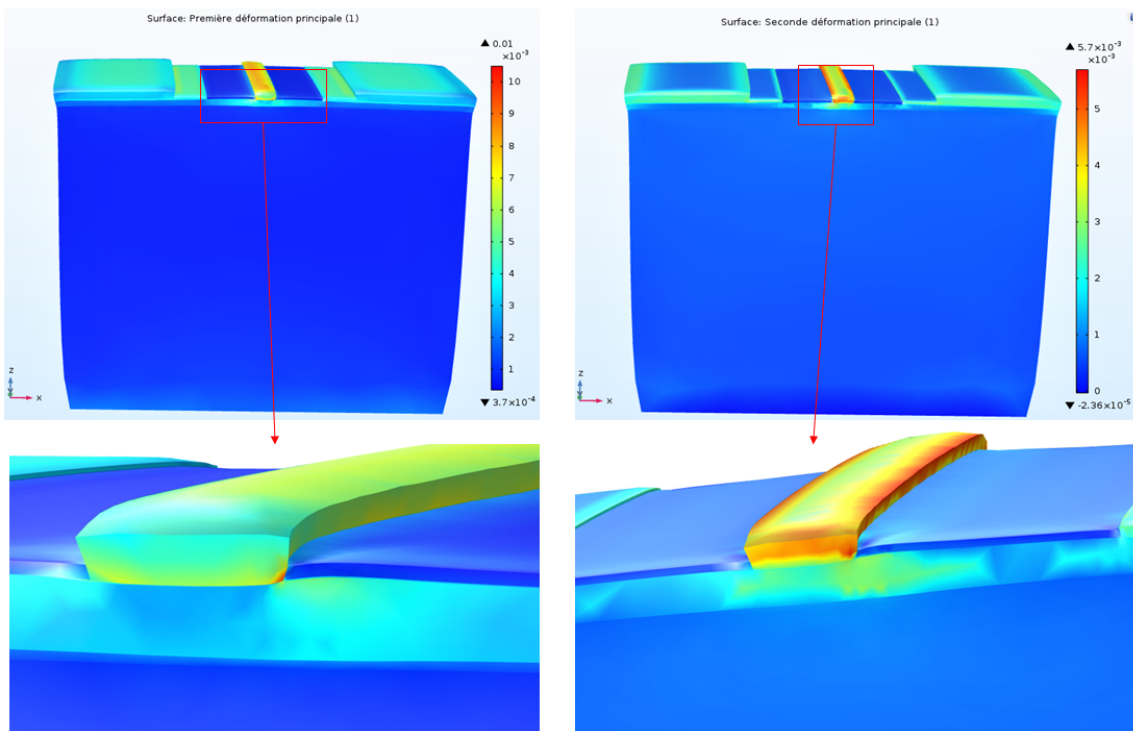


FIGURE 2.18 – Distribution des déformations principale dans la structure du HEMT.

Pour observer l'évolution des déformations en fonction des conditions du fonctionnement, la figure 2.19 montre l'évolution des déformations en fonction de la puissance dissipée.

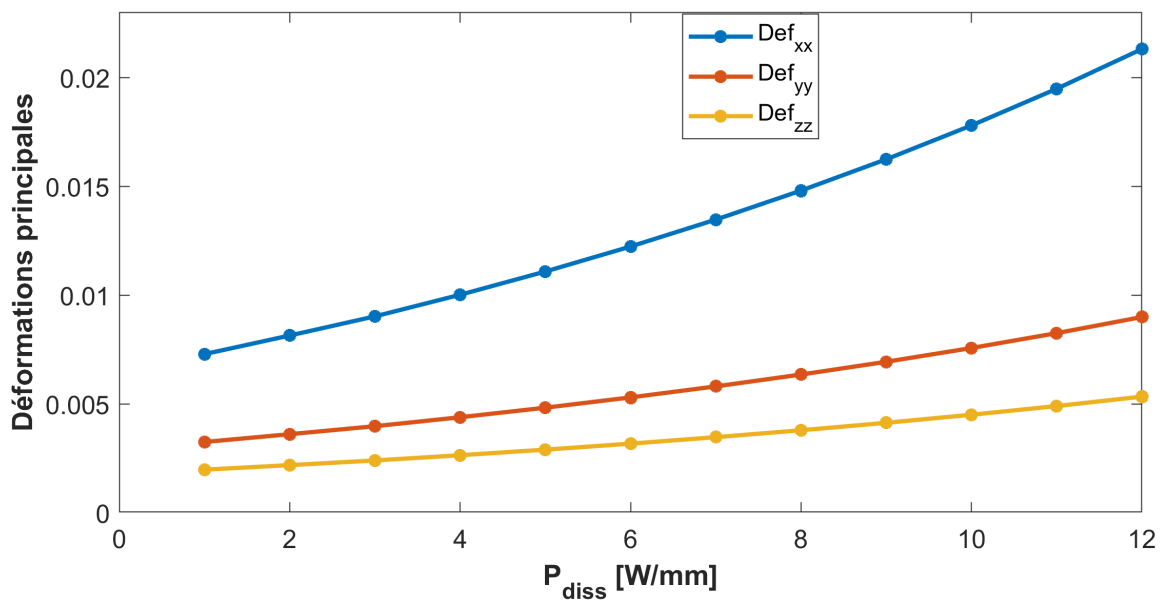


FIGURE 2.19 – Évolution des déformations principales en fonction de la puissance dissipée et la température de référence.

On remarque bien que les déformations principales augmentent en fonction de  $P_{diss}$  sui-

vant une évolution non linéaire. On remarque aussi que l'évolution des premier déformations principales est plus importante que celle des deuxième et troisième déformations principales.

### 2.6.3 Calcul des contraintes

Les contraintes sont aussi parmi les phénomènes mécaniques qui apparaissent lors du fonctionnement du HEMT. La contrainte est une composante élémentaire des efforts de cohésion, ou un effort élémentaire appliqué à une surface élémentaire. Une contrainte est donc une force divisée par une surface. Lors de l'application de charge, la contrainte ne peut souvent plus être définie Normale ou Tangentielle. Une contrainte équivalente à une contrainte normale est alors utile pour réaliser une étude de dégradation. Ces contraintes équivalentes sont le plus souvent définies suivant les critères de Tresca ou de von Mises. Dans ce sens, le critère de von Mises est le plus utilisé, il est en fonction des contraintes principales :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.14)$$

avec  $\sigma_e$  est la contrainte équivalente de von Mises,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  sont respectivement la première, la deuxième et la troisième contrainte principale. Ce critère nous permet d'identifier les éléments de la structure qui ont une grande tendance à se dégrader (rupture de structure). La figure 2.20 montre la distribution des contraintes de von Mises dans la structure du HEMT, dans ce cas on a appliqué comme charge  $P_{diss}=9 \text{ W/mm}$  et  $T_{ref}=150^\circ\text{C}$ , les contraintes de von Mises sont très élevées au niveau de la partie inférieure du substrat car cette couche reçoit la température de référence du milieu extérieur et aussi elle est la base de construction de la structure.

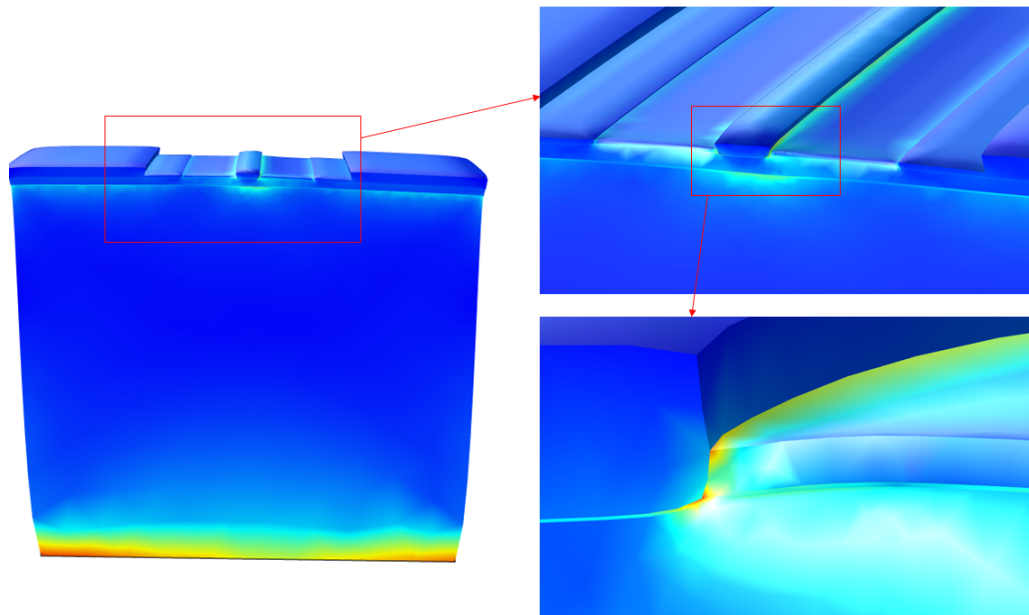


FIGURE 2.20 – Distribution des contraintes maximales de von Mises au niveau de la structure du HEMT à  $P_{diss}=9 \text{ W/mm}$  et  $T_{ref}=150^\circ\text{C}$ .

Les contraintes sont importantes aussi au niveau de la couche de AlGaN dans les deux côtés de la grille, cette couche est très proche de la zone active où se dissipe la puissance. On remarque aussi que la structure subit à des déformations au niveau de plusieurs couches à côté de la zone

active notamment AlGaIn et la couche de passivation et la grille aussi. Tous ces phénomènes de dégradation peuvent influencer la fiabilité du HEMT.

Afin d'observer l'évolution des contraintes de von Mises dans la structure en fonction des conditions du fonctionnement, on a réalisé des simulations numériques pour les différentes valeurs de la puissance dissipée et une température de référence fixée en 150°C.

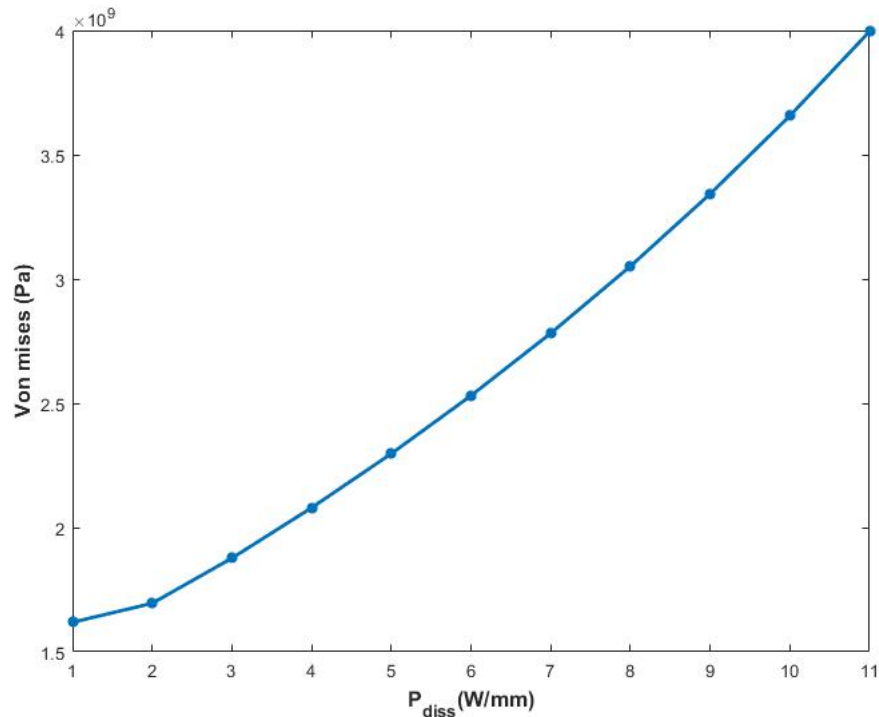


FIGURE 2.21 – Évolution des contraintes de von Mises en fonction de la puissance dissipée.

La figure 2.21 montre l'évolution des contraintes de von Mises qui augmente en fonction de la puissance dissipée. D'après cette figure on constate que les contraintes augmentent en fonction de la puissance dissipée, suivant une évolution non linéaire à une puissance dissipée de 11 W/mm les contraintes atteignent une valeur de 4 GPa.

La figure 2.22 montre l'évolution des contraintes de von Mises en fonction de la température de référence, on constate que les contraintes augmentent avec l'élévation de la température de référence, d'une manière plus importante que celle du cas de la puissance dissipée.



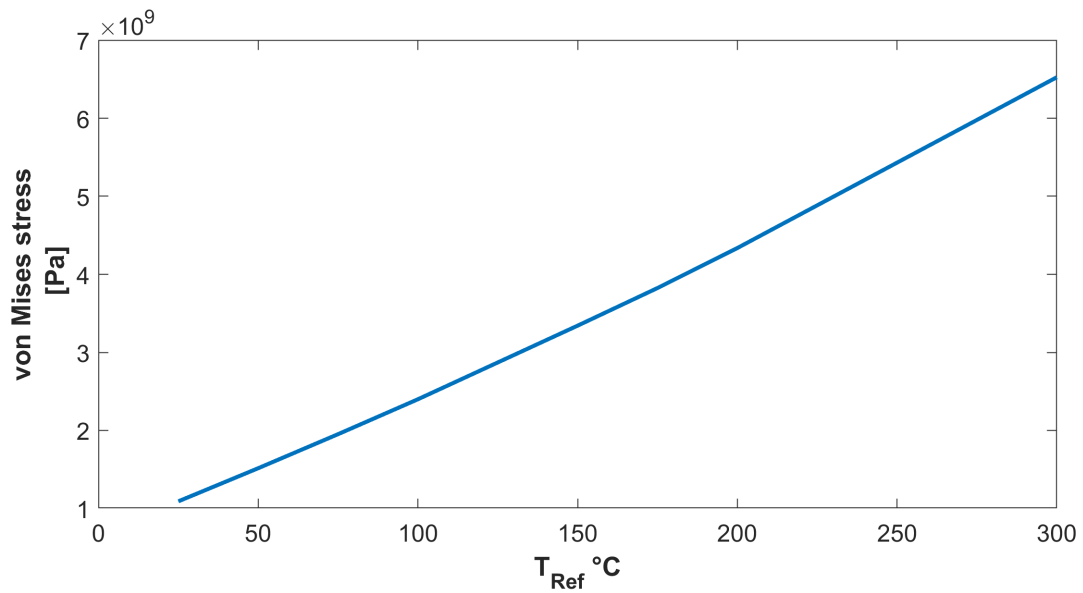


FIGURE 2.22 – Évolution des contraintes de von Mises en fonction de la température de référence.

#### 2.6.4 Influence des paramètres géométriques

Dans cette partie on va étudier l'influence des matériaux de la structure du HEMT sur son comportement électro-thermomécanique, grâce au modèle élément finis développé précédemment, et en appliquant les conditions du fonctionnement on va étudier l'influence des épaisseurs des matériaux sur le comportement mécanique de la structure.

##### Influence du substrat

La couche du substrat en SiC est très importante dans la structure du HEMT. C'est la base sur laquelle se construit le composant. Pour observer l'influence du substrat sur le comportement mécanique du HEMT, on varie l'épaisseur de substrat  $th_{SiC}$  dans le modèle électro-thermomécanique entre 90 et 160  $\mu\text{m}$ . La figure 2.23 montre l'évolution des contraintes de von Mises en fonction de l'épaisseur du SiC dans une température de référence de 150°C et une puissance dissipée de 9 W/mm. On constate que les contraintes de von Mises ont une évolution non linéaire instable (qui monte et descend entre des valeurs différentes). Et pour l'évolution des déplacements, on remarque qu'ils augmentent en fonction de l'épaisseur de substrat.

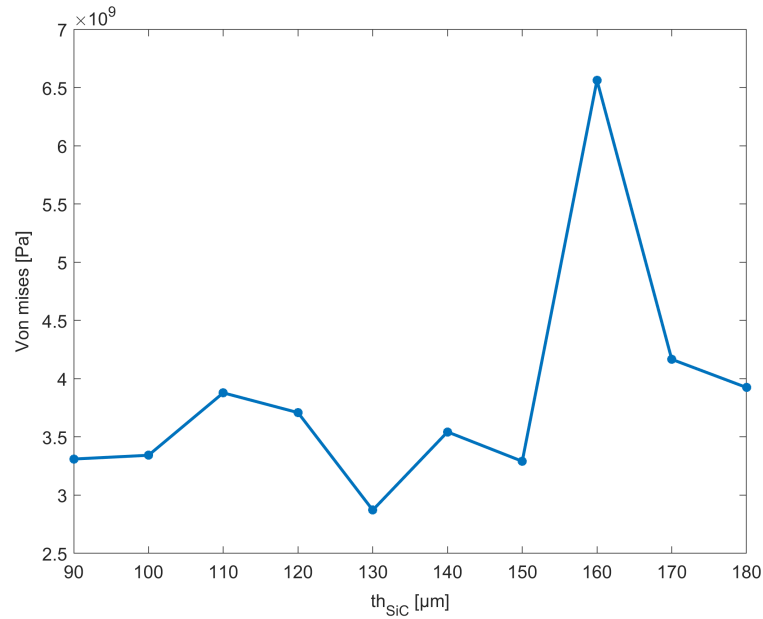


FIGURE 2.23 – a. Evolution des contraintes von Mises

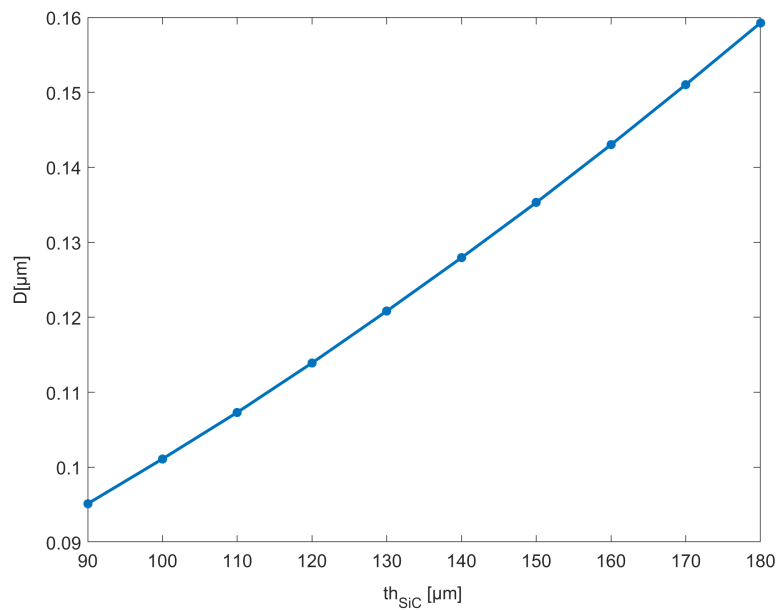


FIGURE 2.24 – b. Evolution des déplacements

FIGURE 2.25 – Evolution des contraintes von Mises et des déplacements en fonction de  $th_{SiC}$ .

### Influence de la couche GaN

La couche de GaN joue un rôle très important dans la structure du HEMT, elle contient le gaz bidimensionnel (2DEG) dans sa partie supérieure qui contribue au transport des électrons dans la structure. Afin d'évaluer l'impact de cette couche sur le comportement mécanique du HEMT lors de son fonctionnement, on va effectuer des simulations avec la variation de l'épaisseur entre 1.1 et 1.9  $\mu m$  dans une  $T_{ref} = 150^\circ C$  et  $P_{diss} = 9 W/mm$ .

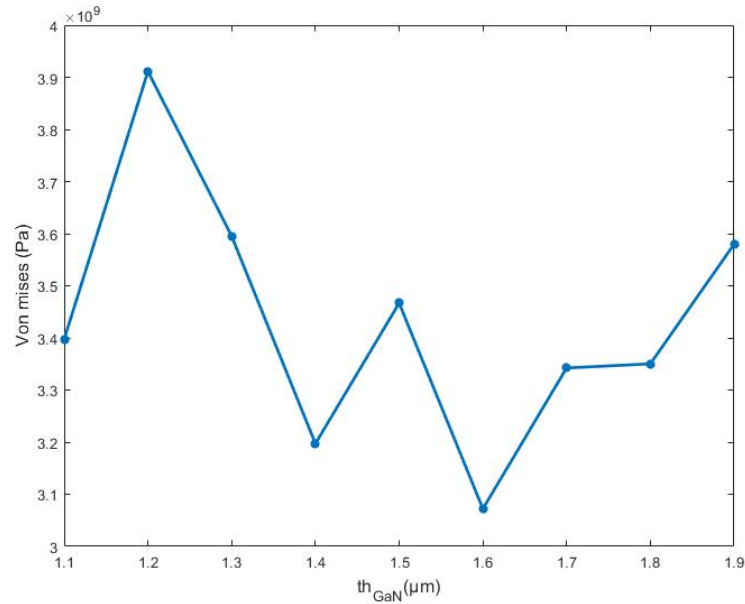


FIGURE 2.26 – a. Évolution des contraintes von Mises

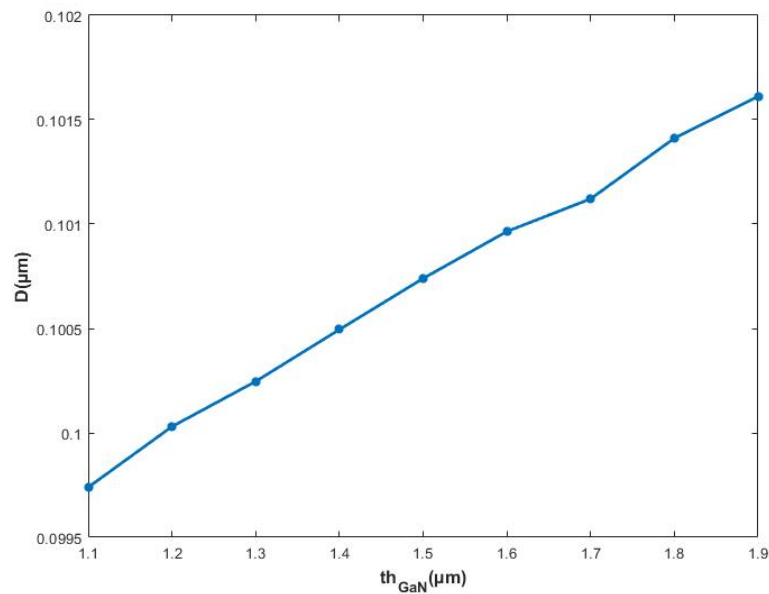


FIGURE 2.27 – b. Évolution des déplacements

FIGURE 2.28 – Évolution des contraintes von Mises **(a)** et des déplacements **(b)** dans la structure du HEMT en fonction de l'épaisseur de GaN  $th_{GaN}$ .

La figure 2.26 représente l'évolution des contraintes de von Mises en fonction de l'épaisseur de GaN, on remarque que l'évolution des contraintes est non linéaire. La figure 2.27 présente l'évolution des déplacements au sein de la structure du HEMT en fonction de la variation de l'épaisseur de GaN. L'influence de la variation de l'épaisseur du GaN est plus remarquable est importante dans le cas des contraintes de von Mises.

### Influence de la couche AlGaN

La couche d'AlGaN sert à créer une hétérojonction avec la couche de GaN et créer le canal des électrons. Pour identifier l'influence de cette couche sur le comportement mécanique du HEMT lors du fonctionnement. Nous avons réalisé des simulations numériques pour les différentes valeurs de l'épaisseur de la couche AlGaN  $th_{AlGaN}$ , dans une  $T_{ref}=150^{\circ}C$  et une  $P_{diss}=9$  W/mm. Les résultats sont présentés dans la figure 2.31.

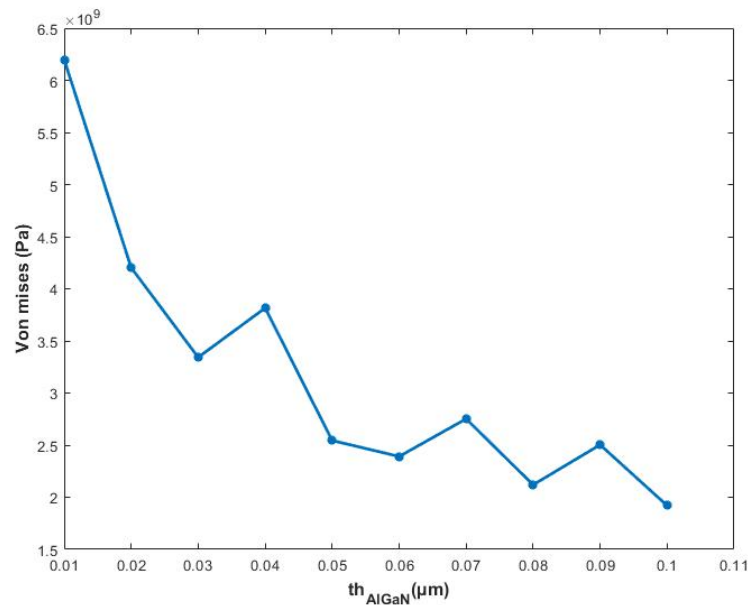


FIGURE 2.29 – a. Évolution des contraintes von Mises

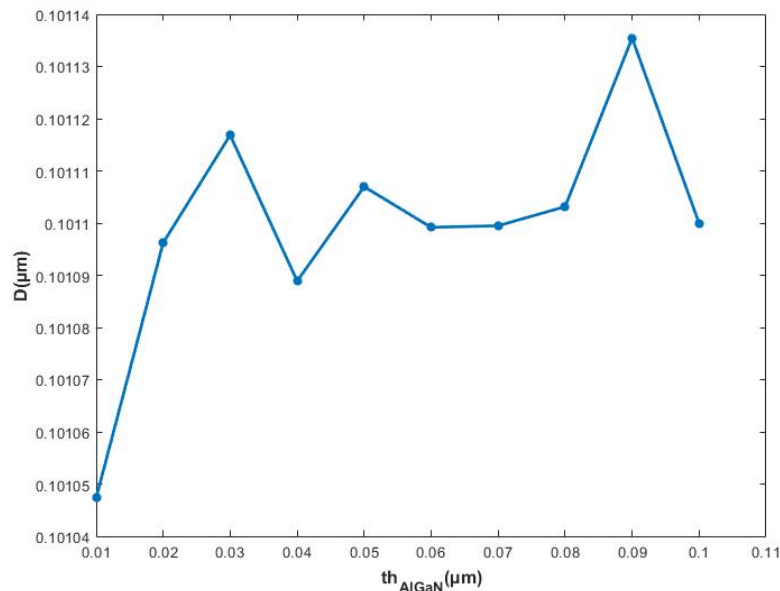


FIGURE 2.30 – b. Évolution des déplacements

FIGURE 2.31 – Évolution des contraintes von Mises et des déplacements dans la structure du HEMT en fonction de l'épaisseur de AlGaN.

Cette figure montre l'évolution des contraintes de von Mises et des déplacements dans la

structure du HEMT en fonction de l'épaisseur de la couche AlGa<sub>N</sub>, on remarque que ces contraintes diminuent dans la plupart des cas et parfois augmentent lorsque l'épaisseur augmente suivant une évolution non linéaire et non stable. Mais dans l'autre côté, les déplacements augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur, suivant une évolution non linéaire aussi et non stable. Cette couche influence clairement le comportement multiphysique du composant.

### **Influence du développement Z**

Le développement du transistor Z représente la profondeur de sa structure et la longueur de la grille, est un paramètre important dans la structure du HEMT. Pour identifier son impact sur le comportement mécanique de la structure on varie Z entre 90 et 200 dans une  $T_{ref}=150^{\circ}C$  et  $P_{diss}=9$  w/mm. Les résultats des simulations sont présentés dans la figure 2.34. Cette figure montre l'évolution des contraintes de von Mises et des déplacements dans la structure du HEMT en fonction du développement du composant, on remarque que ces contraintes diminuent dans la plupart des cas et parfois augmentent lorsque l'épaisseur augmente suivant une évolution non linéaire et non stable. Mais dans l'autre côté, les déplacements augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur, suivant une évolution non linéaire aussi. Par conséquent, ce paramètre influence clairement aussi le comportement multiphysique du composant.

## **2.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une modélisation multiphysique du HEMT. Nous avons également présenté les différentes notions, les propriétés des matériaux et les équations de modélisation multiphysique nécessaires. Puis on a développé des modèles, des codes et des interfaces des simulations avec les logiciels Comsol multiphysics et Matlab. La modélisation électro-thermomécanique a permis d'étudier et simuler le comportement thermique et mécanique du HEMT, à l'aide de logiciel Comsol multiphysics à base de la méthode des éléments finis. Tous ces outils ont permis d'observer l'influence de la puissance dissipée et la température de référence qui représentent les conditions de fonctionnement de HEMT sur son comportement thermique et mécanique. De plus, le modèle développé a permis d'étudier l'influence de plusieurs paramètres géométriques de la structure sur le comportement multiphysique du composant. On a constaté que la puissance dissipée au niveau de la zone active et la température de référence au-dessous du substrat ainsi que les paramètres géométriques ont un impact considérable sur le comportement multiphysique et le fonctionnement du HEMT qui peut conduire à des défaillances au niveau de sa structure et par suite influencer la fiabilité du composant entier. Le chapitre suivant sera consacré à la proposition des approches de l'optimisation. Dans le but de diminuer les effets des conditions du fonctionnement et les effets des paramètres géométriques sur la fiabilité de la technologie HEMT.

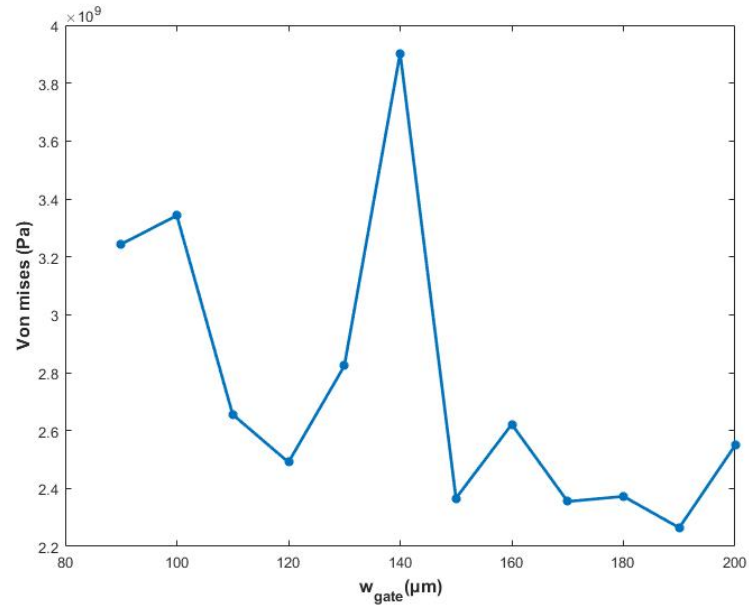


FIGURE 2.32 – a. Évolution des contraintes von Mises

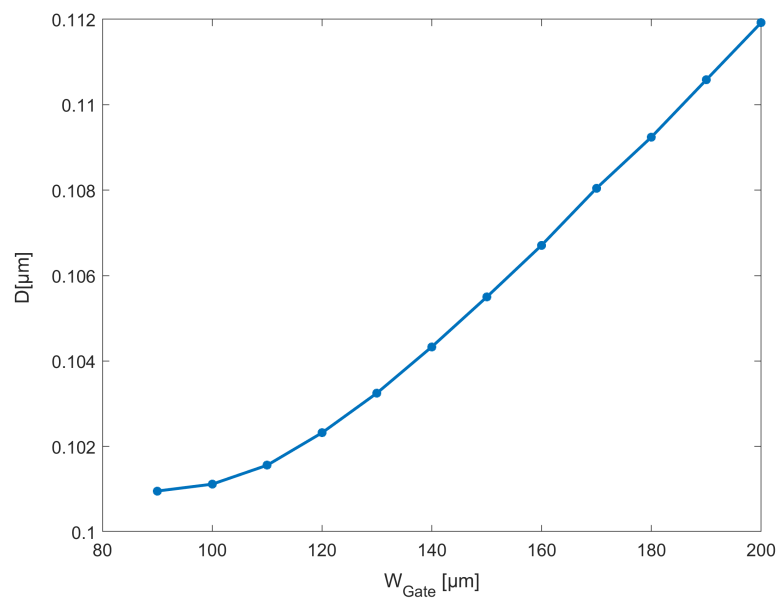


FIGURE 2.33 – b. Évolution des déplacements

FIGURE 2.34 – Évolution des contraintes von Mises et des déplacements dans la structure du HEMT en fonction de Z.

---

 Optimisation du transistor à haute mobilité d'électrons
 

---

## Sommaire

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>78</b>
<b>3.2</b>	<b>Optimisation en mécanique</b>	<b>79</b>
3.2.1	Optimisation de dimensionnement	79
3.2.2	Optimisation de forme	80
3.2.3	Optimisation de la topologie	81
3.2.4	Optimisation déterministe	82
<b>3.3</b>	<b>Optimisation à base des algorithmes évolutionnaires</b>	<b>82</b>
3.3.1	Algorithmes évolutionnaires	82
3.3.2	Stratégies d'évolution	83
3.3.3	Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy (CMA-ES)	84
<b>3.4</b>	<b>Approche basée métamodèle</b>	<b>86</b>
3.4.1	Présentation du métamodèle	86
3.4.2	Métamodèle estimé dans la boucle d'optimisation	87
3.4.3	Construction des métamodèles	87
3.4.4	Plans d'expérience standards	89
3.4.5	Méthodes de remplissage de l'espace (Space Filling Design)	89
3.4.6	Les différents types de métamodèles	90
<b>3.5</b>	<b>CMA-ES assistée par le krigeage</b>	<b>94</b>
3.5.1	Mangement du métamodèle	94
3.5.2	Qualité du métamodèle	94
3.5.3	Algorithme KA-CMA-ES	95
<b>3.6</b>	<b>Approche par modèle éléments finis du HEMT</b>	<b>95</b>
<b>3.7</b>	<b>Optimisation du transistor à haute mobilité d'électron</b>	<b>96</b>
3.7.1	Optimisation du comportement thermique du HEMT	96
3.7.2	Optimisation électro-thermomécanique	100
<b>3.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>102</b>

---

## 3.1 Introduction

La fiabilité des systèmes mécatroniques à haute puissance est un enjeu majeur dans le domaine de l'industrie actuellement. Elles peuvent être liées à des phénomènes au sein des composants de ces systèmes. Pour le cas du HEMT, la température du fonctionnement est un facteur très important qui peut influencer sa fiabilité, car la plupart de ses caractéristiques telles que la mobilité des électrons, la conductivité thermique [70], la vitesse de saturation et autres sont en fonction de la température [71, 72]. Toutes ces caractéristiques ont tendance à se dégrader et diminuer avec l'élévation de la température à cause du phénomène de l'auto-échauffement du transistor [73, 53]. De plus, les conditions du fonctionnement influencent le comportement mécanique de la structure du HEMT, ces conditions engendrent des déplacements, des déformations et des contraintes au niveau de la structure [74, 75]. Ces phénomènes électro-thermomécanique donnent naissance à des dégradations comme l'enterrement de la grille, endommagement de la connexion entre la puce et le boîtier [76], la dégradation de la mobilité des électrons et la réduction de courant [25]. Dans le cas des systèmes aéroportés, la majorité des défaillances sont causées par des amplificateurs à haute puissance au niveau de ses transistors à haute puissance, ces défaillances sont à cause des conditions du fonctionnement des transistors qui influence négativement leur fiabilité et donc celle des systèmes [21]. Plusieurs travaux ont traité la modélisation de ces défaillances (comme détaillé dans le chapitre 2) sans proposer des solutions. A cause de toutes ces contraintes, il est nécessaire d'entamer une étude d'optimisation de la fiabilité du HEMT.

Par conséquent, nous allons entamer une étude de l'optimisation du comportement thermomécanique du HEMT en utilisant deux méthodes que nous avons développées. Parmi les méthodes d'optimisation utilisées, nous citons la méthode CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy), c'est une méthode de recherche stochastique basée sur la population dans des espaces continus et discrets [77], elle sert à résoudre des problèmes d'optimisation par la minimisation d'une fonction objectif, la fonction objectif à minimiser dépend de mode de défaillance. Cette méthode a montré une efficacité à travers des résultats obtenus dans plusieurs travaux qui visent l'optimisation des systèmes [78, 79, 80]. La méthode CMA-ES est basée sur le modèle éléments finis pour résoudre le problème d'optimisation, mais cette méthode n'est plus praticable quand le modèle éléments finis dure des dizaines de minutes. Alors que, le processus de l'optimisation nécessite des centaines ou des milliers simulations. Par l'intégration de la méthode CMA-ES avec les métamodèles de krigeage, nous obtenons la méthode KA-CMA-ES (Krigin Assisted-Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy) qui permet de dépasser la contrainte de temps du calcul. Nous allons appliquer ces deux méthodes pour résoudre les problèmes de l'optimisation thermique et thermomécanique.

Dans un premier temps, on va présenter l'optimisation en mécanique. Puis on va définir l'optimisation évolutionnaire et ses principes. On détaillera par la suite la méthode CMA-ES avec ses paramètres, les métamodèles de Krigeage et comment on obtient la méthode KA-CMA-ES. Dans la partie suivante, on va développer un couplage entre le modèle éléments finis et le modèle statistique KA-CMA-ES, grâce à ce couplage on va résoudre les problèmes de l'optimisation proposés. A la fin, on va présenter les résultats extraits et on fera une comparaison de la variation de la fonction objectif avant et après l'optimisation.



## 3.2 Optimisation en mécanique

L'optimisation est parmi les branches des mathématiques, et précisément de l'analyse fonctionnelle, elle s'intéresse à des méthodes qui permettent de minimiser une fonction. L'optimisation de la conception est basée sur la recherche des paramètres intervenant dans la phase de conception, qui minimisent une fonction objectif (coût, volume, masse, ...) et qui vérifient les contraintes de performances mécaniques, physiques et géométriques. Un problème d'optimisation pour minimiser une fonction peut être formulé mathématiquement, ce que nous allons détailler dans la suite de cette partie. La détermination de la forme appropriée d'un composant structural est un défi de grande importance pour les concepteurs et les ingénieurs. Dans le domaine de la mécanique des structures, l'impact de la bonne conception d'une pièce influence sa performance et sa durée de vie et sa mise en service. Le domaine de l'optimisation a retenu l'attention des développeurs et des chercheurs vu le taux des publications dans ce domaine. L'optimisation intervient d'une façon primordiale dans l'augmentation et l'amélioration de performance et la minimisation des masses des structures, prenant en considération l'économie de la matière.

Actuellement, l'optimisation a reconnu une forte demande dans le domaine industriel vu les différents défis qui apparaissent lors de développement des nouvelles structures. La détermination d'une conception optimale d'un modèle de structure en tenant compte des différentes contraintes (coût, performance) représente un enjeu majeur pour les concepteurs et les ingénieurs. Alors que, l'optimisation des structures sert à assurer une conception robuste en augmentant la performance avec un coût minimal. Elles existent trois grandes catégories des problèmes d'optimisation : optimisation de dimensionnement, optimisation de forme et optimisation topologique. Elles sont en fonction de la nature des variables de conception, ces trois types seront détaillés par la suite [81].

### 3.2.1 Optimisation de dimensionnement

Optimisation de dimensionnement ou de contrôle sert à déterminer la conception optimale en gardant la forme et la topologie fixes (figure 3.1), les variables dans ce cas sont la section ou l'épaisseur du composant alors il n'y a pas de modification du modèle géométrique ce qui limite la variété des formes possibles. L'objectif principal de l'optimisation de conception est de

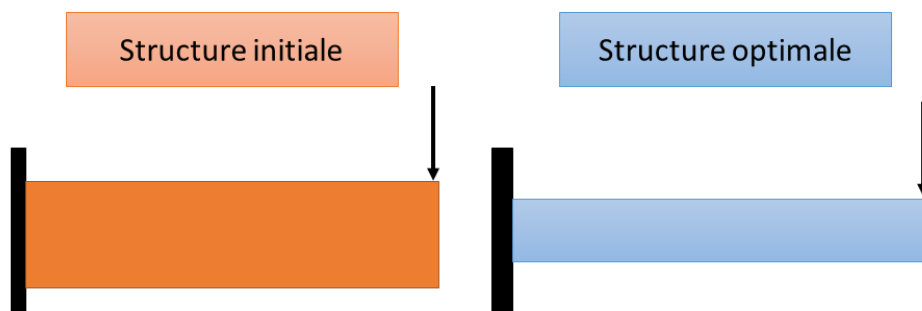


FIGURE 3.1 – Modèle d'optimisation de dimensionnement.

trouver les paramètres de conception qui minimise une fonction qu'on appelle fonction objectif.

Un problème d'optimisation de la conception peut être formulé généralement comme suit :

$$\begin{aligned} & \min f(d) \\ \text{st. } & \begin{cases} G_i(d, p) \geq 0 & i = 1, \dots, m \\ h_j(d) \geq 0 & j = m + 1, \dots, n_k \end{cases} \end{aligned} \quad (3.1)$$

avec :

- $d$  : représente le vecteur des variables d'optimisation ou des variables de décision.
- $f(d)$  : est la fonction objectif à minimiser.
- $p$  : est le vecteur des paramètres déterministes.
- $G_i(d, p)$  : sont les fonctions de performances ou la fonction d'état limite.
- $h_j$  : sont les fonctions de faisabilité géométrique et physique qui représentent aussi les bornes inférieures et supérieures des variables d'optimisation.

### 3.2.2 Optimisation de forme

L'optimisation de forme sert à chercher la meilleure forme possible en modifiant les frontières et les contours de l'objet (figure 3.2). Dans ce cas l'objectif est d'optimiser la fonction objectif en modifiant les contours de l'objet afin de déterminer la meilleure forme tandis que la topologie reste fixe. C'est-à-dire que l'inconnu est un contour(2D) ou une surface(3D). La frontière est paramétrée par des noeuds de contrôle et le gradient de la fonction d'adaptation est calculé par rapport à la position de ces noeuds, que l'on déplace itérativement dans la direction de ce gradient. Ce type d'optimisation se trouve souvent dans le domaine industriel des avions, l'automobile, etc. L'optimisation de forme suit la démarche générale suivante [82] :

- Vérifier l'existence d'une solution optimale du problème d'optimisation, et parfois l'unicité de cette solution mais généralement ça reste difficile.
- Étudier les conditions d'optimalité qui caractérisent les formes optimales.
- Calculer la solution optimale ou des solutions approchées satisfaisantes. Dans le cas des problèmes industriels, la démarche devient assez différente. Le concepteur possède une forme de départ à améliorer, alors que le chercheur doit proposer une méthode pour la modification et l'amélioration de la forme en prenant en considération le cahier des charges (contraintes).

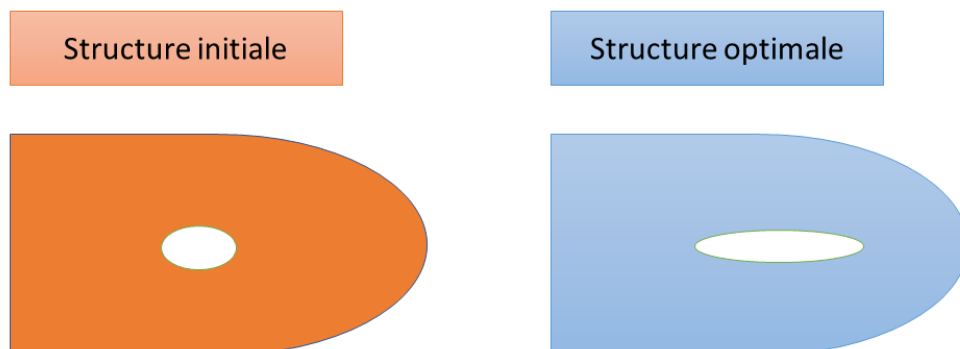


FIGURE 3.2 – Modèle d'optimisation de la forme.

### 3.2.3 Optimisation de la topologie

Elle est basée sur la modification de la nature de la structure par le contrôle de la topologie et la géométrie du composant, afin de trouver une topologie optimale de la structure à travers la détermination de la forme ou les dimensions transversales optimales, en tenant compte de la géométrie prédéfinie, les conditions aux limites et les charges (Figure 3.3). L'optimisation de la topologie des structures est un sujet d'actualité, plusieurs chercheurs et développeurs pensent à s'approfondir dans ce type d'optimisation qui sera la clé d'une révolution énorme dans le domaine de l'industrie et des structures. L'objectif de ce type d'optimisation est de déterminer les sous-domaines  $\pi$  occupé par la matière constitutive d'une pièce, sans a priori sur sa topologie. La recherche du domaine structural  $\pi$  s'effectue dans un domaine de référence noté  $\Omega$  plus vaste, inclus dans le plan  $R^2$  ou bien dans l'espace  $R^3$ . La formulation mathématique d'un problème d'optimisation en général sera détaillée dans la suite, dans le cas de l'optimisation topologique le problème s'écrit sous la forme [81] :

$$\begin{cases} \min_{\omega \subset \Omega} : f(\omega) \\ \text{s.c} : g_i(\omega) \leq 0 & 1 \leq i \leq m \\ h_j(\omega) = 0 & 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.2)$$

où  $f$  est la fonction objectif à minimiser,  $g_i$  et  $h_j$  les fonctions représentant les contraintes, en réalité ce sont des fonctions implicites et non linéaires en  $\omega$ . Pour les évaluer, il est nécessaire de résoudre une équation d'état et le problème d'optimisation topologique qui se formule comme suite :

$$\begin{cases} \min_{w \in \Omega} : f(u(w), \omega) \\ \text{s.c} : g_i(u(w), \omega) \leq 0 & 1 \leq i \leq m \\ h_j(u(w), \omega) = 0 & 1 \leq j \leq n \end{cases} \quad (3.3)$$

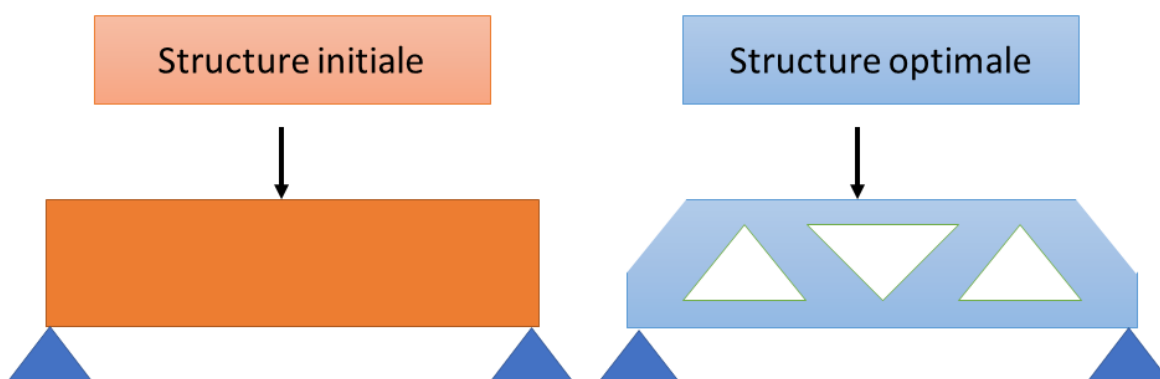


FIGURE 3.3 – Modèle d'optimisation topologique.

avec  $u$  représente la solution de l'équation d'équilibre. Parmi les types des fonctions objectif habituellement considérés en optimisation des structures mécaniques, on cite le volume et la

compliance. Dans le cas où le volume est considéré comme une fonction objectif, on lui associe généralement une contrainte sur la compliance. Mais, si la compliance est considérée comme fonction objectif, la limitation portera sur le volume. La problématique consiste donc à la recherche de la structure la plus rigide possible, sous une contrainte imposée représentée par un volume limite. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation de la topologie, nous pouvons citer comme exemples :

- La méthode des lignes de niveaux ;
- La méthode de gradient topologique ;
- Les méthodes basées sur le gradient de forme ;
- Les méthodes évolutives ;
- Les méthodes de distribution de matière.

### 3.2.4 Optimisation déterministe

Dans une optimisation déterministe on ne prend pas en considération des incertitudes sur les variables. De plus, le concepteur introduit des coefficients de sécurité afin d'augmenter la sûreté de sa conception. Ces coefficients seront l'équivalent des incertitudes dans la structure. Le choix des valeurs de ces coefficients est en fonction de l'expérience de l'ingénieur, dans le but d'identifier et éviter les situations dangereuses de la structure. Le processus d'optimisation de conception déterministe est composé de trois étapes principales :

1. La reproduction géométrique du composant sous forme d'un modèle géométrique par un logiciel CAO.
2. Analyse du modèle par la méthode des éléments finis.
3. Optimisation de la structure par la minimisation d'une fonction objectif tel que le coût ou le volume.

## 3.3 Optimisation à base des algorithmes évolutionnaires

### 3.3.1 Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires sont des approches inspirées de la nature à travers la théorie de l'évolution de Darwin. Ces algorithmes sont liés fortement au domaine de la biologie, mais ça n'empêche pas de les utiliser dans d'autres domaines. Ils permettent de résoudre des problèmes d'optimisation dont la fonction n'est pas continue. Par contre ils peuvent être très coûteux en terme du temps de calcul, car le principe de cette approche nécessite l'évaluation de la fonction objectif en un grand nombre de points afin d'obtenir l'optimum ciblé [83]. On s'intéresse à deux types d'algorithmes évolutionnaires. Le premier est les algorithmes génétiques (AG) dont la représentation des individus se fait sous forme binaire. Le deuxième est les stratégies d'évolution dont les individus sont représentés par des nombres réels, on détaillera ce type dans la partie suivante.

### 3.3.2 Stratégies d'évolution

La stratégie d'évolution (SE) est l'un des types des algorithmes évolutionnaires, elles sont des méthodes d'optimisation stochastiques sans dérivées. Les SE sont actuellement populaires pour la résolution des problèmes de l'optimisation. Lors de la résolution du problème, elles ont une capacité de converger vers un optimum global [84]. Comme les algorithmes d'évolution, les stratégies d'évolution suivent le principe de l'évolution biologique qui est constitué de plusieurs opérateurs et plusieurs étapes :

- Initialisation et évaluation de la population : à partir du domaine d'optimisation on génère la population initiale dont le nombre des individus de la population est déterminé par l'utilisateur.
- Sélection : l'opérateur de sélection permet de sélectionner ou déterminer les individus qui participeront dans la recombinaison. Ces individus seront la base de la nouvelle génération. On considère  $\mu$  le nombre des anciens individus ou parents, et  $\lambda$  le nombre des nouveaux individus générés ou enfants. Les SE utilisent deux types fameux de la sélection [85] :
  - \* Sélection par  $(\mu + \lambda) - ES$  : est basée sur la sélection des  $\mu$  meilleurs individus (solutions) parmi une population de  $\mu$  parents et  $\lambda$  enfants ( $\mu + \lambda$ ) après chaque évaluation des enfants.
  - \* Sélection par  $(\mu, 2) - ES$  : consiste à sélectionner uniquement les  $\mu$  meilleurs individus (solutions) de la population enfants, en négligeant la population parente.
- Recombinaison/croisement : est un opérateur qui permet de générer un nouvel individu par la combinaison des individus sélectionnés. Il existe plusieurs types de recombinaison, on s'intéresse aux plus utilisées dans la stratégie d'évolution :
  - \* La recombinaison discrète : Consiste à choisir par sélection deux parents dans la population. La valeur de l'un des deux parents sera choisie aléatoirement pour chaque composante du nouvel individu.
  - \* La recombinaison intermédiaire : Cette recombinaison considère la valeur moyenne des individus parents pour générer les nouveaux individus.
  - \* La recombinaison pondérée : est identique à la recombinaison précédente mais la seule différence est que pour chaque composante du vecteur des variables d'optimisation un nouveau couple de parents est choisi.
- Mutation : L'opérateur de mutation a comme objective la modification et la perturbation d'un individu. La mutation gaussienne consiste à ajouter une perturbation ou un bruit gaussien centré au résultat de la recombinaison, c'est la principale source de variation évolutionnaire des individus dans les stratégies d'évolution. Les trois opérateurs de mutation fréquemment utilisés dans les SE sont [82, 83] :
  - Mutation gaussienne isotrope ou sphérique.
  - Mutation gaussienne anisotrope ou parallèle aux axes.
  - Mutation gaussienne corrélée.

### 3.3.3 Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy (CMA-ES)

La méthode CMA-ES est le meilleur membre de la famille des algorithmes d'évolution, est une méthode d'optimisation stochastique sans dérivée et peut s'adapter à des problèmes d'optimisation non convexe, CMA-ES est un algorithme d'optimisation plus puissant par rapport aux autres, elle est basée sur les quatre principes de la sélection naturelle : évolution, sélection, recombinaison et mutation [86]. La recombinaison des éléments (parents) d'une population génère de nouveaux individus (enfants), les nouveaux individus subissent une mutation pour qu'ils deviennent des nouveaux membres de la même population, afin de garder et adapter la taille de population une sélection est faite en choisissant les meilleurs individus après la mutation. La mise en place des opérations évolutionnaires assure cette démarche, pour guider la démarche vers un optimum global dans un espace de recherche continu ou discret [84].

CMA-ES  $(\lambda, \mu)$  est basée sur l'adaptation de la matrice de covariance de la loi multi-normale dans  $\mathbb{R}^n$ , cette adaptation est équivalente de la construction d'une approximation de la fonction objectif  $f(x)$ , cette méthode génère  $\lambda$  nouveaux individus à partir de  $\mu$  éléments de la population. CMA-ES  $(\lambda, \mu)$  génère la population en échantillonnant une distribution multinormale [86, 87] :

$$\mathbf{x}_k^{(g)} = \mathbf{m}^{(g)} + \sigma^{(\varepsilon)} \mathcal{N} \left( 0, \mathbf{C}^{(g)} \right) \quad \text{for } k = 1, \dots, \lambda \quad (3.4)$$

avec :

- $\mathbf{x}_k^{(g)} \in \mathbb{R}^n$ ,  $k^{\text{th}}$  progéniture (individu, point de recherche) de la génération  $g$  ;
- $\mathcal{N} \left( 0, \mathbf{C}^{(g)} \right)$  est une distribution normale multivariée avec une moyenne nulle et une matrice de covariance  $\mathbf{C}^{(g)}$  ;
- $\mathbf{m}^{(g)} \in \mathbb{R}^n$  valeur moyenne de la distribution de la recherche à la génération  $g$  ;
- $\sigma^{(\varepsilon)} \in \mathbb{R}_{>0}$ , la taille de pas, à la génération  $g$  ;
- $\mathbf{C}^{(g)} \in \mathbb{R}^{n \times n}$  matrice covariance à la génération  $g$  ;
- $\lambda \geq 2$ , la taille de la population.

Par suite, les images des individus générés par échantillonnage sont évaluées par la fonction objectif, les meilleurs individus seront regroupés dans le vecteur moyen  $\mathbf{m}$ , il a comme expression :

$$\mathbf{m}^{(g+1)} = \sum_{i=1}^{\mu} w_i \mathbf{x}_{i,\lambda}^{(g+1)} \quad (3.5)$$

et

$$\sum_{i=1}^{\mu} w_i = 1, \quad w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_{\mu} > 0 \quad (3.6)$$

avec :

- $\mu \leq \lambda$  le nombre des points sélectionnés ou la taille de la population originale (parents).
- $w_{i=1..,\mu} \in \mathbb{R}_{>0}$ , représente les poids de recombinaison, sont strictement positifs et vérifient l'équation 3.6.
- $\mathbf{x}_{i,\lambda}$  : le  $i^{\text{ème}}$  meilleur individu sélectionné de l'ensemble des individus  $[\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{\lambda}]$  générés par l'équation 3.4.
- $i$  :  $\lambda$  est l'indice du  $i^{\text{ème}}$  individu après classement tel que,  $f(x_{1:\lambda}) \leq f(x_{2:\lambda}) \leq \dots \leq f(x_{\lambda:\lambda})$ , où  $f$  est la fonction objectif.

Après la mise à jour du vecteur moyen  $\mathbf{m}$ , l'étape suivante est l'adaptation de pas  $\sigma$  et la matrice

de covariance  $C$ . La mise à jour des deux paramètres se fait par deux chemins d'évolution  $p_c$  et  $p_\sigma$  [88]. Cependant, la suite du processus de la méthode CMA-ES nécessite d'actualiser le chemin d'évolution  $p_\sigma$  permettant de mettre à jour la taille du pas  $\sigma$ , les deux paramètres se calculent suivant les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_\sigma^{(g+1)} &= (1 - c_\sigma) \mathbf{p}_\sigma^{(g)} + \sqrt{c_\sigma (2 - c_\sigma)} \sqrt{\mu_w} \left( \mathbf{C}^{(t)} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\mathbf{m}^{(g+1)} - \mathbf{m}^{(g)}}{\sigma^{(t)}} \\ &= (1 - c_\sigma) \mathbf{p}_\sigma^{(g)} + \sqrt{c_\sigma (2 - c_\sigma)} \sqrt{\mu_w} \sum_{i=1}^{\mu} w_i \mathbf{z}_{i,\lambda} \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\sigma^{(g+1)} = \sigma^{(g)} \exp \left( \frac{c_\sigma}{d_\sigma} \left( \frac{\|\mathbf{p}_\sigma^{(g+1)}\|}{\mathbb{E}(\|\mathcal{N}_d(\mathbf{0}, \mathbf{I})\|)} - 1 \right) \right) \quad (3.8)$$

$p_\sigma^{(g)} \in \mathbb{R}^d$  : le chemin d'évolution pour la taille du pas à la génération  $g$ , sa valeur initiale est  $\mathbf{p}_\sigma^{(0)} = \mathbf{0}$

$c_\sigma \in [0, 1]$  : la constante du temps pour l'adaptation de la taille du pas, sa valeur par défaut est  $c_\sigma = (\mu_w + 2) / (d + \mu_w + 5)$

$\mu_w$  : la variance masse de sélection effective (variance effective sélection mass) , sa valeur est  $\mu_w = (\sum_{i=1}^{\mu} w_i)^2 / \sum_{i=1}^{\mu} w_i^2$

Pour mettre à jour la matrice de covariance  $C$ , il faut actualiser le chemin d'évolution  $p_c$ , ça se fait suivant les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_c^{(g+1)} &= (1 - c_c) \mathbf{p}_c^{(g)} + h_\sigma \sqrt{c_c (2 - c_c)} \sqrt{\mu_u} \frac{\mathbf{m}^{(g+1)} - \mathbf{m}^{(g)}}{\sigma^{(g)}} \\ &= (1 - c_c) \mathbf{p}_c^{(g)} + h_\sigma \sqrt{c_c (2 - c_c)} \sqrt{\mu_w} \sum_{i=1}^{\mu} w_i \left( \mathbf{C}^{(g)} \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{z}_{i,\lambda} \end{aligned} \quad (3.9)$$

alors que la matrice de covariance devient comme suit :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^{(g+1)} &= (1 - c_1 - c_u) \mathbf{C}^{(g)} + c_1 \left( \mathbf{p}_c^{(g+1)} \left( \mathbf{p}_c^{(g+1)} \right)^T + \delta(h_\sigma) \mathbf{C}^{(g)} \right) \\ &\quad + c_\mu \sum_{i=1}^u w_i \left( \left( \mathbf{C}^{(g)} \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{z}_{i,\lambda} \right) \left( \left( \mathbf{C}^{(g)} \right)^{\frac{1}{2}} \mathbf{z}_{i,\lambda} \right)^T \end{aligned} \quad (3.10)$$

avec :

$p_c^{(g)} \in \mathbb{R}^d$  : le chemin d'évolution pour la taille du pas à la génération  $g$ , sa valeur initiale est  $\mathbf{p}_c^{(0)} = \mathbf{0}$

$c_c \in [0, 1]$  : la constante d'adaptation de la matrice de covariance.

$h_\sigma$  : est la fonction d'Heaviside.

$c_1$  et  $c_\mu$  : exprime le taux d'apprentissage (learning rate) respectivement pour rank-one-update et rank  $-\mu$  -update  $\left( \mathbf{C}^{(t)} \right)^{\frac{1}{2}}$ , leurs valeurs par défaut sont  $c_1 = \frac{2}{(d+1.3)^2 + \mu_{uv}}$ ,

et  $c_u = \min \left( 1 - c_1, 2 \frac{\mu_v - 2 + 1/\mu_w}{(d+2)^2 + \alpha_u \mu_w / 2} \right)$  avec  $\alpha_\mu = 2$ .

$\delta(h_\sigma) = (1 - h_\sigma) c_c (2 - c_c)$ .

Toutes ces étapes peuvent s'organiser dans un algorithme, qui s'exécute en fonction des conditions de convergence choisis, suivant un ordre bien précis, l'algorithme se répète jusqu'à la

satisfaction de la condition de convergence en retournant le meilleur individu. Toutes les étapes nécessaires de la méthode CMA-ES sont ordonnées suivant l'algorithme 1 [77, 89, 90] :

---

Algorithm 1 CMA-ES ( $\lambda, \mu$ )

---

Initialiser les paramètres de CMA-ES  $C^{(0)} = I, \sigma^{(0)}$  et les paramètres de sélection  
initialiser le vecteur moyen  $m^{(0)}$ ;  
préciser les conditions de convergence ;  
le nombre de génération  $g \leftarrow 0$   
tant que " la condition de convergence n'est pas vérifiée " faire  
Générer une population de  $\lambda$  individus selon la loi :  
 $x_i^g = \mathbf{m}^{(g)} + \sigma^{(g)} \mathcal{N}(0, C^{(g)})$ , for  $i = 1, \dots, \lambda$   
Évaluer la fonction coût de chacun de  $\lambda$  individus.  
Classer les meilleurs individus générés  
Déterminer le vecteur moyen par mutation des  $\mu$  meilleurs individus selon :  
 $\mathbf{m}^{(g+1)} = \sum_{i=1}^{\mu} \omega_i z_i^{(g+1)}$   
Mettre à jour le chemin d'évolution  $P_{(\sigma)}$   
Mettre à jour la taille de pas  $\sigma^{(g+1)}$   
Mettre à jour le chemin d'évolution  $P_{(c)}$   
Mettre à jour la matrice de covariance  $C^{(g+1)}$   
fin tant que  
Retourner les meilleurs individus  $x_i^{g+1}$

---

### 3.4 Approche basée métamodèle

#### 3.4.1 Présentation du métamodèle

Durant le développement et la conception des équipements et des systèmes complexes, des modélisations détaillées sont nécessaires afin d'évaluer et améliorer ces systèmes. La modélisation se fait par plusieurs méthodes telle que la méthode des éléments finis, elle est basée sur des simulations détaillées prennent souvent beaucoup de temps pour s'exécuter. Et parfois il est nécessaire d'effectuer des centaines ou des milliers simulations, comme le cas de l'étude de fiabilité ou d'optimisation pour obtenir des bons résultats, ce qui est impraticable en termes de temps. Cette contrainte nous ramène à chercher d'autres méthodes plus pertinentes. Cependant, les métamodèles sont des modèles simplifiés des modèles de simulation détaillés. Les évaluations à l'aide des métamodèles sont plus efficaces et plus praticables par rapport aux modèles détaillés en termes du temps. Un métamodèle est une approximation mathématique d'un modèle détaillé et généralement de grande taille. Les métamodèles peuvent être utilisés lorsqu'un grand nombre d'évaluations sont nécessaires, comme le cas de l'optimisation et l'évaluation de la fiabilité des systèmes.

Soit  $x$  un vecteur d'entrée (valeurs de variables de conception), il se traduit par un vecteur de sortie (valeurs de réponse)  $y$ . Le modèle détaillé peut être considéré comme une fonction  $f : R \rightarrow R$  qui signifie que la fonction  $f$  transforme l'ensemble des nombres réels de  $k$  (variables



de conception) dans un autre ensemble de nombres réels de  $l$  (réponses) [81] :

$$y = f(x) \quad (3.11)$$

Pour chaque réponse scalaire  $y$ , un métamodèle peut être construit pour approcher la vraie réponse comme :

$$\hat{y} = s(x) \quad (3.12)$$

où  $s(x)$  est la fonction mathématique définissant le métamodèle et qui associe les variables de conception  $x$  à la réponse prévue  $\hat{y}$ . Généralement, cette approximation n'est pas exacte et la réponse prédite  $\hat{y}$  se diffère de la  $y$  réaction observée depuis le modèle détaillé, c'est-à-dire :

$$y = \hat{y} + \varepsilon = s(x) + \varepsilon \quad (3.13)$$

où l'erreur  $\varepsilon$  représente donc l'erreur d'approximation. Un métamodèle pour une réponse unique construit à partir d'un ensemble de données d'entrée  $x_i$  et  $y_i$  de sortie correspondant à  $y_i = f(x_i)$ , où  $i = 1, \dots, n$  et  $n$  sont le nombre de modèles utilisés pour ajuster le modèle. Par conséquent,  $n$  évaluations du modèle détaillé avec différents paramètres variables  $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_k)^T$  des variables de conception  $k$  nécessaires pour monter le métamodèle.

### 3.4.2 Métamodèle estimé dans la boucle d'optimisation

Il consiste à remplacer la boucle d'estimation de l'incertitude par la construction d'un métamodèle à l'intérieur de la boucle d'optimisation. Ainsi, à chaque pas d'optimisation  $x_i$ , on construit un métamodèle pour les fonctions :

$$\begin{aligned} u &\mapsto f(x_i, u) \\ u &\mapsto g_j(x_i, u) \quad j = 1, \dots, q \end{aligned}$$

Le coût de cette approche est toujours en  $N \times n$ , où  $n$  est le nombre de points nécessaire pour estimer des métamodèles. Cependant,  $n$  est beaucoup plus petit que pour quelques méthodes comme celle de Monte Carlo.

### 3.4.3 Construction des métamodèles

Durant le développement et la conception des équipements et des systèmes complexes, des modélisations détaillées sont nécessaires afin d'évaluer et améliorer ces systèmes. La modélisation se fait par plusieurs méthodes telle que la méthode des éléments finis, elle est basée sur des simulations détaillées prennent souvent beaucoup de temps pour s'exécuter. Et parfois il est nécessaire d'effectuer des centaines ou des milliers simulations, comme le cas de l'étude de fiabilité ou d'optimisation pour obtenir des bons résultats, ce qui est impraticable en termes de temps. Cette contrainte nous ramène à chercher d'autres méthodes plus pertinentes. Cependant, les métamodèles sont des modèles simplifiés des modèles de simulation détaillés. Les évaluations à l'aide des métamodèles sont plus efficaces et plus praticables par rapport aux modèles détaillés en termes du temps. Un métamodèle est une approximation mathématique d'un modèle détaillé

et généralement de grande taille. Les métamodèles peuvent être utilisés lorsqu'un grand nombre d'évaluations est nécessaire, comme le cas de l'optimisation et l'évaluation de la fiabilité des systèmes. La construction et l'élaboration des métamodèles se fait suivant plusieurs étapes (figure 3.4) :

1. Échantillonnage : Une procédure permettant d'obtenir un ensemble de points  $x_i$  de l'espace de conception par la méthode des plans d'expériences. Les plans d'expériences sont générés par plusieurs approches telles que les plans d'expérience standards ou méthodes de remplissage de l'espace.
2. Évaluation des réponses exactes : Une procédure qui permet d'obtenir les valeurs des  $y_i$  (deuxième partie de l'espace d'apprentissage  $E_a$ ) de la fonction considérée aux points obtenus soit par la stratégie de tirage soit par la procédure d'enrichissement. Cette phase fait appel au modèle original (mécanique) considéré et finalisé la construction de la base d'apprentissage  $E_a$  composée de couples de sites et de réponses  $(x_i, y_i)$ .
3. La construction du métamodèle : Elle nécessite l'emploi de méthodologies spécifiques au modèle de substitution utilisé. La plupart du temps, lors de la phase de construction, un certain nombre d'opérateurs est construit et ces derniers restent constants lors de l'évaluation du métamodèle. Cette phase de construction peut s'avérer particulièrement longue pour certains modèles de substitution.
4. Validation du métamodèle : elle se fait par la mesure de sa précision basée sur la minimisation de l'erreur entre le modèle de substitution et le modèle exact en quelques points. Elle peut être considérée comme un test de convergence du métamodèle, qui permet de prendre la décision de satisfaction ou l'enrichissement du métamodèle.
5. Une procédure d'enrichissement : dans le cas où la convergence n'est pas assurée, cette étape permet d'ajouter des nouveaux sites dans la base d'apprentissage.

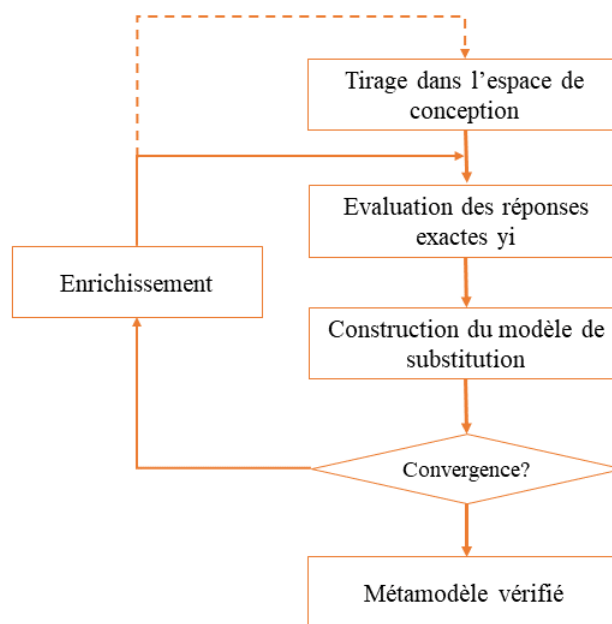


FIGURE 3.4 – Organigramme du processus de construction d'un métamodèle.

### 3.4.4 Plans d'expérience standards

Les théories des plans d'expériences proviennent de la planification des expériences physiques. L'idée de base est de recueillir autant d'informations que possible à partir d'un nombre limité d'expériences. Ces informations obtenues sont souvent utilisées pour identifier l'influence des changements des variables sur la réponse. Parmi ces plans d'expérience standards on cite :

- Les plans factoriels complets  $l^k$  : sont basés sur le remplissage de l'espace de conception à l'aide d'une grille régulière. Ces plans présentent l'avantage d'offrir un très bon remplissage qui n'est cependant valable que pour des faibles niveaux ( $l = 2$  ou bien  $l = 3$ ), et  $k$  représente le nombre de variables dans l'espace de conception.
- Les plans factoriels fractionnaires  $l^{k-r}$  : ces plans consistent à prendre des sous-ensembles des plans factoriels complets. Il s'agit donc d'une réduction du nombre de simulations.
- Les plans composites (CDD) : sont basés sur l'amélioration de certaines propriétés des plans factoriels à 2 niveaux. Ils sont construits à partir d'un plan factoriel complet ou fractionnaire avec l'ajout de nouveaux points. Ces plans d'expérience sont proposés pour approcher des surfaces de réponse de second degré. Mais, ils ne présentent pas une bonne répartition des points sur l'espace de conception.
- Les plans de Box-Behnken (BBD) : dans le cas de ces plans chaque paramètre ne peut prendre que 3 niveaux. Les tirages obtenus correspondent justement au milieu des arêtes de l'hypercube formé par l'espace de conception avec l'ajout du point central de l'hypercube [91].

### 3.4.5 Méthodes de remplissage de l'espace (Space Filling Design)

La théorie des plans d'expérience standard tend à mettre les points d'échantillonnage à la frontière de l'espace de conception et ne met que quelques points à l'intérieur. Pour qu'un plan d'expérience soit approprié pour le cas des métamodèles complexes, il faut donc viser à étendre les points de conception dans l'espace de conception complet. Le but est donc de trouver un compromis entre le remplissage de l'espace, le nombre de sites fournis par la méthode et l'uniformité de ces sites. La méthode Hypercube Latin (LHS) a été proposée dans le cadre du calcul numérique des intégrales multiples. Actuellement, cette méthode est énormément utilisée, par exemple pour la construction des modèles de substitution de type krigeage. La LHS consiste à diviser, chacun des axes des  $k$  variables, en  $n$  intervalles de même longueur, sans chevauchement et de probabilité égale. Il en résulte une matrice  $S$ , de plan d'échantillonnage de dimension  $n \times k$ , où les  $k$  colonnes décrivent les niveaux de chaque variable, et les  $n$  lignes présentent les paramètres correspondants à chacune des variables de conception (voir figure 3.9) [91].

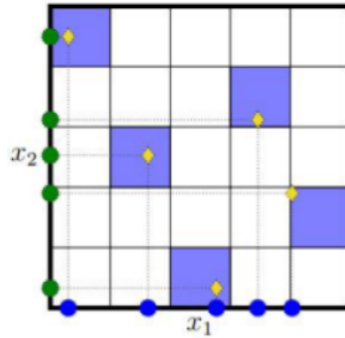


FIGURE 3.5 – Exemple échantillonnage par l'hypercube latin pour deux variables à cinq niveaux.

Pour générer un meilleur remplissage de l'espace de conception, le LHS peut être considéré comme un plan de départ et les valeurs de chaque colonne dans la matrice de dimension  $n \times k$ , sont permutées pour optimiser quelques critères. Une méthode consiste à minimiser l'écart, qui représente la mesure de la non-uniformité des points de conception sur un domaine expérimental. D'autre part, une autre méthode consiste à maximiser la distance minimale entre deux points quelconques à l'aide d'un algorithme d'optimisation. Les stratégies d'échantillonnage forment un large champ de prospection scientifique. Par conséquent, il y a plusieurs autres techniques de remplissage de l'espace de conception comme celles destinées à construire un hypercube latin orthogonal en améliorant un critère de corrélation, autres visant à minimiser le critère IMSE (Integrated Mean Square Error) ou celles permettant de sélectionner un tirage LHS ayant de bonnes propriétés d'uniformité (IHS - Improved Hypercube Sampling) [91].

### 3.4.6 Les différents types de métamodèles

Il existe plusieurs formules mathématiques qui peuvent être utilisées pour les métamodèles. Une partie d'entre eux est adaptée à des approximations globales, autrement qu'elle peut être utilisée pour représenter l'espace de conception. Les métamodèles peuvent interpoler les réponses en fonction de la formulation. Dans le cas où les simulations sont déterministes, les métamodèles d'interpolation peuvent être considérés, si le bruit numérique est négligeable. Des différentes approches sont utilisées pour construire les métamodèles :

- Les techniques paramétriques : cette approche repose sur une relation entre les variables de conception et la réponse de système à étudier. Le métamodèle est construit à partir de l'ensemble des données de variables de conception, et les réponses du modèle initial par la détermination des coefficients de la fonction choisie. Les modèles de krigeage qu'on va développer par la suite, sont des bons exemples de métamodèles construit par cette approche.
- Les techniques non paramétriques : ces approches sont utilisées afin de créer les différents types de modèles de réseau neuronal. Elles n'ont pas une forme fonctionnelle priori, mais ils utilisent une méthode a priori pour construire une fonction de rapprochement basée sur les données disponibles [91].

Nous présenterons dans la suite un certain nombre de différents métamodèles souvent utilisés et leurs principales caractéristiques :

### Métamodèle global

Cette approche consiste à construire un plan d'expériences global sur l'espace des points  $(x, u)$ , plan à partir duquel est estimé un (ou plusieurs) métamodèle. Dans cette approche le plan d'expériences est quelconque :

$$P = (x_i, u_i)_{i=1, \dots, n} \quad (3.14)$$

Les métamodèles ne modélisent pas directement les critères à optimiser, mais les fonctions suivantes :

$$u \mapsto f(x_i, u) \quad (3.15)$$

$$u \mapsto g_i(x_i, u)_{j=1, \dots, q} \quad (3.16)$$

Par la suite, l'optimisation est basée sur le remplacement des fonctions  $f$  et  $g_i$  par les métamodèles estimés. Les métamodèles gagneront à être réestimés tout au long de l'optimisation avec des techniques de planification adaptative [81].

### Régression polynomiale

Les métamodèles basés sur les polynômes sont souvent appelés modèles de surface de réponse et sont utilisés dans la méthodologie extérieure de réponse (RSM). Le RSM est un ensemble de méthodes statistiques et mathématiques pour développer, améliorer et optimiser les processus et produits. Les modèles sont développés par la régression, qui est le processus d'ajustement d'un modèle de régression :

$$y = s(x, \beta) + \epsilon \quad (3.17)$$

Pour une base de données de  $x_i$ ,  $n$  paramètres variables et  $y_i$  de réponses correspondantes. Un modèle de régression peut être de différentes formes, pas nécessairement un polynôme. Toutefois, la classe plus fréquemment utilisée dans la régression linéaire, où  $s(x, \beta)$  est linéaire en  $\beta$ , se compose des polynômes d'ordre inférieur. Par exemple, les modèles suivants peuvent servir pour tenir un métamodèle dans les variables de conception  $k$  :

$$y = s(x, \beta) + \epsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \epsilon \quad (3.18)$$

$$y = s(x, \beta) + \epsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{i < j=2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (3.19)$$

$$y = s(x, \beta) + \epsilon = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{i < -2}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \epsilon \quad (3.20)$$

où  $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$  sont des coefficients de régressions à déterminer. Les modèles précédents sont de premier ordre (équation 3.18), premier ordre avec interaction (équation 3.19) et du deuxième ordre (quadratiques) modèles polynomiaux (équation 3.20), respectivement. Ils incluent seulement les effets secondaires d'interaction, c'est-à-dire les effets qui impliquent deux variables. Généralement des effets d'interaction d'ordre plus élevé peuvent être inclus. Les estimateurs de moindres carrés du coefficient de régression  $\beta$  sont dénotés par  $b$  et le processus de recherche

de ces estimations est facilement décrit en notation matricielle. Le modèle de régression s'écrit comme suite :

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (3.21)$$

avec :

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$$

$$\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n]^T$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} & x_{11}x_{12} & \cdots & x_{1(k-1)}x_{1k} & x_{11}^2 & \cdots & x_{1n}^2 \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} & x_{21}x_{22} & \cdots & x_{2(k-1)}x_{2k} & x_{21}^2 & \cdots & x_{2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} & x_{n1}x_{n2} & \cdots & x_{n(k-1)}x_{ni} & x_{n1}^2 & \cdots & x_{nn}^2 \end{bmatrix}$$

Ainsi,  $y$  est un vecteur des  $n$  réponses,  $X$  est une matrice  $n \times p$  modèle des paramètres variables élargis au modèle de formulaire, alors que  $\beta$  est un vecteur des coefficients de régression  $p$  et  $\varepsilon$  est un vecteur des  $n$  erreurs. Dans la matrice du modèle, chaque ligne correspond au point d'un dessin ou modèle et chaque colonne au coefficient d'une régression [81]. Donc le modèle de régression ajusté devient :

$$\hat{y} = Xb \quad (3.22)$$

$$\text{avec } b = (X^T X)^{-1} X^T y$$

Ainsi, si on remplace le  $\beta_i$  par  $b_i$  alors les termes d'erreur dans les équations (3.18), (3.19) et (3.20) le linéaire avec interaction et les métamodèles quadratiques sont obtenus. On trouve donc la réponse à une inconnue  $x_u$  point comme :

$$\hat{y}(x_n) = f^T(x_n) b \quad (3.23)$$

où  $f^T(x_u)$  représente le vecteur des éléments correspondant à une ligne de la matrice  $X$  [81].

### Métamodèle de krigeage

Durant le développement et la conception des équipements et des systèmes complexes, des modélisations détaillées sont nécessaires afin d'évaluer et améliorer ces systèmes lors de processus de développement. La modélisation se fait par plusieurs méthodes telle que la méthode des éléments finis, elle est basée sur des simulations détaillées prennent souvent beaucoup de temps à s'exécuter. Et parfois il est nécessaire d'effectuer des centaines ou des milliers simulations, comme le cas de l'étude de fiabilité ou d'optimisation pour obtenir des bons résultats, ce qui est impraticable en termes de temps. Cette contrainte nous pousse à chercher d'autres méthodes plus pertinentes. Cependant, les métamodèles sont des modèles simplifiés des modèles de simulation détaillés. Les évaluations à l'aide de métamodèles sont plus efficaces et plus praticables par rapport aux modèles détaillés en termes du temps. Parmi les types des métamodèles les plus utilisés, on trouve le métamodèle de krigeage. Le modèle de krigeage est une modélisation basée

sur un processus gaussien pour interpoler des données déterministes sans bruit. Le modèle de krigeage est donné sous la forme [81] :

$$Y(x) = m(x) + Z(x) \quad (3.24)$$

ce qui signifie que :

$$y(x) = Y_\omega(x) \quad (3.25)$$

Elle comporte deux composantes :  $m(x)$  est une fonction déterministe ou fonction de tendance globale, et la fonction aléatoire gaussienne  $Z(x)$  qui est un processus gaussien stationnaire, c'est-à-dire de moyenne constante. On le suppose souvent centré :  $E(Z(x)) = 0 \forall x$  et dont la covariance entre deux points ne dépend que de leur distance :

$$\text{cov}(Z(x), Z(x')) = \sigma^2 r(x - x') \quad (3.26)$$

$\text{cov}(Z(x), Z(x'))$  est la covariance de  $Z(x)$  entre deux points  $x$  et  $x'$ .  $\sigma$  est la variance du processus gaussien et  $r$  est la fonction de corrélation, il existe plusieurs fonctions de corrélation mais la plus utilisée est la fonction de corrélation gaussienne, elle s'exprime par :

$$R(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{x}^{(j)}) = \exp \left[ - \sum_{k=1}^D \theta_k |x_k^{(i)} - x_k^{(j)}|^2 \right] \quad (3.27)$$

avec  $x_k^{(i)}$  et  $x_k^{(j)}$  sont respectivement la  $k$ -ième composante du point d'échantillonnage  $x^{(i)}$  et  $x^{(j)}$ ,  $D$  est la dimension de l'espace de conception et  $k(k=1,2,3,..D)$  sont les paramètres inconnus de la fonction de corrélation. La moyenne et la variance de la prédiction pour tout point  $x$  non testé peuvent être données respectivement par :

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \beta + \mathbf{x}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}_s - \beta\mathbf{I}) \quad (3.28)$$

$$s^2(\mathbf{x}) = \sigma^2 \left[ \mathbf{1} - \mathbf{r}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}\mathbf{r}(\mathbf{x}) + \frac{(1 - \mathbf{I}^T\mathbf{R} - \mathbf{1r}(\mathbf{x}))^2}{\mathbf{I}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{I}} \right] \quad (3.29)$$

avec :

- $\hat{y}(\mathbf{x})$  est la valeur moyenne estimée de  $y(\mathbf{x})$ .
- $s^2(\mathbf{x})$  est la variance estimée de  $\hat{y}(\mathbf{x})$ .
- $\mathbf{r}(\mathbf{x})$  est le vecteur des fonctions de corrélation entre le point  $x$  non testé.
- $\mathbf{y}_s$  est le vecteur des réponses observées correspondant l'ensemble échantillonné
- $\mathbf{I}$  vecteur unitaire

et les  $N$  échantillons  $x(1) \dots x(N)$ , c'est-à-dire  $\mathbf{r}(\mathbf{x}) = (R(\mathbf{x}, x(1)), R(\mathbf{x}, x(2)), \dots, R(\mathbf{x}, x(N)))^T$ ,  $\mathbf{R}$  est la matrice  $N \times N$  des fonctions de corrélation pour les données échantillonnées. L'estimation de l'inconnu les paramètres peuvent être réalisés en utilisant le maximum de vraisemblance méthode d'estimation [88].

## 3.5 CMA-ES assistée par le krigeage

La méthode CMA-ES nécessite un temps de calcul très important pour converger vers l'optimum. Par conséquent, nous allons penser à intégrer les métamodèles dans le processus d'optimisation par CMA-ES. Alors que la bonne gestion de l'utilisation du métamodèle et garder sa haute qualité lors du processus d'optimisation est l'objectif principal de l'utilisation de métamodèle avec des algorithmes de stratégies évolutives. Dans cette partie, nous allons aborder le management et la qualité du métamodèle. Par la suite nous allons présenter les instructions de l'algorithme CMA-ES assisté par krigeage (KA-CMA-ES).

### 3.5.1 Management du métamodèle

Quand on utilise le métamodèle pour prédire la fonction originale, deux critères doivent être satisfaits, le premier c'est qu'on doit assurer la convergence de l'algorithme évolutionnaire vers l'optimum global. Le deuxième concerne le coût du calcul, il doit être réduit autant que possible. Parmi les contraintes principales pour remplacer la fonction originale par un métamodèle, est de construire un métamodèle bien précis, qui permet de prédire efficacement la fonction originale. Car il y a le risque de converger vers un faux optimum. Afin d'éviter ce problème il faut utiliser conjointement la fonction originale et le métamodèle, la fonction originale sert à évaluer tous les individus d'une génération ou certains des individus. Chaque individu évalué par la fonction originale est appelé individu contrôlé, de même, une génération dont tous ses individus sont évalués à l'aide de la fonction originale est appelée génération contrôlée [88, 84]. Le management du métamodèle se divise généralement en trois approches principales d'un point de vue de contrôle de l'évolution :

- Évolution sans contrôle : consiste à supposer que le métamodèle est de haute qualité. Par conséquent, la fonction originale de l'évaluation n'est pas utilisée dans le calcul d'évolution, c'est-à-dire qu'aucun individu ou génération n'est pas contrôlé.
- Évolution avec contrôle fixe : dans ce cas la fréquence du contrôle est fixe. Il y a deux approches pour fixer le contrôle, la première est le contrôle de l'évolution basée sur les individus, la deuxième est le contrôle de l'évolution basée sur la génération.
- Évolution avec contrôle adaptatif : cette approche considère que le contrôle de l'évolution dépend de la qualité du métamodèle, les individus sont contrôlés de manière itérative pour mettre à jour le métamodèle jusqu'à ce que sa qualité soit acceptable.

### 3.5.2 Qualité du métamodèle

La qualité du métamodèle est un enjeu très important pour son utilisation dans le calcul évolutionnaire, un métamodèle de bonne qualité assure une évaluation correcte des individus par la fonction originale. Par conséquent, une sélection correcte des individus. Dans le cas du calcul évolutionnaire le métamodèle doit permettre à l'algorithme évolutionnaire de sélectionner le meilleur individu. CMA-ES utilise une sélection basée sur le classement, pour chaque itération, elle effectue une évaluation de la fonction originale pour chaque individu de la génération. La qualité du métamodèle est en fonction de sa capacité à bien classer les individus de la population. Cependant, la procédure de classement approximatif est une méthode efficace pour contrôler la qualité du métamodèle sans connaître le classement exact de la génération complète



[92]. La procédure de classement approximatif proposé par Huang et al [88], est composé de plusieurs étapes classées sous forme d'un algorithme (C.1). Dans cet algorithme il a effectué deux modifications sur la procédure ; la première est au lieu de sélectionner un seul individu pour la réévaluation et de mettre à jour le métamodèle, il sélectionne seulement  $n_{init} = \max(1, 0.3\lambda)$  individus, avec  $\lambda$  est la taille de la population. La Deuxième, elle utilise une taille de lot  $nb = \max(1, \lfloor \lambda/10 \rfloor)$  qui est proportionnel à  $\lambda$ , dans la boucle d'itération de procédure de classement approximatif [88].

### 3.5.3 Algorithme KA-CMA-ES

Pour faire une étude d'optimisation par la méthode CMA-ES, il est nécessaire de réaliser plusieurs (milliers) simulation par le modèle élément finis, et chaque simulation peut durer des dizaines de minutes, ce qui est coûteux en terme du temps. Cependant, on a pensé à l'intégration du métamodèle de krigeage dans l'algorithme CMA-ES en utilisant la procédure de classement approximatif comme méthode de contrôle de la qualité du métamodèle. L'algorithme de CMA-ES va garder toutes ses instructions principales, sauf que l'étape de l'évaluation des images des individus, elle peut être par la fonction originale ou par le métamodèle, dans le deuxième cas se fait par l'appel de la procédure de classement approximatif si  $n_k$  le nombre des points requis pour construire le métamodèle est supérieure au nombre de points  $T$  dans l'ensemble d'entraînement. Cette intégration du métamodèle dans la méthode évolutionnaire peut se traduire sous forme d'un algorithme nommé KA-CMA-ES (C.2) [88, 84].

## 3.6 Approche par modèle éléments finis du HEMT

Dans le cas de notre étude, le système à étudier est toujours le transistor à haute mobilité électronique (HEMT), le modèle élément finis du composant sera un élément essentiel dans le processus de l'optimisation. La modélisation multiphysique de ce composant sera faite en utilisant le logiciel Comsol multiphysics basé sur la méthode des éléments finis. Les étapes et les équations de la modélisation sont déjà détaillées dans le chapitre précédent (chapitre 2). Pour cette étude d'optimisation on s'intéresse dans un premier temps au modèle électrothermique pour optimiser le comportement thermique du HEMT, puis au modèle électrothermomécanique afin d'optimiser comportement thermomécanique du composant. Le modèle éléments finis en 3D est représenté dans la figure 3.6.

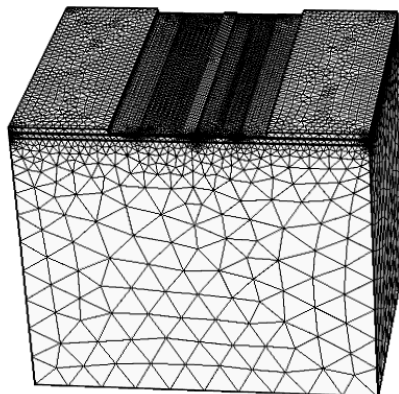


FIGURE 3.6 – Le modèle éléments finis du HEMT pour l'optimisation.

Le système à étudier est composé de plusieurs couches avec des différents matériaux, qui possèdent les propriétés classées dans le tableau 2.1 dans le chapitre précédent. Ce modèle éléments finis va assurer l'évaluation de la fonction objectif dans le processus d'optimisation.

## 3.7 Optimisation du transistor à haute mobilité d'électron

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus par les deux processus d'optimisation : l'optimisation de comportement thermique du HEMT basé sur le modèle éléments finis thermique et l'optimisation du comportement électro-thermomécanique basé sur le modèle éléments finis complet.

### 3.7.1 Optimisation du comportement thermique du HEMT

#### Position du problème d'optimisation

Le modèle éléments finis développé sous Comsol multiphysics a permis de simuler le comportement thermique du transistor, en plus il permet d'identifier les paramètres géométriques représentant un grand impact sur la température du fonctionnement du HEMT. L'épaisseur du substrat (a), l'épaisseur de la couche de nucléation (b) et le développement (c), sont les trois paramètres (en  $\mu\text{m}$ ) qui ont un grand impact sur le comportement thermique du transistor. Le but de l'optimisation thermique est de minimiser la température de fonctionnement du HEMT en agissant sur ces paramètres. Par suite, la fonction objectif sera la température maximale du fonctionnement. Par conséquent, le problème d'optimisation peut être formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(f(x)) = \min(T_{\max}) \\ 90 < a < 150 \\ 0.1 < b < 1 \\ 80 < c < 140 \end{array} \right. \quad (3.30)$$

Afin de résoudre ce problème d'optimisation, un couplage des deux modèles : thermique et statistique sera développé. Le modèle thermique est représenté par le modèle éléments finis développé sous le logiciel Comsol multiphysics, le modèle d'optimisation est représenté par la méthode KACMA-ES et la méthode CMA-ES codée sous le logiciel Matlab. L'intégration des deux modèles se fait en respectant les instructions de leurs algorithmes. L'exécution de l'organigramme de couplage dans la figure 3.7 se fait par plusieurs étapes, elle commence par l'initialisation des paramètres d'optimisation dans le code Matlab, les étapes suivantes seront suivant les algorithmes précédents, le calcul des images des individus s'effectue soit en appelant le modèle éléments finis sous le logiciel Comsol soit par le modèle de krigeage sous Matlab. Une fois le critère de l'arrêt cité dans l'initialisation est satisfait on obtient les valeurs optimums des paramètres choisis.

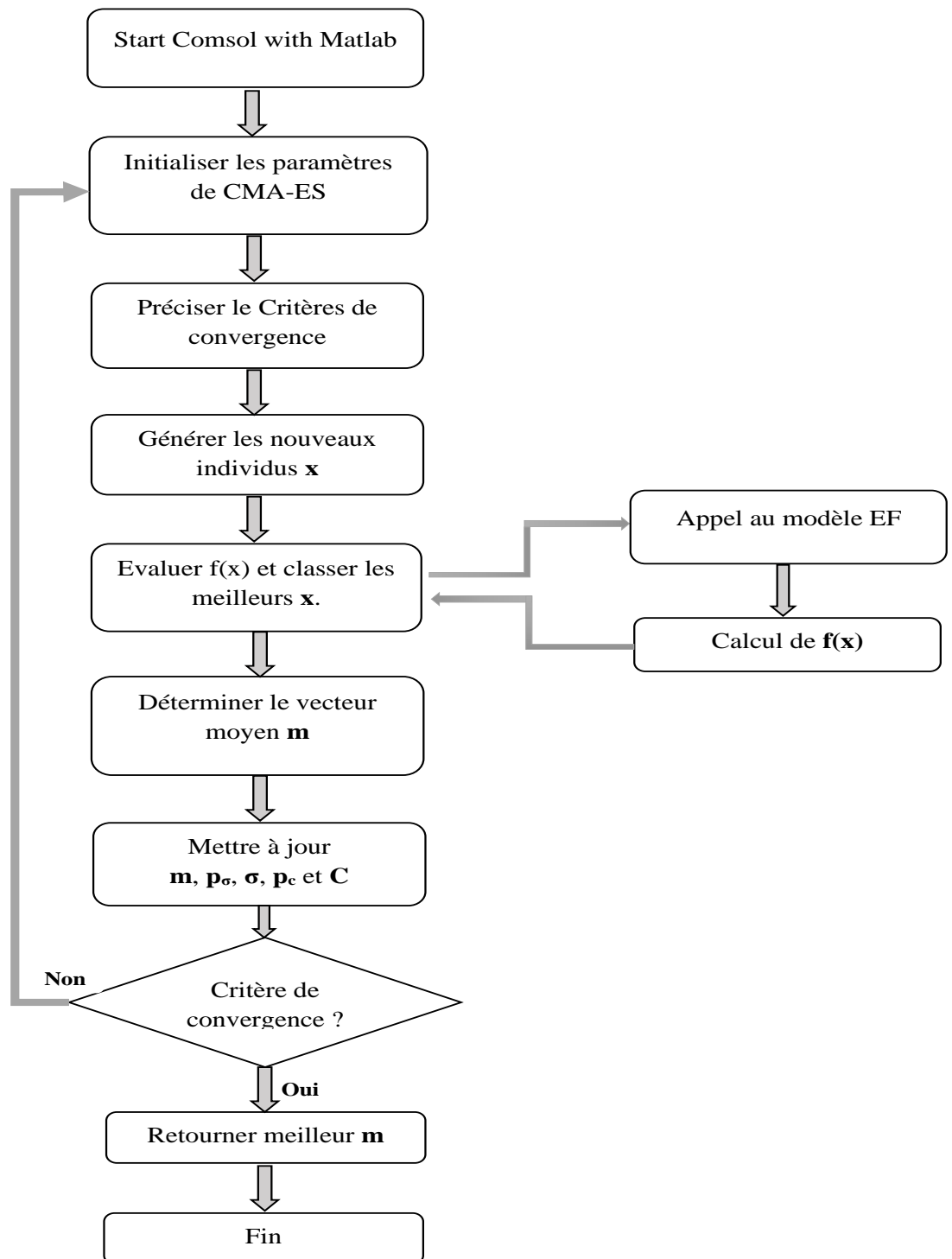


FIGURE 3.7 – Organigramme du processus d'optimisation.

### Résultats numériques

Pour résoudre le problème de l'optimisation dans ce cas d'étude, on a exécuté le processus de l'optimisation développé précédemment, les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau 3.2. Ce tableau présente les valeurs initiales et les valeurs optimales des paramètres choisis

obtenues par les deux méthodes CMA-ES et KA-CMA-ES.

Paramètres ( $\mu m$ )	Valeurs initiales	CMA-ES	KA-CMA-ES
a	100	97.33	98.21
b	0.8	0.353	0.381
c	100	119.13	118.60

TABLE 3.1 – Les résultats de l'optimisation thermique du HEMT.

D'après ce tableau, on constate que les deux méthodes permettent de résoudre le problème d'optimisation traité. De plus, on remarque bien que la méthode KA-CMA-ES est plus efficace en terme du temps du calcul. Alors que la méthode CMA-ES reste coûteuse. Pour mesurer l'influence de ces résultats sur le comportement thermique du transistor. On construit un nouveau modèle éléments finis avec les paramètres géométriques optimaux, des simulations numériques ont été effectuées en gardant les mêmes conditions de fonctionnement (conditions aux limites). Afin d'observer l'influence des valeurs optimales sur l'évolution de la température dans les différentes valeurs de la puissance dissipée dans le HEMT, la figure 3.8 représente l'évolution de la température en fonction de la puissance dissipée dans les deux cas : avant et après l'optimisation par les deux méthodes, il est clair aussi que l'évolution de la température est moins importante après l'optimisation.

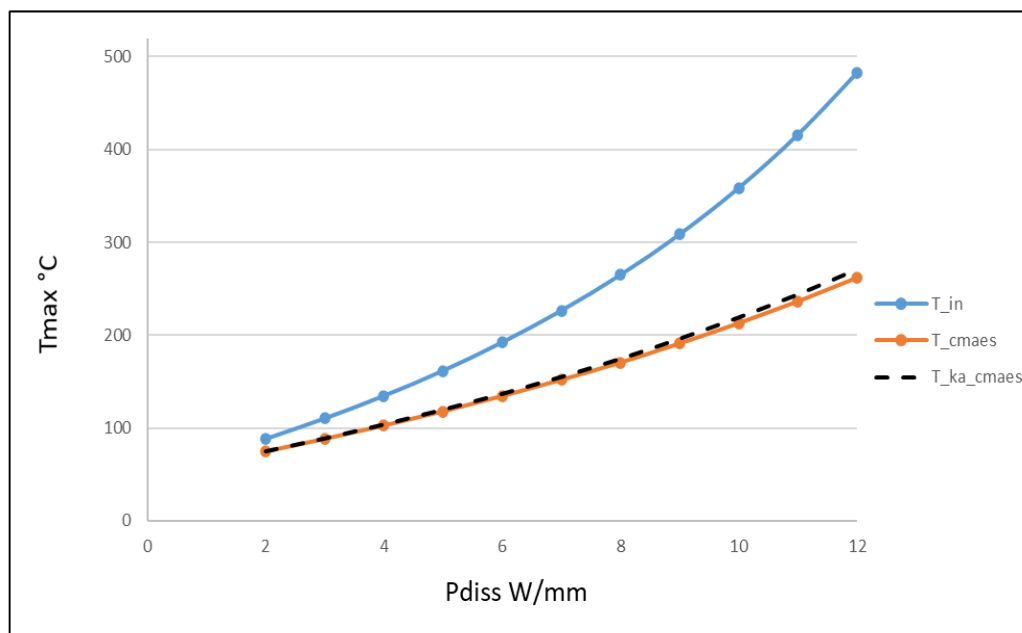


FIGURE 3.8 – Évolution de la température du HEMT avant et après l'optimisation.

D'après la figure 3.8, on remarque qu'avant d'optimiser la structure du transistor sa température maximale du fonctionnement peut atteindre plus de 482 °C, sous une puissance dissipée de 12 W/mm et une température de référence de 50 °C. Après avoir appliqué l'optimisation, la température maximale se limite à 270,35 °C dans les mêmes conditions du fonctionnement. On voit clairement aussi que la différence entre les températures dans les deux cas en fonction de Pdiss est très importante.

De plus, pour observer l'influence de ces résultats sur la distribution de la température dans

la structure du transistor. La figure 3.9 représente une comparaison de la distribution de la température dans les deux cas, sous une puissance dissipée de 5 W/mm et une température de référence de 50 °C.

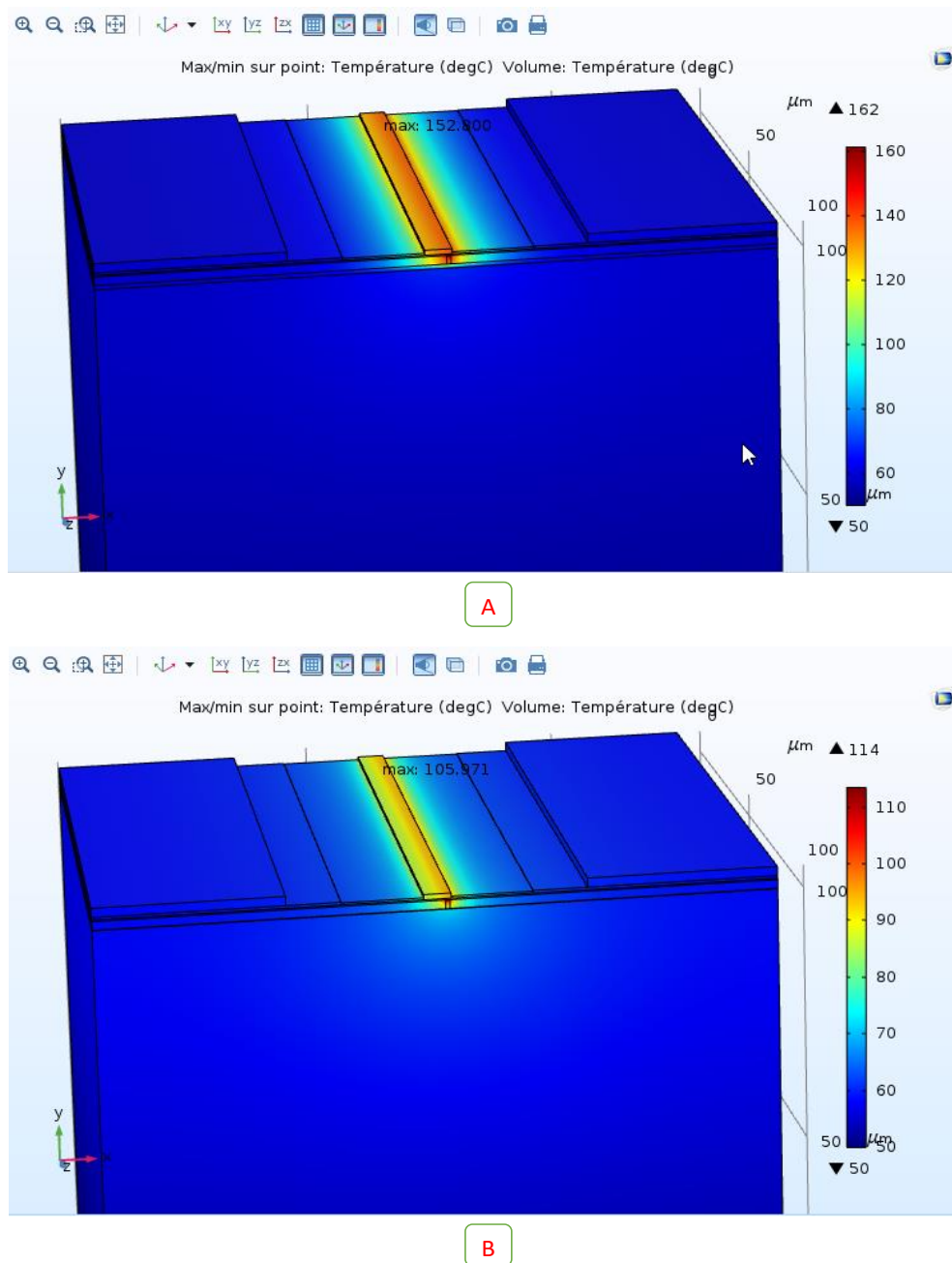


FIGURE 3.9 – Distribution de la température du HEMT avant et après l'optimisation.

D'après cette figure, il apparaît clairement que la distribution de la température est moins importante dans le deuxième cas (B) que dans le premier cas (A). Donc la distribution de la température est améliorée après le processus de l'optimisation. L'approche développée pour l'optimisation thermique a permis d'améliorer le comportement thermique du HEMT, mais sans prendre en considération le comportement multiphysique de sa structure. D'où la nécessité d'aborder une optimisation basée sur le modèle complet électro-thermomécanique.

### 3.7.2 Optimisation électro-thermomécanique

#### Position du problème d'optimisation

La modélisation électro-thermomécanique du HEMT a montré que les conditions de fonctionnement telles que, la puissance dissipée et la température de référence engendrent des dégradations au niveau de sa structure, ces dégradations ont plusieurs formes : déplacements, déformations, contraintes et autres. Ces paramètres affectent la fiabilité et la performance du composant notamment quand ils atteignent des valeurs critiques. La contrainte est une composante élémentaire des efforts de cohésion, ou un effort élémentaire appliqué à une surface élémentaire. Une contrainte est donc une force divisée par une surface. Lors de l'application de charge, la contrainte peut être souvent définie normale ou tangentielle. Une contrainte équivalente à une contrainte normale est alors utile pour réaliser une étude de dégradation. Ces contraintes équivalentes sont le plus souvent définies suivant les critères de Tresca ou de von Mises [93].

Pour optimiser la fiabilité du HEMT on ne peut pas contrôler les conditions du fonctionnement, car elles sont imposées. Par contre, les paramètres géométriques influencent le comportement mécanique de la structure, ces paramètres peuvent être des variables afin de déterminer les meilleures dimensions de la structure qui assurent un bon niveau de fiabilité de la structure. Par conséquent, le problème d'optimisation est de minimiser les contraintes de von Mises sous des contraintes géométriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(f(x)) = \min(\sigma_e) \\ 100 < a < 160 \\ 0.1 < b < 1 \\ 1.1 < c < 1.9 \end{array} \right. \quad (3.31)$$

Avec  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont respectivement l'épaisseur du substrat, épaisseur de nucléation et épaisseur de GaN. Ces paramètres représentent un effet important sur l'évolution des contraintes dans la structure du HEMT. Afin de résoudre ce problème d'optimisation, on a développé un couplage entre les deux modèles : le modèle éléments finis développé sous Comsol Multiphysics, et le modèle d'optimisation KA-CMA-ES codé sous Matlab. Suivant un organigramme détaillé (figure 3.7). Le modèle d'optimisation permet de déterminer les valeurs optimums qui minimisent la fonction objectif et de construire le métamodèle nécessaire pour le calcul. Le modèle éléments finis permet d'évaluer les valeurs de la fonction objectif représentée par des contraintes de von Mises pour chaque variation des paramètres géométriques [93].

## Résultats et discussions

Après l'application de processus d'optimisation développé précédemment à base de l'approche CMA-ES et KA-CMA-ES, les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivant :

Paramètres ( $\mu m$ )	Valeurs initiales	CMA-ES	KA-CMA-ES
a	145	149.32	148.48
b	0.5	0.61	0.63
c	1.2	1.34	1.34
N	—	8316	6039
T(s)	—	208926	182360

TABLE 3.2 – Résultats de processus l'optimisation par les deux approches CMAES et KA-CMA-ES

Les contraintes de von Mises dans le tableau sont des résultats de simulations dans une puissance dissipée de 5 W/mm et température de référence de 300°C. L'approche d'optimisation qu'on a développée a permet de déterminer les dimensions optimales qui permettent de minimiser les contraintes maximales de von Mises, avant l'optimisation les contraintes valent 3.4 GPa et après ça devient 3.074 GPa, cela permet de diminuer la probabilité de défaillance dans la structure et améliorer sa fiabilité. Pour observer la variation des contraintes de von Mises avant et après le processus d'optimisation, on réalise des simulations dans les deux cas, les résultats sont présentés dans la figure 3.10. L'approche d'optimisation développée a permis de déterminer les dimensions optimales qui minimisent les contraintes maximales de von Mises, cela permet de diminuer les probabilités des défaillances dans la structure et améliorer sa fiabilité [93].

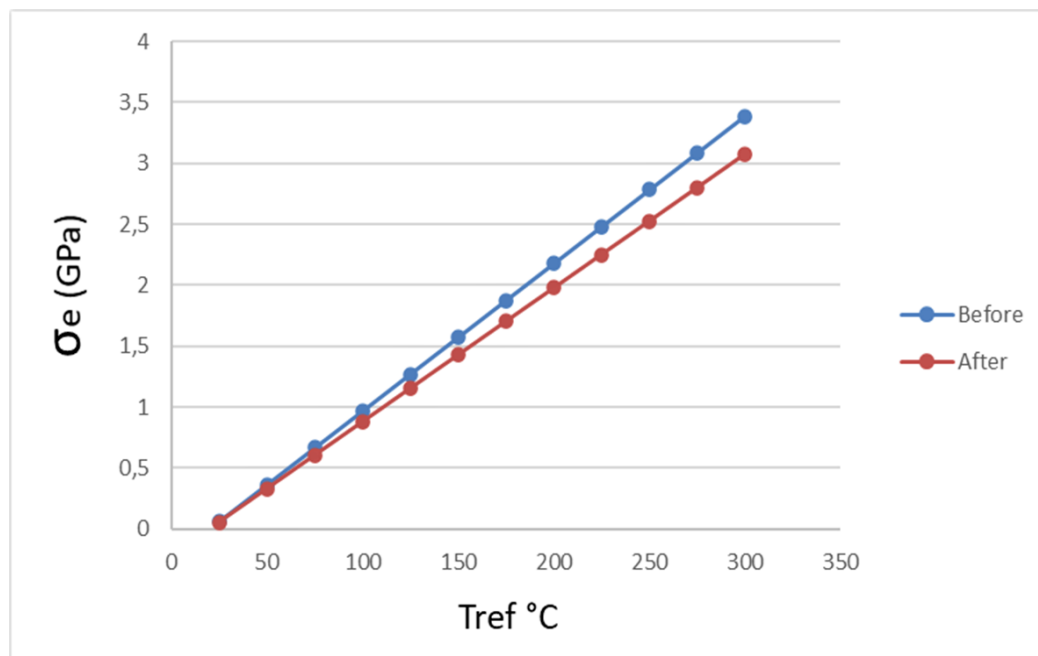


FIGURE 3.10 – Évolution des contraintes de von Mises dans le HEMT avant et après l'optimisation.

## 3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'optimisation en mécanique, l'optimisation évolutionnaire et leurs principes. On a détaillé par suite la méthode CMA-ES (Covariance Matrix Adaptation-Evolution Strategy) et ses paramètres, les métamodèles de krigeage et leurs performances sont aussi bien présentés. Par la suite, on a expliqué l'intégration des métamodèles dans le processus de l'optimisation qui donne naissance à une nouvelle approche qu'on a appelé CMA-ES assisté par le krigeage (KA-CMA-ES kriging assisted CMA-ES). Notre approche de l'optimisation est basée sur le couplage de deux modèles : Le modèle éléments finis du composant est déjà développé sous le logiciel Comsol multiphysics dans le chapitre précédent, et le modèle d'optimisation basé sur les deux méthodes CMA-ES et KA-CMA-ES codées sous le logiciel Matlab. Par conséquent, l'approche d'optimisation développée a permis de diminuer l'effet des dégradations au sein de la structure du HEMT, sous des contraintes géométriques et dans ce cas on a pris que trois paramètres géométriques qui représentent une influence importante sur le comportement multiphysique du HEMT. Après avoir appliqué cette approche, on a réussi dans un premier temps à améliorer le comportement thermique du HEMT, et deuxièmement à minimiser les contraintes de von Mises au sein de la structure du HEMT. CMA-ES avec krigeage a montré une efficacité dans la résolution des problèmes d'optimisation dans notre cas d'étude. Cependant, l'approche de l'optimisation développée dans ce chapitre ne prend pas en considération le niveau de fiabilité du composant. Par conséquent, le chapitre suivant sera pour présenter la méthode de l'optimisation fiabiliste et ses différents types, et également l'application de l'approche RBDO hybride sur le cas de la technologie HEMT.



---

Optimisation fiabiliste appliqué au HEMT

---

**Sommaire**

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>104</b>
<b>4.2</b>	<b>Fiabilité des structures</b>	<b>105</b>
4.2.1	Fonction de fiabilité	105
4.2.2	Méthodes de calcul de la fiabilité	107
<b>4.3</b>	<b>Optimisation fiabiliste des structures</b>	<b>112</b>
4.3.1	Formulation de l'optimisation fiabiliste de conception (RBDO)	113
4.3.2	Différentes approches de RBDO	114
<b>4.4</b>	<b>Application au HEMT</b>	<b>117</b>
4.4.1	Modèle éléments finis du HEMT	117
4.4.2	Analyse de la fiabilité du HEMT	118
4.4.3	Optimisation du HEMT par la méthode RBDO hybride	120
4.4.4	Résultats numériques	120
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>123</b>

---

## 4.1 Introduction

Le transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) à base de nitrure de gallium GaN, a montré une grande efficacité dans les systèmes à haute puissance. Cette technologie possède une structure très particulière qui fonctionne dans des conditions exceptionnelles comme la haute puissance, la haute température et la haute fréquence [94, 25]. Grâce à tous ces avantages, le HEMT se présente dans plusieurs domaines tels que la télécommunication, la guerre électronique et les satellites [95, 54]. La plupart des caractéristiques telles que la mobilité des électrons, la conductivité thermique sont en fonction de la température, ces caractéristiques ont tendance à se dégrader avec l'élévation de la température dans la structure à cause du phénomène de l'auto échauffement [53, 54, 55]. Ce phénomène peut donner naissance aussi à des dégradations mécaniques dans la structure car quelques caractéristiques physiques des matériaux sont en fonction de la température et en fonction de déformation au même temps. Ces dégradations peuvent être sous forme des déplacements, déformations ou des contraintes. L'identification et la compréhension de ces dégradations reste un enjeu important pour assurer la fiabilité et la performance de la technologie HEMT.

Pour analyser la fiabilité du HEMT, plusieurs auteurs ont analysé l'effet des caractéristiques électriques sur la performance de sa structure ou juste une partie de la structure [52, 69, 60]. Alors que, les phénomènes thermiques influencent aussi la fiabilité du HEMT, sous forme des dégradations comme l'enterrement de grille, les dégradations du contact Schottky, et la dégradation de l'interconnexion des métaux d'alimentation, etc [21]. Lors du fonctionnement du HEMT, il subit au phénomène de l'auto échauffement à cause de la puissance dissipée au niveau de la zone active [53, 96]. Et d'après la modélisation que nous avons développée, nous avons constaté que les effets thermiques sur le comportement thermomécanique du HEMT, sont très importants par rapport aux effets électriques. A travers les valeurs des paramètres mécaniques obtenus dans les deux cas. On sait bien que, parmi les avantages de la technologie HEMT on trouve le fonctionnement à haute puissance et à haute température. Par conséquent, on va s'intéresser à l'étude de la fiabilité du HEMT, dans le cas de haute puissance dissipée et haute température de référence. D'autre part, l'optimisation fiabiliste permet d'améliorer la fiabilité d'une structure avec un coût minimal [82, 97], il existe plusieurs types d'optimisation, la RBDO (Reliability Based Design Optimization) classique a été utilisé dans plusieurs travaux [98, 91, 99], mais elle montre quelque inconvénient soit de stabilité de calcul ou de la faible convergence [100]. Car cette méthode exécute le processus de l'optimisation et l'analyse de fiabilité d'une manière indépendante. Un autre type est la méthode RBDO hybride, d'après plusieurs travaux elle a montré une efficacité de calcul, elle a permis de dépasser les défauts de l'approche classique car le processus exécute l'optimisation et l'analyse de fiabilité simultanément [101, 102, 103].

Dans cette partie, nous allons exploiter la modélisation multiphysique complète développée précédemment, qui permet de simuler le comportement électrothermique et le comportement thermomécanique, ce qui va nous permettre de comprendre le comportement de la structure du HEMT, sous les conditions de fonctionnement et déterminer les paramètres qui influencent la performance et la fiabilité du composant. Par la suite, nous allons adapter la méthode RBDO hybride au technologie HEMT, grâce à un couplage que nous allons développer entre le modèle éléments finis sous le logiciel Comsol multiphysics et le modèle optimisation fiabiliste RBDO sous le logiciel Matlab, afin de déterminer les variables optimales qui nous permettent d'optimi-

ser la structure et améliorer son niveau de fiabilité. Ce chapitre est composé de trois sections. Dans un premier temps, on va commencer par une description des méthodes de l'analyse de fiabilité du HEMT, par la suite on va définir les différentes méthodes de l'optimisation qu'on va utiliser dans ce chapitre. Dans la section suivante, on va présenter les résultats de l'analyse de la fiabilité par les deux méthodes d'approximation SORM et FORM. La section finale sera consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus par l'application de la méthode RBDO hybride sur le HEMT.

## 4.2 Fiabilité des structures

La définition la plus connue de la fiabilité est celle d'AFNOR (French Association of Normalisation) : « Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée. Le terme est utilisé comme caractéristique désignant une probabilité de succès ou un pourcentage de succès ». La fiabilité des systèmes complexe et des systèmes mécatroniques est un enjeu pour les développeurs aujourd'hui [12]. Par conséquent, l'analyse de fiabilité est une étape très importante dans le processus de développement des systèmes et des structures. La notion de fiabilité est liée à plusieurs paramètres statistiques et probabilistes qu'on va traiter par la suite.

### 4.2.1 Fonction de fiabilité

On considère  $X$  le vecteur des variables de base, qui peuvent être des variables définissant les actions extérieures, ou les caractéristiques des matériaux, ou encore les paramètres géométriques d'un système. L'analyse de fiabilité se fait par le calcul de la probabilité des défaillances  $P_f$  :

$$P_f = P(G(X) \leq 0) = \int_{G(X) \leq 0} f_X(x) dx \quad (4.1)$$

où  $G(X)$  représente la fonction de performance (Figure 4.1), cette notion est fondamentale à la fois en analyse déterministe et en approche probabiliste pour définir l'état de la structure (dans le domaine de sécurité ou dans le domaine de défaillance). La fonction d'état limite se calcule à partir d'une analyse déterministe traditionnelle, mais des paramètres probabilistes sont identifiés et quantifiés.

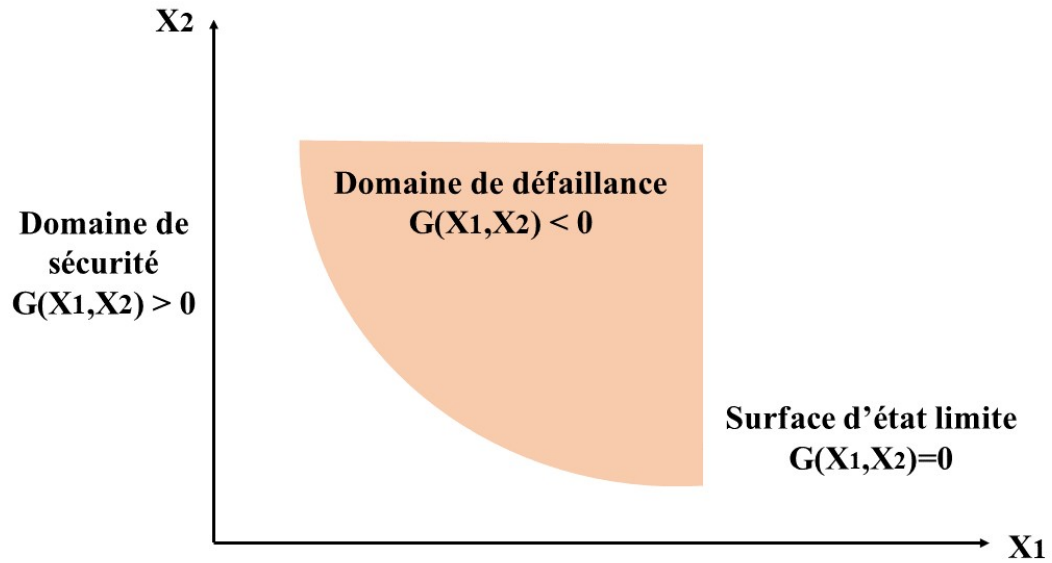


FIGURE 4.1 – La fonction de performance.

Par convention, elle doit vérifier les critères suivants en fonction de variable aléatoire  $X$  :

- $G(X) > 0$  définit le domaine de sécurité de la structure.
- $G(X) = 0$  définit la surface d'état limite.
- $G(X) < 0$  définit le domaine de défaillance de la structure.

La fiabilité d'un système au bout d'un temps  $t$  correspond à la probabilité pour que ce dispositif n'ait pas de défaillance entre 0 et l'instant  $t$ . La fiabilité  $R$  de la structure se calcule à partir de l'expression 4.1 comme suit :

$$R = 1 - P_f \quad (4.2)$$

La variation de la fonction de la fiabilité en fonction de temps peut être décrite par la figure 4.1. Le calcul de la probabilité de défaillance ou de la fiabilité exige le calcul de l'intégrale de l'expression 4.2, or ce calcul est analytiquement difficile et souvent impossible, pour cette raison on aura besoin des autres méthodes pour évaluer  $R$  et  $P_f$  [82].

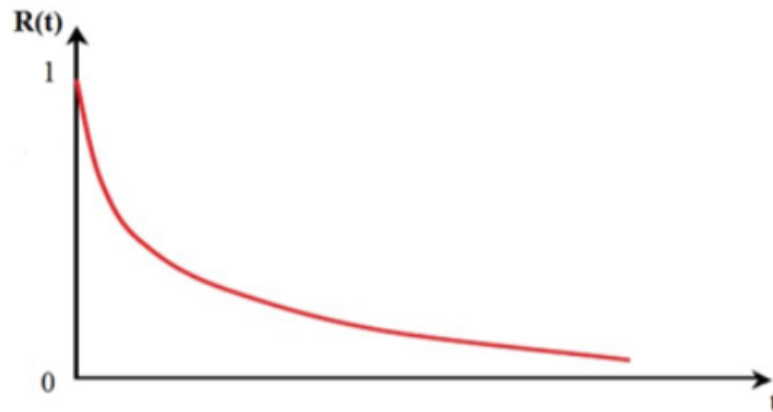


FIGURE 4.2 – Fonction de la fiabilité.

### 4.2.2 Méthodes de calcul de la fiabilité

#### Méthode de Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo est parmi les méthodes de calcul de la fiabilité, son principe est basé sur la génération d'un grand nombre de tirages aléatoires. Pour chaque tirage, la fonction de performance est évaluée pour savoir si la configuration tirée se situe dans le domaine de sûreté ou de défaillance. La probabilité de défaillance n'est que le nombre de configurations défaillantes sur le nombre total de tirages [104].

La méthode de Monte Carlo est très robuste et constitue le moyen le plus sûr pour l'évaluation de la probabilité de défaillance. Cependant, cette méthode est très coûteuse en temps de calcul, surtout pour des systèmes réels avec de faibles probabilités de défaillance. Cette méthode utilise les lois des grands nombres afin d'évaluer un être déterministe, généralement une intégrale, représentant l'espérance mathématique d'un vecteur aléatoire  $X$  à valeurs dans  $R^n$  dont on simule  $N$  réalisations indépendantes.

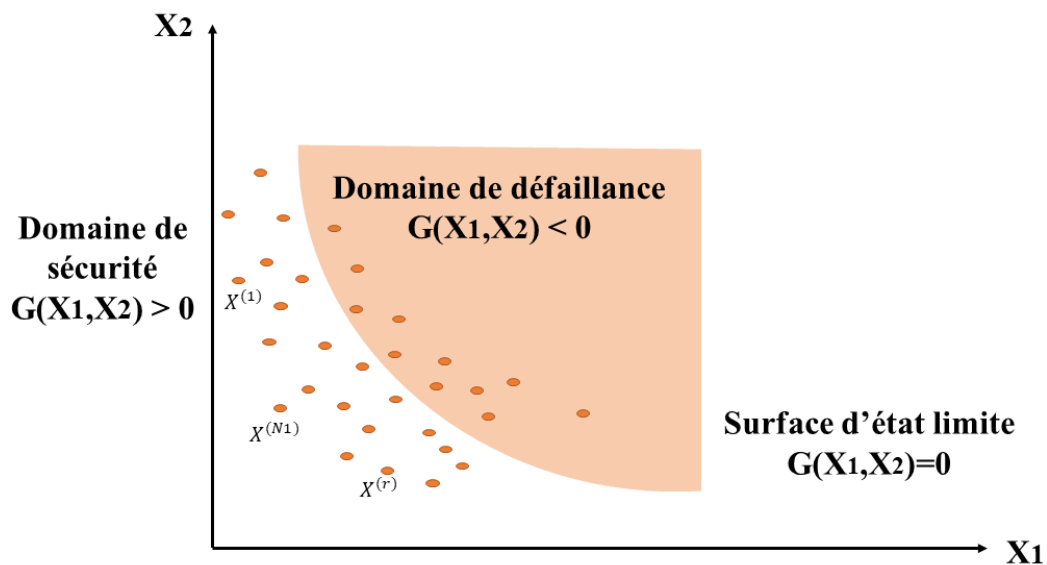


FIGURE 4.3 – Représentation de la méthode de Monte Carlo.

Les valeurs des variables de base sont échantillonnées aléatoirement en fonction des distributions de probabilité de  $X$ . La prochaine étape consiste à évaluer la défaillance ou le bon fonctionnement de la structure en fonction de la valeur de la fonction de performance  $G(X)$ . La probabilité de défaillance  $P_f$  peut être évaluée par l'expression suivante :

$$P_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(G(x) \leq 0) \quad (4.3)$$

$I(G(x))$  est une fonction indicatrice caractérisée par :

$$I(G(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } G(x) \leq 0 \\ 0 & \text{si } G(x) > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Ce résultat est exact lorsque  $N$  tend vers l'infini. A noter qu'il n'existe pas de règles rigoureuses pour déterminer le nombre exact de simulations nécessaires. La méthode de Monte Carlo reste un outil efficace lorsque  $P_f$  n'est pas trop faible. Cependant, les simulations de Monte Carlo sont souvent les seuls moyens d'étalonnage des méthodes approchées.

### Calcul de la fiabilité à partir de l'indice de fiabilité

Parmi les méthodes du calcul de la probabilité des défaillances, on a le calcul de l'indice de fiabilité. FORM (First Order Reliability Method) et SORM (Second Order Reliability Method) sont deux méthodes très efficaces pour le calcul de la fiabilité, elles sont basées sur la recherche du point de défaillance le plus probable (MPFP : Most Probable Failure Point), dont la connaissance est à la base des approximations de la probabilité de défaillance dans le cadre de ces méthodes. SORM et FORM permettent de relier l'indice de fiabilité à la probabilité de défaillance.

#### 1. Indice de fiabilité

Calcul de la probabilité de défaillance à partir d'un indice de fiabilité est une méthode permettant d'estimer la probabilité de défaillance à partir du calcul d'un paramètre qu'on appelle indice de fiabilité  $\beta$ , il y a plusieurs propositions des indices de fiabilité, mais les plus connus sont ceux de Cornell et de Hasofer-Lind.

##### (a) Indice de fiabilité de Cornell $\beta_C$

L'indice de Cornell est obtenu à partir de la moyenne  $\mu_G$  et de l'écart-type  $\sigma_G$  de la fonction de performance  $G$  par l'équation suivante :

$$\beta_C = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (4.5)$$

l'indice  $\beta$  peut être considéré comme une approximation de l'indice de fiabilité exact et invariant par un développement au premier ordre, mais il faudra alors effectuer ce développement autour d'un point particulier (le point de défaillance le plus probable) (Figure 4.4). Cet indice est correct dans le cas de variables gaussiennes et d'un état limite linéaire dans l'espace physique. L'inconvénient majeur de cet indice est qu'il donne des valeurs différentes pour différentes expressions de la fonction d'état limite.

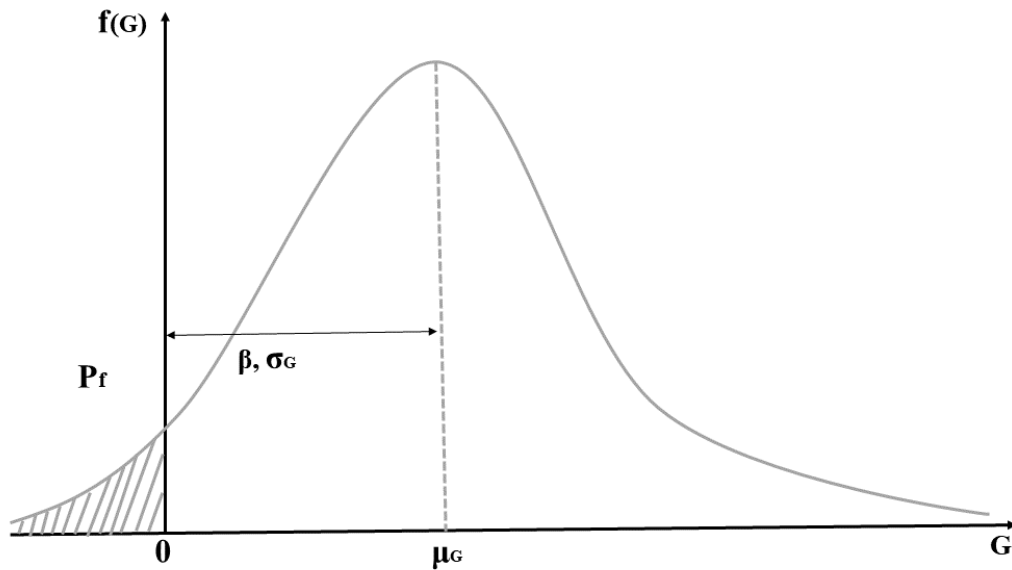


FIGURE 4.4 – Représentation graphique de l'indice de Rjanitzyne-Cornell.

- (b) Indice de fiabilité de Hasofer-Lind  $\beta_{HL}$  Pour lever le risque de dépendance de l'indice de fiabilité vis-à-vis de l'état limite, Hasofer et Lind ont proposé d'effectuer le calcul de  $\beta$  dans l'espace des variables aléatoires normales centrées réduites et statistiquement indépendantes. Pour cela, le vecteur aléatoire  $X$  est transformé en vecteur aléatoire  $U$ , avec :

$$U_i = T(X_i) \quad (4.6)$$

Les variables aléatoires suivent une loi normale centrée réduite et quel que soit  $i \neq j$ ,  $U_i$  et  $U_j$  sont mutuellement indépendants. Cette transformation probabiliste  $T$  impose de connaître les distributions statistiques de chacune des variables aléatoires. La fonction d'état limite devient après transformation :

$$H(U) = G[X(U)] \quad (4.7)$$

La probabilité de défaillance est alors égale à :

$$P_f = P(X(U) \leq 0) \quad (4.8)$$

Soit :

$$P_f = \int_{H(u) \leq 0} \Phi_m(u) du \quad (4.9)$$

$\Phi_m$  est la fonction de densité de la loi multinormale centrée réduite. L'indice de fiabilité  $\beta_{HL}$  est défini comme étant la distance euclidienne de l'origine de l'espace normal standard à la surface d'état limite  $H(u) = 0$  (Figure 4.5).  $u$  est une réalisation du vecteur aléatoire  $U$ , soit  $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ .  $H(u)$  est une réalisation de la variable aléatoire  $H(U)$ . Il faut donc résoudre le problème de minimisation sous contrainte suivante :

$$\begin{cases} \beta_{HL} = \min \sqrt{u^T \cdot u} \\ u \in R^m \\ H(u) = 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Ce problème est équivalent à :

$$\begin{cases} \beta_{HL} = \min f(u) \\ u \in R^m \\ H(u) = 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Avec :

$$f(u) = \frac{1}{2} u^T \cdot u \quad (4.12)$$

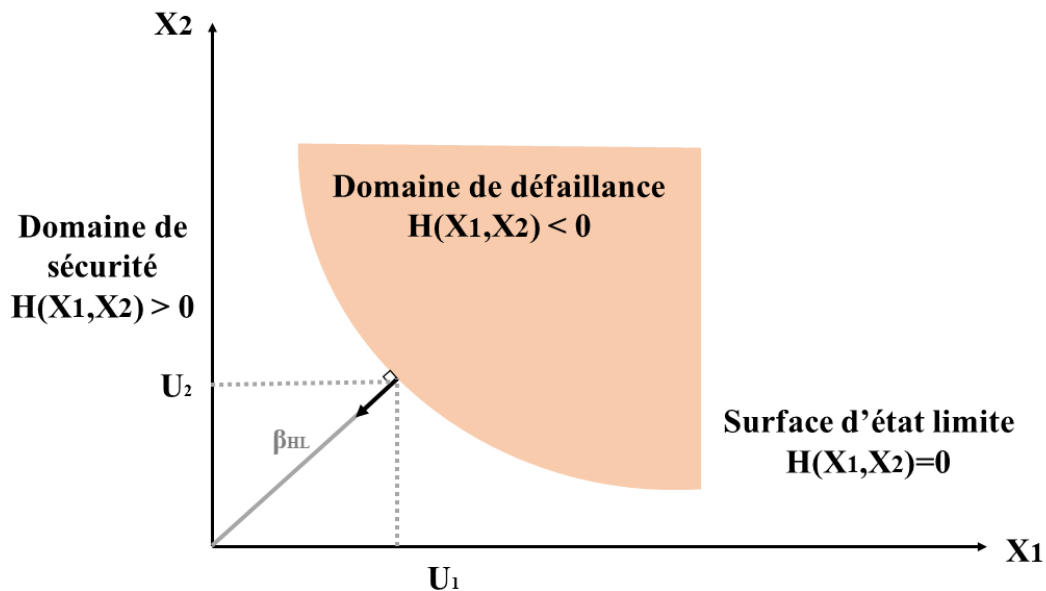


FIGURE 4.5 – Représentation géométrique de  $\beta_{HL}$  pour un problème à deux variables aléatoires.

L'indice de fiabilité est donc le minimum de la fonction  $f$  sous la contrainte  $H(u) = 0$ . Le calcul analytique de  $\beta_{HL}$  n'est réalisable que dans un nombre limité de cas particuliers et une résolution numérique est généralement nécessaire. La fonction objectif  $f$  est une forme quadratique, convexe, deux fois continûment différentiable par rapport aux variables  $u_i$ . En revanche, la fonction de contrainte  $H(u)$  est rarement convexe. De plus, la fonction  $H(u)$  est parfois complexe, implicite et non continûment différentiable par rapport aux variables  $u_i$ . Soient  $u^*$  le vecteur solution du problème 4.11 et  $P^*$  le point de la surface d'état limite tel que  $OP^* = u^* \cdot P^*$  est appelé point de conception ou point de défaillance le plus probable. Par ailleurs :

$$u^* = -\beta_{HL}\alpha \quad (4.13)$$

$\alpha$  est le vecteur normal à la surface  $H(u) = 0$  au point  $u^*$ , soit son gradient norma-



lisé. L'objectif est alors de relier  $\beta_{HL}$  à la probabilité de défaillance de la structure. Plusieurs méthodes existent et apportent une valeur plus ou moins fine de  $P_f$  [82].

## 2. Les méthodes d'approximation

Les méthodes d'approximation les plus expérimentées sont les méthodes du premier et du second ordre FORM et SORM (First Order Reliability Method / Second Order Reliability Method), elles sont très efficaces pour le calcul de la fiabilité. Ces méthodes sont basées sur la recherche du point de conception, appelé aussi le point de défaillance le plus probable (MPFP : Most Probable Failure Point), dont la connaissance est à la base des approximations de la probabilité de défaillance dans le cadre de ces méthodes.

- (a) La méthode FORM : son principe se base sur le remplacement de la surface de l'état limite par l'hyperplan tangent au MPFP, d'où l'approximation  $P_f$  devient

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (4.14)$$

avec  $\beta$  est l'indice de fiabilité et  $\Phi$  est la fonction de répartition normale centrée réduite. Cette approximation linéaire de la surface d'état limite au point de conception sera précise que si la fonction d'état limite est linéaire ou faiblement non linéaire.

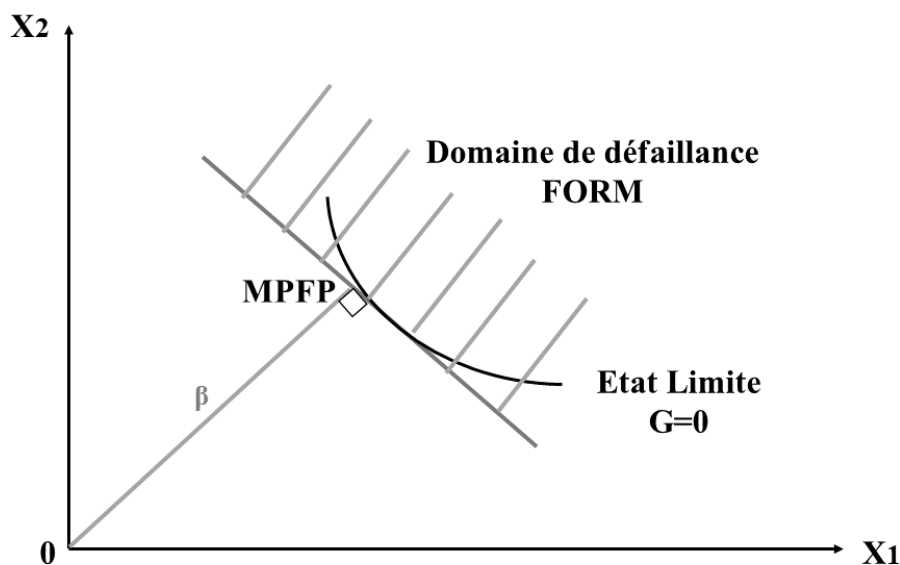


FIGURE 4.6 – Principe de la méthode FORM.

- (b) La méthode SORM : Si la fonction d'état limite est fortement non linéaire, l'approximation de la surface d'état limite par un hyperplan peut conduire à une probabilité erronée de défaillances. La méthode SORM (Second Order Reliability Method), elle consiste à remplacer la surface de l'état limite par une surface quadratique tangente et ayant les mêmes courbures de la surface réelle au MPFP.

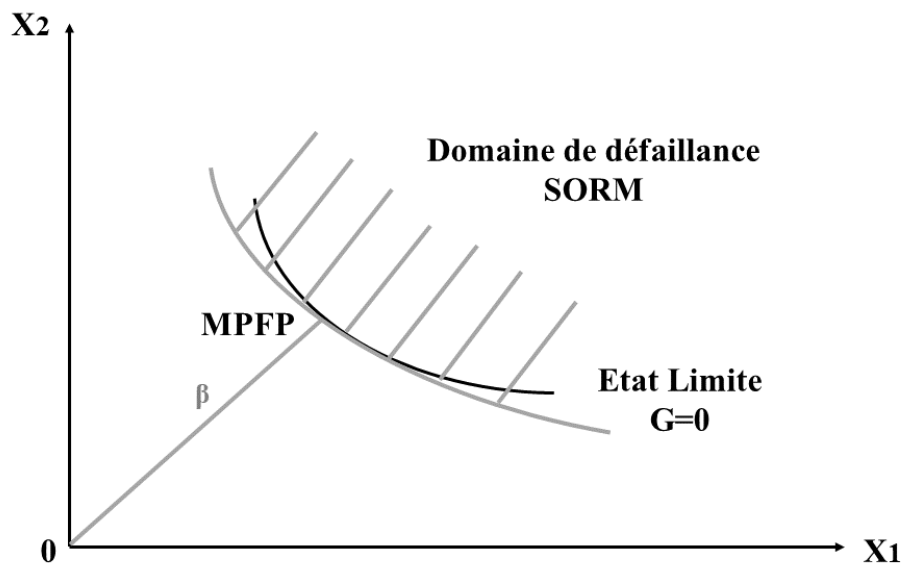


FIGURE 4.7 – Principe de la méthode SORM.

La méthode SORM donne une meilleure estimation de la probabilité de défaillance. D'où l'approximation  $P_f$  a comme expression :

$$P_f = \Phi(-\beta) \left( \prod_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{1 + \beta k_i}} \right) \quad (4.15)$$

où  $\beta$  est l'indice de fiabilité, et  $k_i$  sont les courbures principales de la fonction  $G$  au MPFP.

### 4.3 Optimisation fiabiliste des structures

L'optimisation est un processus qui permet soit d'améliorer un système déjà conçu soit de déterminer les paramètres qui permettent de concevoir un nouveau système, avec un coût minimal et une haute qualité. Il existe plusieurs types de l'optimisation. Parmi ces types on trouve l'optimisation déterministe, elle ne prend en considération que les paramètres déterministes. Mais pour contrôler le niveau de la performance, il est nécessaire d'intégrer l'analyse de fiabilité dans le processus de l'optimisation. Dans ce sens, une autre forme de l'optimisation est l'optimisation fiabiliste ou la RBDO (Reliability Based Design Optimization) : c'est une approche très efficace dans le domaine des structures, elle permet de déterminer la meilleure conception possible en termes de coût et de qualité, de plus elle prend en considération le niveau de fiabilité (Figure 4.8). La RBDO est basée sur l'analyse de la défaillance pour mesurer l'effet des incertitudes sur le système. Actuellement, elle est considérée comme une philosophie populaire pour résoudre des problèmes dans les différents domaines. Il existe plusieurs formes de la RBDO, et on va les citer dans la suite de ce chapitre.

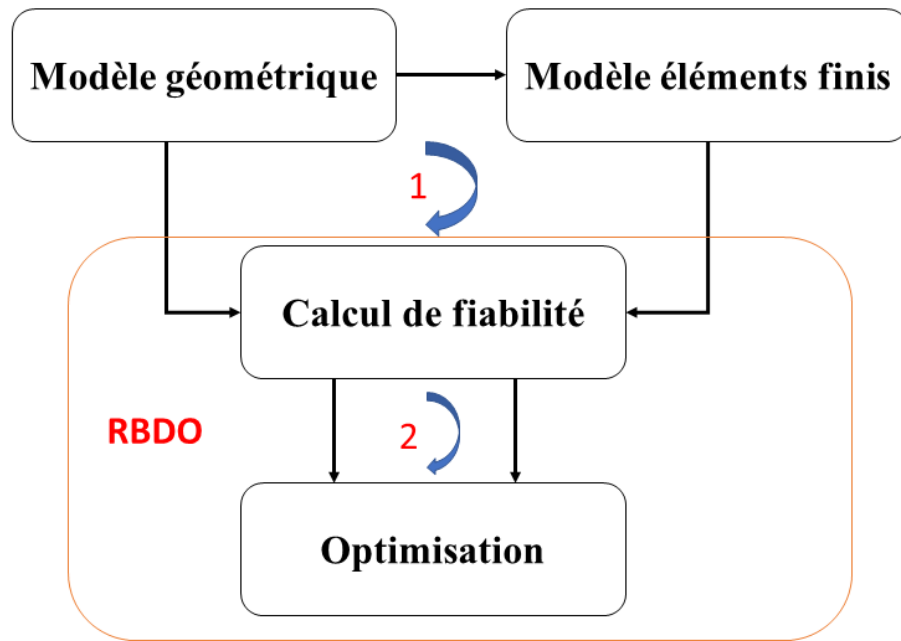


FIGURE 4.8 – Processus de l'optimisation fiabiliste de conception.

#### 4.3.1 Formulation de l'optimisation fiabiliste de conception (RBDO)

La RBDO a pour objectif de rechercher la solution optimale, tel que sa fonction de performance (état limite de défaillance) soit maintenue suffisamment loin du point de conception. La formulation de base de la RBDO peut être écrite comme suit :

$$\begin{aligned}
 \min_x \quad & f(x) \\
 \text{s.c.} \quad & \Pr [G_i(x, y) \leq 0] \leq P_i, i = 1, \dots, m \\
 & h_j(x) \leq 0, j = m + 1, \dots, M
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

où :

- $x$  est le vecteur des variables déterministes de la conception
- $y$  : est le vecteur des variables aléatoires,
- $f$  : est la fonction objectif (coût, masse, ...,etc.),
- $\Pr[\cdot]$  : est l'opérateur de probabilité,
- $P_i$  : est le niveau de fiabilité cible,
- $G_i(x, y)$  : est la fonction de performance (état de limite)
- $h_j(x)$  : est la contrainte déterministe.

Cette formulation 4.16 est à l'origine de tous les développements en RBDO. Elle peut être réalisée à l'aide de deux types d'algorithmes :

- Les algorithmes stochastiques : ils sont basés sur les simulations aléatoires, comme par exemple les algorithmes génétiques.
- Les algorithmes de la programmation non linéaire (NLP) : ils sont basés sur le calcul des gradients de la fonction objectif et des contraintes mécaniques.

On peut également classer les différentes approches RBDO en trois catégories principales comme le montre la figure 4.9 :

- Méthodes mono-niveau (Mono-level Approches MLA)
- Méthodes à deux-niveaux (Double-level Approches DLA)
- Méthodes séquentielles découplées (Sequential Decoupled Approches SDA)

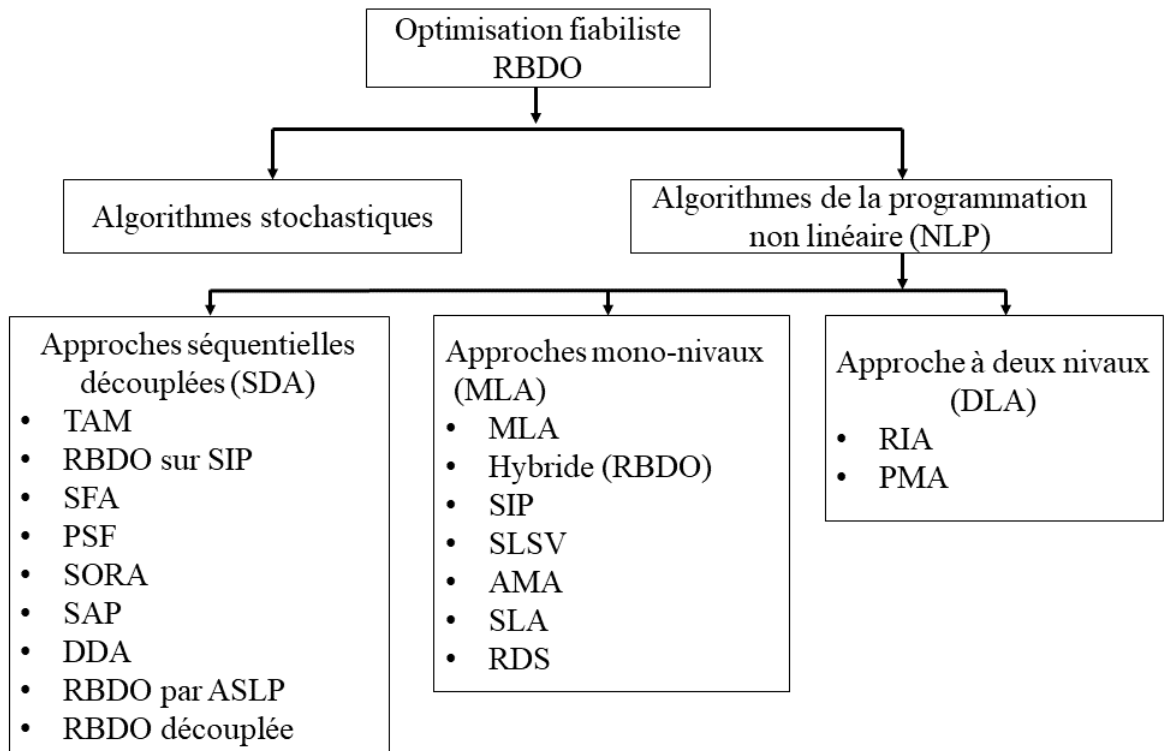


FIGURE 4.9 – Classification des différentes méthodes de la RBDO.

### 4.3.2 Différentes approches de RBDO

#### RBDO classique

L'approche RBDO classique est basée sur la résolution indépendante du problème de fiabilité et le problème de l'optimisation. Après avoir effectué l'analyse de fiabilité, elle renvoie les résultats au processus de l'optimisation pour les considérer comme des contraintes afin de minimiser la fonction objectif (Figure 4.14).

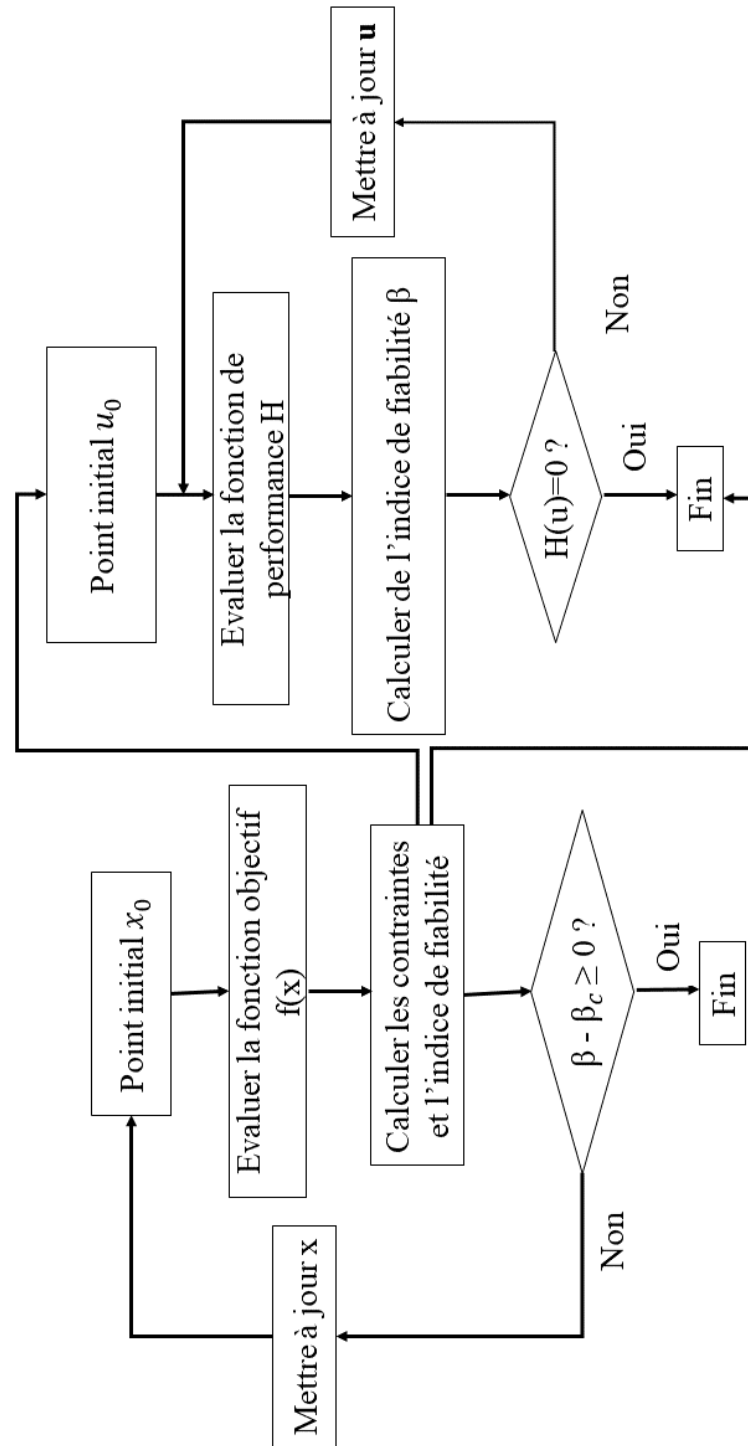


FIGURE 4.10 – Algorithme de l’approche classique.

La méthode RBDO classique est formée de deux sous-problèmes qui s’exécutent dans deux espaces différents : l’espace physique et l’espace normalisé, et pour minimiser la fonction objectif  $f(x)$ , la RBDO classique s’exprime sous la forme suivante :

$$\min_x \begin{cases} f(x) \\ g_k(x) \leq 0, k = 1, \dots, K \\ \beta(x, u) \geq \beta_t \end{cases} \quad (4.17)$$

où :

- $u$  représente le module vectoriel dans l'espace normalisé,
- $g_k(x)$  représente les contraintes déterministes,
- $\beta_t$  l'indice de fiabilité cible,
- $\beta(x, u)$  l'indice de fiabilité de système en fonction des variables déterministes et aléatoires.

L'analyse de fiabilité se fait par le calcul de l'indice de fiabilité qui représente la distance minimale entre l'origine et la fonction d'état limite  $H(x, u)$  dans l'espace normalisé, le calcul se fait par la résolution du problème de l'optimisation suivant :

$$\min_x \begin{cases} d(u) = \sqrt{\sum u_i^2} \\ \text{s.c. } H(x, u) \leq 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

L'approche classique de RBDO fait une alternance entre le calcul de la fiabilité et la minimisation de la fonction objectif. Par conséquent, elle présente une faible efficacité de calcul et une faible stabilité de convergence [100].

### RBDO hybride

Par contre à l'approche classique, l'approche RBDO hybride permet de résoudre simultanément le problème de l'analyse de fiabilité et le problème de l'optimisation dans un nouvel espace appelé espace hybride. Dans cette approche, la fonction objectif prend une nouvelle forme qui lie entre la fonction objectif standard et le niveau de fiabilité. Par conséquent, la formulation de la RBDO hybride devient [105] :

$$\min_{x,y} F(x, y) = f(x) \cdot d_\beta(x, y) \quad (4.19)$$

$$\text{s.c. } \begin{cases} G(x, y) \leq 0 \\ g_k(x, y) \leq 0, k = 1, \dots, K \\ d_\beta(x, y) \geq \beta_t \end{cases}$$

Le but est de minimiser la nouvelle fonction objectif  $F(x, y)$  qui est en fonction de la fonction objectif standard  $f(x)$  et  $d_\beta(x, y)$  l'image de l'indice de fiabilité dans l'espace hybride, sous contraintes de la fonction d'état limite  $G(x, y)$ , les contraintes déterministes  $g_k(x)$  et  $\beta_t$  l'indice de fiabilité cible. Par conséquent, la méthode hybride permet de dépasser les inconvénients de l'approche classique (Figure 4.11).

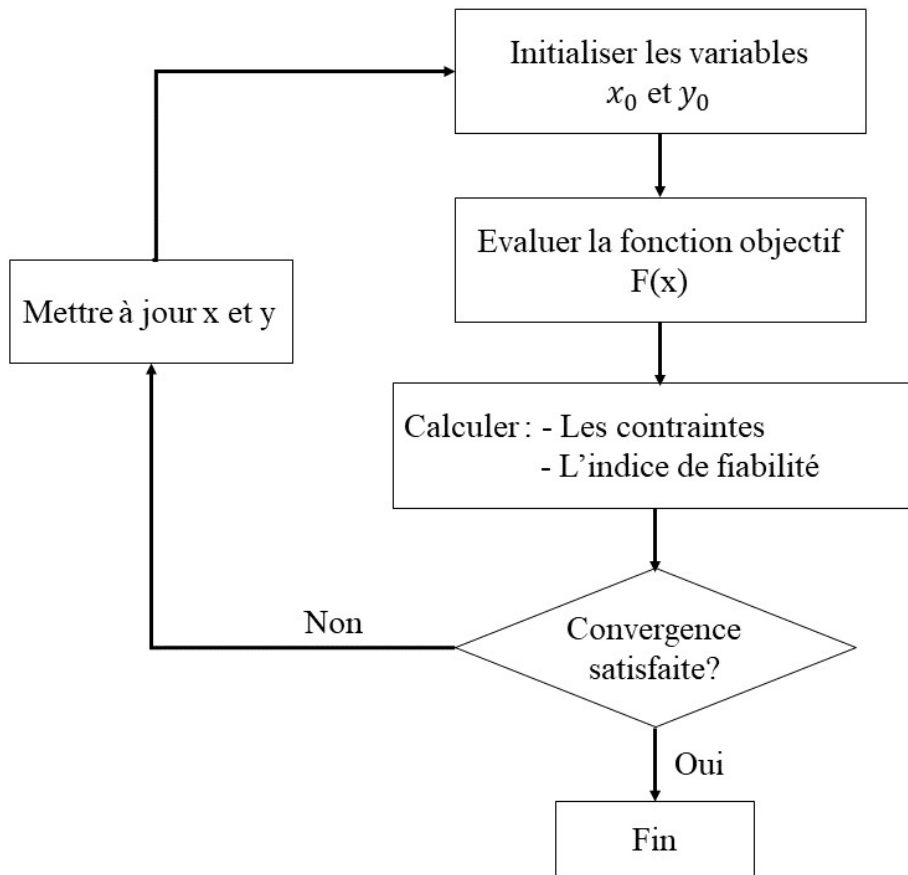


FIGURE 4.11 – Algorithme de la méthode hybride.

## 4.4 Application au HEMT

### 4.4.1 Modèle éléments finis du HEMT

Dans le cas de notre étude, le système à étudier est toujours le transistor à haute mobilité électronique (HEMT), le modèle éléments finis du composant sera un élément essentiel dans le processus de l'optimisation fiabiliste. La modélisation multiphysique de ce composant sera faite en utilisant le logiciel Comsol multiphysics basé sur la méthode des éléments finis. Les étapes et les équations de la modélisation sont déjà détaillées dans le chapitre précédent (chapitre 2). Pour cette étude d'optimisation on s'intéresse au modèle électro-thermomécanique pour réaliser une étude d'optimisation fiabiliste du HEMT. Ce modèle (figure 4.12) sera un élément essentiel dans les processus suivants : le processus de l'analyse de fiabilité, qui permet d'estimer le niveau de la fiabilité ou la probabilité des défaillances du HEMT. Et le processus de l'optimisation fiabiliste, qui permet d'optimiser le niveau de fiabilité de la structure du HEMT.

Le modèle éléments finis est développé sous des conditions aux limites thermiques telles que la puissance dissipée au niveau de la zone active, et la température de référence au-dessous du substrat. Les conditions aux limites mécaniques sont présentes aussi sous forme des déplacements imposés au niveau du substrat.

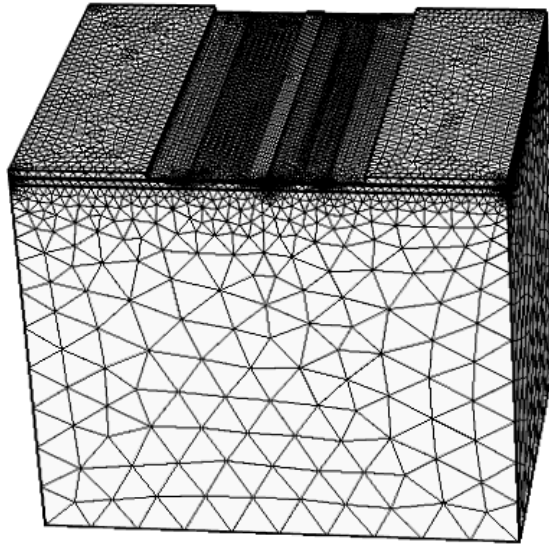


FIGURE 4.12 – Le modèle éléments finis du HEMT pour l’optimisation fiabiliste.

#### 4.4.2 Analyse de la fiabilité du HEMT

Pour analyser la fiabilité du HEMT, plusieurs auteurs ont analysé l’effet des caractéristiques électriques sur la performance de sa structure ou juste une partie de la structure [52, 69, 60]. Alors que, les phénomènes thermiques influencent aussi la fiabilité du HEMT, sous forme des dégradations comme l’enterrement de grille, les dégradations du contact Schottky, et la dégradation de l’interconnexion des métaux d’alimentation, etc [106]. Lors du fonctionnement du HEMT, il subit au phénomène de l’auto échauffement à cause de la puissance dissipée au niveau de la zone active [21]. D’après la modélisation que nous avons développée, nous avons constaté que les effets thermiques sur le comportement thermomécanique du HEMT, sont très importants par rapport aux effets électriques. A travers les valeurs des paramètres mécaniques obtenus dans les deux cas. On sait bien que, parmi les avantages de la technologie HEMT on trouve le fonctionnement à haute puissance et à haute température. Par conséquent, on va s’intéresser à l’étude de la fiabilité du HEMT, dans le cas de haute puissance dissipée et haute température de référence [2].

La modélisation thermique a permis d’identifier les paramètres qui ont un grand impact sur la température du fonctionnement, comme la puissance dissipée  $P_{diss}$ , la température de référence  $T_{ref}$  et les propriétés des matériaux aussi. Pour étudier la fiabilité du HEMT il est nécessaire de construire la fonction de performance. Dans notre cas, le composant assure la fiabilité si le déplacement maximal ne dépasse pas  $D_{max}=0.1\mu m$ , qui représente la valeur des déplacements maximale dans les conditions normales du fonctionnement du HEMT, donc la fonction d’état limite s’exprime comme suit :

$$G(X) = D_{max} - D(X) \quad (4.20)$$

$D(x)$  est obtenu à partir du modèle éléments finis développé précédemment, en fonction de vecteur des variables aléatoires  $X$  qui représente les paramètres des couches qui ont un effet important sur le comportement électro-thermomécanique du HEMT, les couches concernées sont le substrat, GaN et AlGaN. Dans cette étude on considère les propriétés des matériaux comme



des variables aléatoires avec une distribution normale.

Variable	Distribution	Moyenne	Ecart-type
$E_{SiC}$	Normale	Tableau2	74.8
$E_{GaN}$	Normale	Tableau2	18.1
$E_{AlGaN}$	Normale	Tableau2	21.275
$CTE_{SiC}$	Normale	Tableau 2	4.3 e-7
$CTE_{GaN}$	Normale	Tableau 2	8.6 e-7
$CTE_{AlGaN}$	Normale	Tableau 2	5.242 e-7
$\nu_{SiC}$	Normale	Tableau 2	0.03
$\nu_{GaN}$	Normale	Tableau 2	0.03
$\nu_{AlGaN}$	Normale	Tableau 2	0.03

TABLE 4.1 – Distribution des paramètres.

L'analyse de fiabilité du HEMT se fait par un couplage entre le modèle éléments fins sous le logiciel Comsol Multiphysics et le modèle probabiliste sous le logiciel Matlab. Cette analyse se fait suivant l'organigramme 4.13.

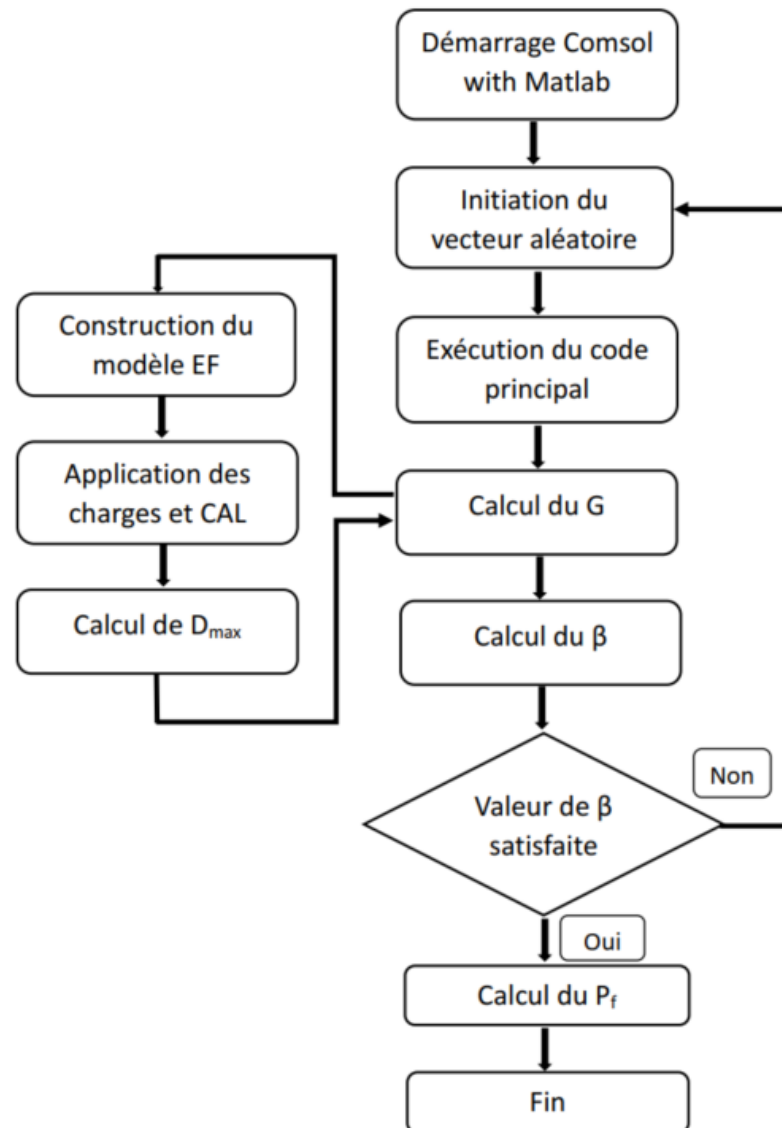


FIGURE 4.13 – Organigramme du calcul de la fiabilité.

Les résultats de l'analyse de fiabilité du HEMT par les deux méthodes SORM et FORM sont classés dans le tableau 4.2, le niveau de la fiabilité par la méthode FORM est 0,83 et par la méthode SORM est 0,98, sachant que la méthode de SORM est plus précise. D'après cette partie de l'analyse de fiabilité on constate qu'il faut optimiser le niveau de fiabilité du HEMT pour augmenter sa performance [2].

Variable	FORM	SORM
$\beta$	0.83	0.98
$P_f$	20.28	16.12
$R$	79.72	83.87

TABLE 4.2 – Résultats de fiabilité.

### 4.4.3 Optimisation du HEMT par la méthode RBDO hybride

#### Description du problème d'optimisation

Lors du fonctionnement du HEMT, l'interaction entre les phénomènes électriques et thermiques peut engendrer des phénomènes mécaniques dans la structure du composant sous forme des déplacements, déformations et contraintes. Ces derniers peuvent amener à la défaillance du transistor. Par conséquent, le contrôle et la minimisation de l'effet de ces phénomènes représentent un défi qui influence gravement la fiabilité du composant. Dans ce sens, le but de notre étude est de minimiser l'effet des contraintes de von Mises sur la structure du HEMT sous des contraintes déterministes et aléatoires, sans négliger le niveau de fiabilité. Dans la partie précédente on a cité deux types de la méthode RBDO, alors que la méthode convenable à notre cas est la méthode hybride, car elle prend en considération et simultanément le niveau de fiabilité lors du processus de l'optimisation. Par conséquent, le problème de l'optimisation par la méthode hybride s'exprime comme suite [2] :

$$\begin{aligned}
 \min_{x,y} \quad & F(x, y) = \sigma_e(x) \cdot d_\beta(x, y) \\
 \text{s.t.} \quad & d_\beta(x, y) \geq \beta_t \\
 & g_k(x, y) \leq 0, \\
 & k = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

avec  $x$  et  $y$  sont respectivement les variables déterministes et les variables aléatoires dans l'espace hybride [105],  $\sigma_e(x)$  est les contraintes de von Mises au niveau de la structure,  $d_\beta(x, y)$  la distance entre le point conception et le point optimal,  $F(x, y)$  est la fonction objectif à minimiser.  $\beta_t = 3$  est l'indice de fiabilité souhaité, et  $g_k(x, y)$  représente les contraintes déterministes et aléatoires.

#### 4.4.4 Résultats numériques

Dans cette partie, on va présenter les résultats de processus de l'optimisation que nous avons développé précédemment. L'exécution de ce processus nécessite un couplage entre deux modèles : le modèle éléments fins que nous avons construit par le logiciel Comsol Multiphysics, et le modèle optimisation-fiabiliste que nous avons développé par le logiciel Matlab. On a choisi les trois paramètres géométriques : l'épaisseur de substrat (a), l'épaisseur de GaN (b) et l'épaisseur de AlGaIn (c) comme des variables de conception, car ils ont une grande influence sur le comportement électro-thermomécanique du HEMT. Puis, on a classé les valeurs initiales, minimales

et maximales nécessaires pour résoudre ce problème dans le tableau 4.3.

paramètres	déterministes	maximales	minimales
substrat	100	90	160
GaN	1.7	1.1	1.9
AlGaN	0.03	0.01	0.09

TABLE 4.3 – Variables de conception.

La résolution de problème de l'optimisation se fait suivant le processus de la figure 4.15. La première étape consiste à initialiser les paramètres de l'optimisation fiable hybride, et d'initialiser les vecteurs des variables déterministes et les variables aléatoires. Dans la suite, il faut évaluer la fonction objectif par le modèle éléments finis grâce au couplage développé précédemment. Par la suite, on évalue le niveau de fiabilité et on calcule les contraintes simultanément, mais par deux fonctions indépendantes. Si les résultats obtenus ont vérifié le critère de convergence, le processus s'arrête et retourne les valeurs optimales. Sinon les variables seront mises à jour, en reprenant le processus d'optimisation fiable jusqu'à assurer la convergence.

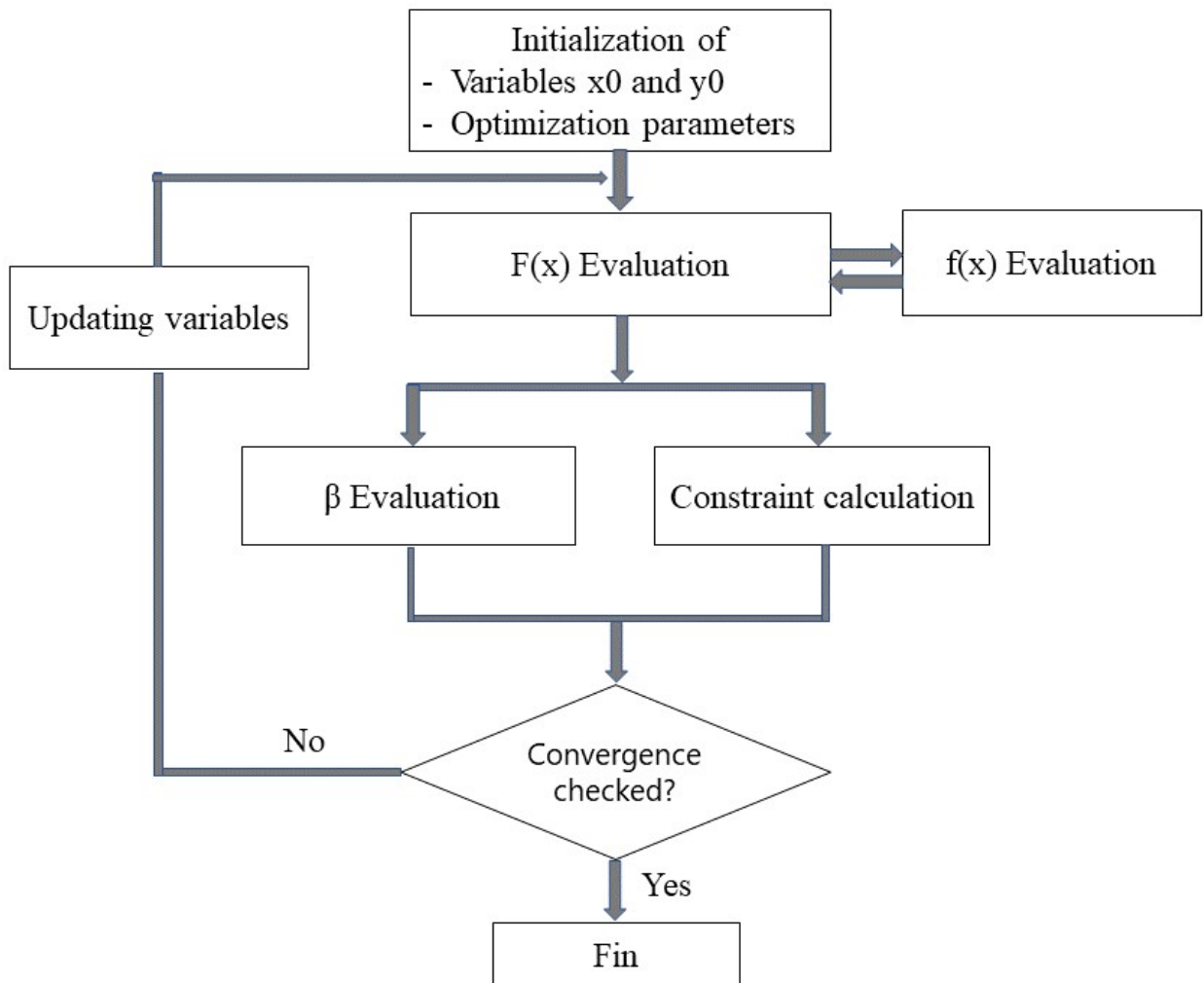


FIGURE 4.14 – Processus de résolution du problème de l'optimisation fiable.

Les résultats obtenus par l'approche RBDO hybride sont mentionnés dans le tableau 4.4.

Ce tableau montre les valeurs initiales et optimales des variables, on remarque que la méthode RBDO hybride a permis de minimiser l'effet des contraintes de von Mises dans la structure du HEMT, la valeur des contraintes a diminué de 3.3865 GPa à 3,016 GPa et le niveau de fiabilité est amélioré de 0,83 à 3,001. On peut remarquer aussi que les valeurs des variables optimales sont différentes des valeurs initiales [2]. Optimiser les contraintes va diminuer la probabilité des défaillances électriques et thermomécaniques à coté de la zone active liées à ce paramètre. De plus, améliorer l'indice de fiabilité permet de diminuer les défaillances au niveau des électrodes du HEMT dont les déplacements sont très importants.

Variabes	Valeurs initiales $x_0$	Valeurs initiales $y_0$	Point de conception $y$	Solution optimale $x$
a	100	100.1	103.52	141.01
b	1.7	1,71	1.38	1.379
c	0.03	0,031	0.042	0.049
$\sigma_e$	3.3865e+09	—	—	3.0613e+09
$\beta$	0.98	—	—	3.001

TABLE 4.4 – Résultats de RBDO.

Le processus de l'optimisation fiabiliste appliqué au HEMT a convergé après 19 itérations, l'évolution de la fonction objectif  $F(x)$  en fonction du nombre d'itérations est mentionnée dans la figure 4.15.

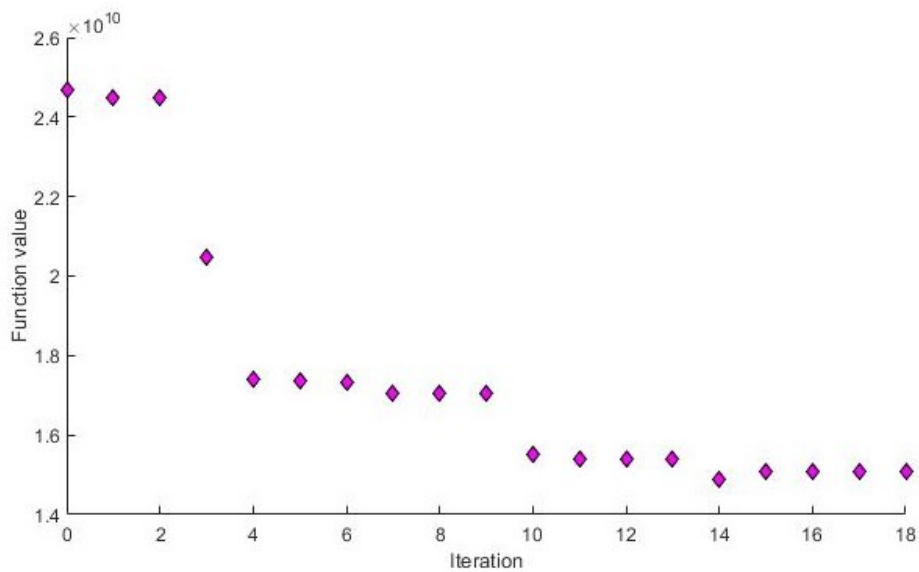


FIGURE 4.15 – Evolution de la valeur de la fonction objectif en fonction du nombre des itérations par la méthode RBDO hybride.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a proposé une approche pour améliorer la fiabilité du transistor à haute mobilité d'électron (HEMT), en utilisant la méthode RBDO (Reliability Based Design Optimization) hybride. Dans un premier temps, on a évalué le niveau de la fiabilité du HEMT par les deux méthodes d'approximation FORM et SORM (First Order Reliability Method / Second Order Reliability Method). Afin d'optimiser le niveau de la fiabilité, le processus de la méthode RBDO hybride se fait par le couplage entre deux modèles. Le premier est le modèle éléments finis développé sous le logiciel Comsol Multiphysics, il a permis de simuler le comportement multiphysique du HEMT, et d'observer les phénomènes thermomécaniques de sa structure. Le deuxième est le modèle probabiliste RBDO codé sous le logiciel Matlab, il sert à minimiser la fonction objectif sous les contraintes imposées et d'évaluer le niveau de fiabilité simultanément. L'application de l'approche RBDO sur la technologie HEMT a permis de déterminer des nouveaux paramètres de conception. Les résultats obtenus ont permis de minimiser les contraintes de von Mises au niveau de la structure et d'améliorer son niveau de fiabilité. La méthode RBDO hybride a montré une efficacité pour résoudre des problèmes d'optimisation par rapport à la méthode classique et la méthode déterministe. Cependant, cette approche reste coûteuse en termes du temps et stabilité de calcul.

---

## Conclusion générale et perspectives

---

Les systèmes mécatroniques sont des systèmes dynamiques et toujours encore du développement. Par conséquent, la maîtrise de la fiabilité et la performance de ces systèmes est un enjeu majeur actuellement. Dans cette thèse, nous avons étudié l'optimisation fiabiliste en mécatronique, application à des transistors à haute puissance. Cette étude vise à optimiser la fiabilité des systèmes à travers l'optimisation fiabiliste de leurs composants les plus critiques.

Dans la première partie, nous avons présenté les systèmes mécatroniques ainsi que leur processus du développement. On a montré leur rôle important dans le développement des nouvelles technologies dans les différents domaines (industrie, automobile, aviation, etc). De plus, on a présenté également les différentes modes de défaillance qui influencent la performance de ces systèmes. Nous avons présenté aussi les différents types des transistors à haute puissance qui représentent l'un des éléments importants des systèmes mécatroniques, et notamment le HEMT (High Electron Mobility Transistor) qui possède des avantages par rapport aux autres. Ces avantages : les caractéristiques électriques, les propriétés des matériaux de la structure et le principe du fonctionnement ont été également présentés. La section finale de cette partie a été consacrée pour étudier les différents mécanismes de dégradation du HEMT : thermiques, pièges et effet piézoélectrique et leur impact sur sa fiabilité.

La deuxième partie vise à observer le comportement multiphysique du HEMT. Nous avons présenté une modélisation multiphysique du HEMT. Nous avons également présenté les différentes notions, les propriétés des matériaux et les équations électro-thermomécanique nécessaires. Par suite, nous avons effectué des simulations par le logiciel Comsol multiphysics à travers des codes et des interfaces de simulations développés grâce au couplage avec le logiciel Matlab. Tous ces outils ont permis d'observer l'influence de la puissance dissipée et la température de référence qui représentent les conditions du fonctionnement de HEMT sur son comportement thermique et mécanique. De plus, le modèle développé a permis d'étudier l'influence de plusieurs paramètres géométriques de la structure sur le comportement multiphysique du composant.

La modélisation a montré l'effet de plusieurs paramètres sur le comportement électrothermomécanique du HEMT. Dans la troisième partie, nous avons développé des approches d'optimisation afin d'améliorer le comportement du HEMT en minimisant les effets des conditions du fonctionnement. Ces approches ont été basées sur le couplage des deux modèles : le modèle éléments finis et le modèle d'optimisation avec le logiciel Matlab. Le modèle d'optimisation est

assuré par la méthode CMA-ES, cette méthode a été efficace pour ce problème d'optimisation, mais elle était très coûteuse en terme du temps du calcul. Par conséquent, nous avons pensé à la méthode CMA-ES assistée par le métamodèle de krigeage. Grâce à cette approche, nous avons arrivé à optimiser le comportement thermique et thermomécanique du HEMT.

La méthode précédente de l'optimisation ne prend pas en considération le niveau de fiabilité. Par conséquent, dans cette partie nous allons présenter l'approche de l'optimisation fiabiliste en citant ses différents types. Pour résoudre le problème de l'optimisation, nous avons utilisé la méthode RBDO (Reliability Based Design Optimization) hybride qui permet de résoudre deux problèmes simultanément : l'analyse de fiabilité et le problème de l'optimisation. Dans un premier temps, nous avons évalué le niveau de la fiabilité du HEMT par les deux méthodes d'approximation FORM et SORM (First Order Reliability Method / Second Order Reliability Method). Afin d'optimiser le niveau de la fiabilité, le processus de la méthode RBDO hybride se fait par le couplage entre deux modèles : le modèle éléments finis qui permet d'évaluer la fonction objectif standard et le modèle probabiliste RBDO codé sous le logiciel Matlab qui sert à minimiser la fonction objectif sous les contraintes imposées et d'évaluer le niveau de fiabilité simultanément. L'application de l'approche RBDO sur la technologie HEMT a déterminé des nouveaux paramètres de conception qui minimisent les contraintes de von Mises au niveau de sa structure et d'améliorer son niveau de fiabilité.

Les approches développées dans notre thèse ont permis de modéliser et optimiser le comportement multiphysique du HEMT. L'application de ces approches a ouvert d'autres phases de recherche qui peuvent être des perspectives de ce sujet :

- La modélisation du HEMT est en fonction de l'environnement du fonctionnement. Alors que, dans quelques systèmes le HEMT est soumis aussi à des vibrations qui doivent être étudiées et modélisées. Le modèle éléments finis développé par le logiciel Comsol multiphysics doit introduire aussi une partie des vibrations. D'autre part, cette méthode peut être utilisée pour modéliser d'autres composants électroniques (ou autres types des transistors).
- La méthode d'optimisation KA-CMA-ES appliquée au HEMT a permis de minimiser les effets thermiques et mécaniques dans la structure du HEMT, cette approche peut être utilisée aussi pour optimiser son comportement électrique en prenant en considération les paramètres géométriques et électriques. Elles peuvent être appliquées pour résoudre des problèmes d'optimisation mécaniques des composants électroniques comme le convertisseur DC/DC des véhicules électriques.
- L'approche RBDO hybride que nous avons développé dans cette thèse a permis d'optimiser le comportement thermomécanique du HEMT en améliorant sa fiabilité. Cette méthode a montré son efficacité dans notre cas d'étude. Par conséquent, elle peut être utilisée pour optimiser le comportement des autres composants des systèmes mécatroniques comme les cartes électroniques, les boîtiers T-CSP (Chip Size Package) ou les micro-contrôleurs PQFP (Plastic Quad Flat Package), etc.

---

## Notions de base dans la thermique

---

La thermique est une science qui s'intéresse à l'étude de la production et l'utilisation d'énergie, afin de produire de chaleur ou de froid. Elle s'intéresse aussi au transfert de chaleur par ces différentes modes. Dans cette section, nous allons présenter quelques notions de base dans la thermique.

### A.1 Le champ de température

Le champ de température noté  $T(x,y,z,t)$  est la valeur instantanée de la variable d'état température, on distinguera deux modes :

- régime permanent ou stationnaire : le champ de température est indépendant de temps.
- régime variable ou transitoire ou stationnaire : le champ de température est en fonction de de temps.

### A.2 Le gradient de température

La notion de gradient de température est utilisée pour étudier les variations spatiales du champ de température au sein du système. Le gradient de température est maximal lorsqu'il est orienté perpendiculairement à une surface isotherme du système et il est défini par :

$$\vec{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (\text{A.1})$$

avec  $\Delta T$  représente le gradient de température est plus souvent exprimé sous forme d'un écart global. Il exprime également la différence de température entre le point le plus chaud  $T_{Max}$  et la température de référence  $T_{Réf}$ .  $\vec{n}$  est le vecteur unitaire de la normale à l'isotherme. Ce gradient est particulièrement élevé dans le cas des composants GaN, compte tenu des fortes densités de la puissance dissipée [107].



### A.3 La chaleur

La chaleur  $Q$  peut être définie de différentes manières. C'est une forme d'énergie, autrement l'énergie de mouvement des molécules qui constituent le corps étudié. Plus le corps est chaud, plus que les molécules se déplacent rapidement. La chaleur peut être définie comme le transfert d'énergie thermique d'un corps à un autre (ou à lui-même) à la présence d'un gradient de température entre les deux objets.

### A.4 Flux de chaleur et densité de flux

Le flux de chaleur  $\varphi$  est une grandeur physique qui permet d'estimer la quantité de chaleur générée ou transmise par le corps au cours du temps. Le flux de chaleur peut s'exprimer comme suite :

$$\varphi = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

et la densité de flux de chaleur  $\Phi$  représente le flux de chaleur par unité d'aire de la surface isotherme [20] :

$$\Phi = \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

avec  $A$  l'aire de la surface isotherme.

### A.5 La puissance dissipée

Dans le cas des composants électroniques, une partie de puissance se dissipe sous forme de chaleur par effet de joule. Au niveau du composant, le flux de chaleur générée sous forme de puissance dissipée peut donc s'exprime comme suit :

$$P_{\text{dissipée}} = \varphi[\text{W}] \quad (\text{A.4})$$

Dans le cas d'un transistor la puissance dissipée s'exprime généralement sous forme de densité linéaire de puissance dissipée, en fonction du développement total du transistor [108] :

$$P_{\text{dissipée}} = \frac{\varphi}{z} [\text{W/mm}] \quad (\text{A.5})$$

### A.6 Résistance thermique

La résistance thermique  $R_{th}$  sert à quantifier le gradient de température pour lequel un corps ou un matériau résiste à un flux de chaleur entre deux points de ce corps. Elle permet de mesurer l'efficacité thermique du système, Cette résistance thermique est une grandeur non linéaire notamment en fonction de la température, Cette grandeur est fonction de la densité de puissance dissipée :

$$R_{th} = \frac{T_i - T_f}{P_{diss}} \quad (\text{A.6})$$

avec :

- $T_i$  la température initiale.
- $T_f$  La température finale.
- $P_{diss}$  La puissance dissipée.

## A.7 Impédance thermique et capacité thermique

l'impédance thermique  $Z_{TH}$  représente la réponse thermique temporelle d'un système dans le cas d'une étude thermique au cours du temps (en régime transitoire). Cette réponse est analogue à celle du domaine électrique, elle s'exprime :

$$Z_{TH} = R_{th} \left( 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{th}}\right) \right)$$

avec :

- $R_{th}$  la résistance thermique ;
- $\tau_{th}$  : La constante de temps thermique [s].

---

## Le logiciel Comsol multiphysics

---

Le logiciel Comsol multiphysics est un outil numérique puissant qui sert à modéliser et simuler les différents problèmes physiques (scientifiques et techniques). Il possède plusieurs modules pour la simulation des différents champs, tels que la mécanique, le thermique, l'électromagnétique, l'électrique, etc. Dans cette partie on va présenter les simulations faites avec Comsol, la modélisation par ce logiciel se fait en plusieurs étapes à suivre. Dans cette annexe on va détailler chaque étape. En général, pour réaliser une simulation avec le logiciel Comsol on suit les mêmes étapes de la méthode des éléments finis.



FIGURE B.1 – Logiciel Comsol

### B.1 Création d'un nouveau modèle

Comsol vous offre la possibilité de configurer un modèle guidé par l'assistant de modèle ou à partir d'un modèle vierge, selon votre choix.

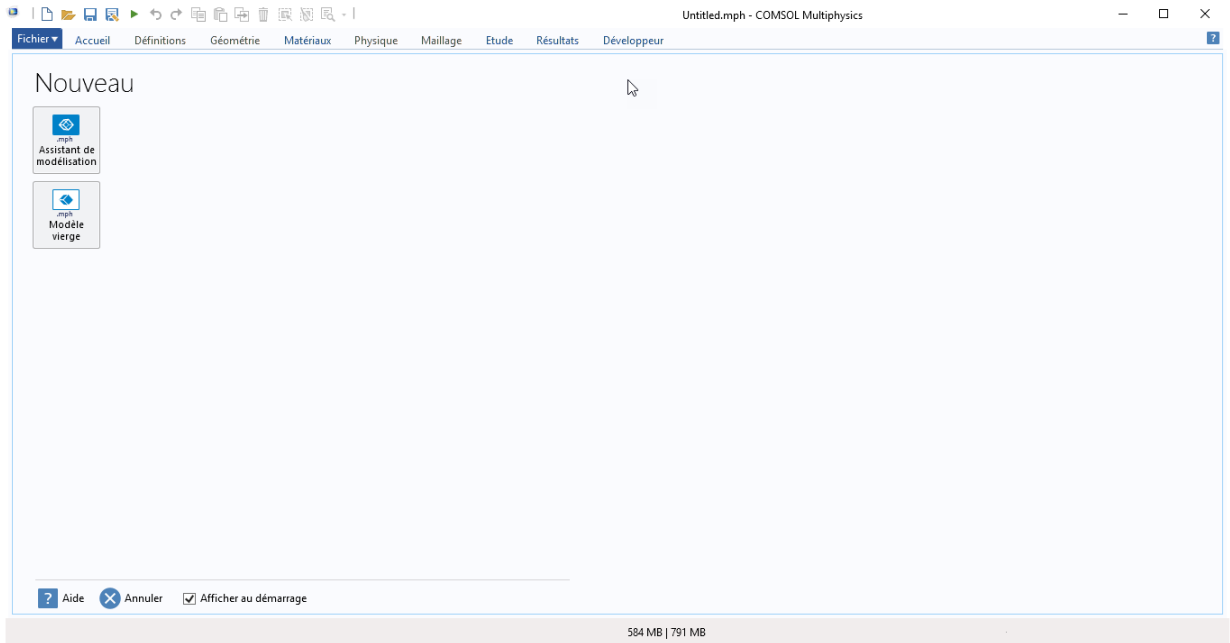


FIGURE B.2 – Création d'un nouveau modèle

Si vous avez choisi la première méthode, alors l'assistant de création de modèle vous guidera dans la configuration de la dimension de l'espace, de la physique et du type d'étude en quelques étapes :

1- vous devez commencer par la sélection de la dimension d'espace de votre composant : 3D, 2D Axisymétrique, 2D, 1D Axisymétrique, ou 0D.

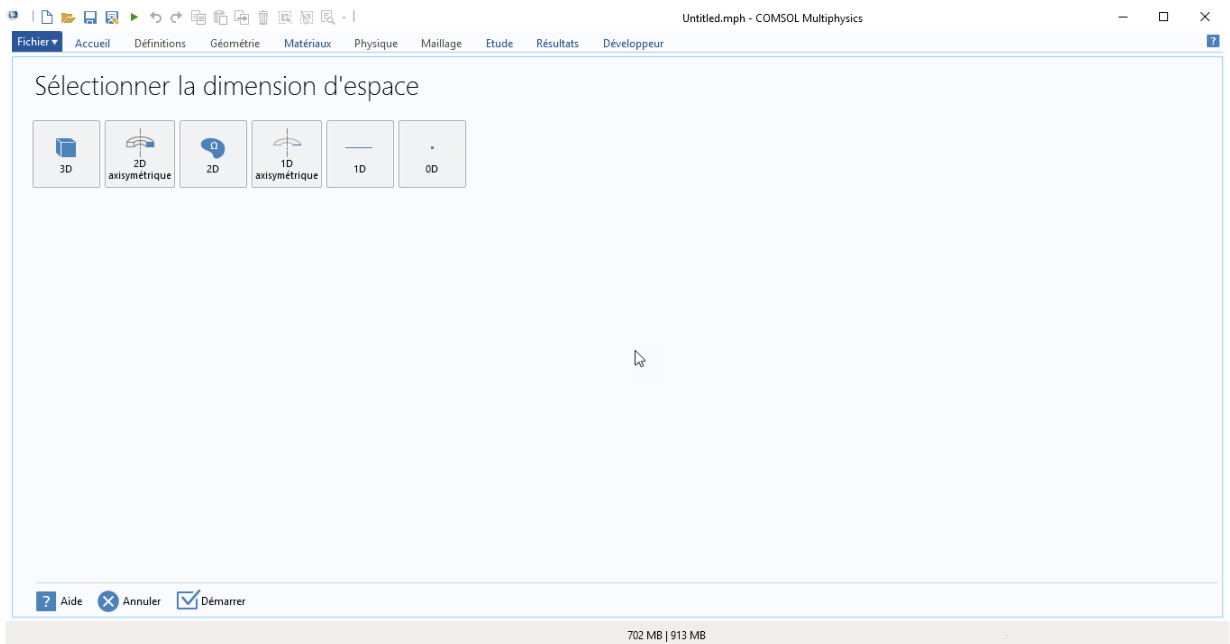


FIGURE B.3 – Configuration de la dimension de l'espace

2- Avec l'option de " Sélectionner la physique", vous pouvez ajouter une ou plusieurs interfaces

physiques. Celles-ci sont organisées en un certain nombre de branches de physique afin de les rendre faciles à localiser. Ces branches ne correspondent pas directement à des produits. Lorsque les produits sont ajoutés à votre Comsol Multiphysics, une ou plusieurs branches seront remplies avec des interfaces physiques supplémentaires.

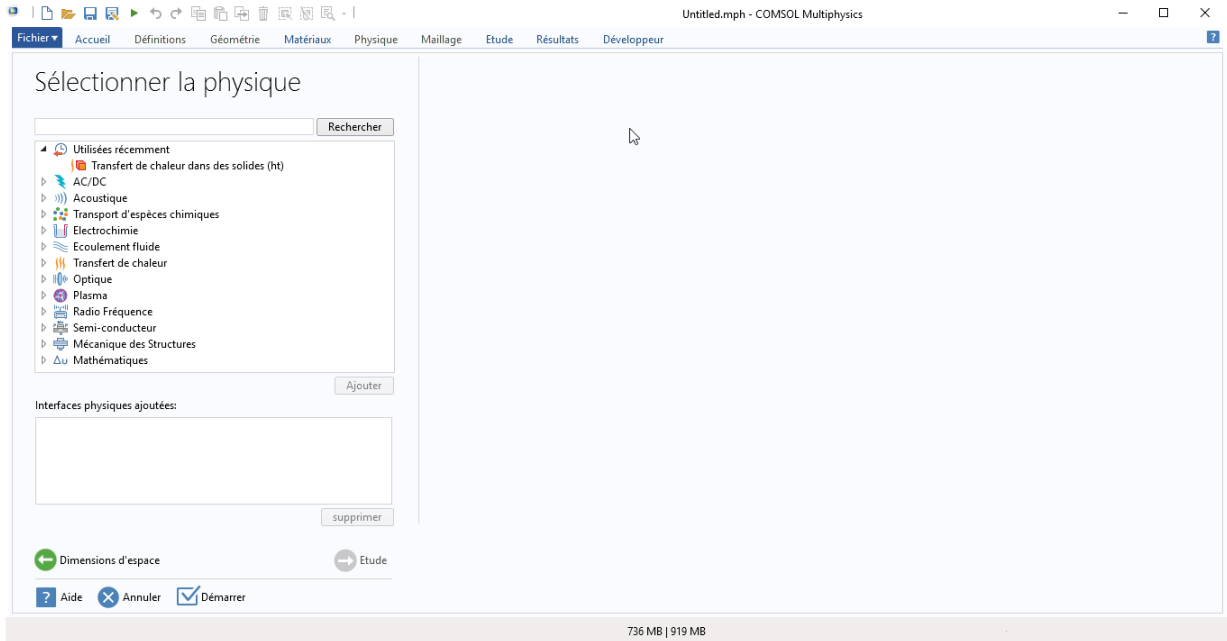


FIGURE B.4 – Sélection de la physique

3- Par suite, il faut sélectionner le type d'étude qui représente le solveur ou l'ensemble des solveurs qui seront utilisés pour le calcul : Stationnaire, Transitoire, etc. Enfin, cliquez sur Done. L'interface principale va s'afficher avec l'arbre du modèle configuré selon les choix que vous avez faits dans l'assistant de modèle. selon les choix que vous avez faits dans l'assistant de modèle.

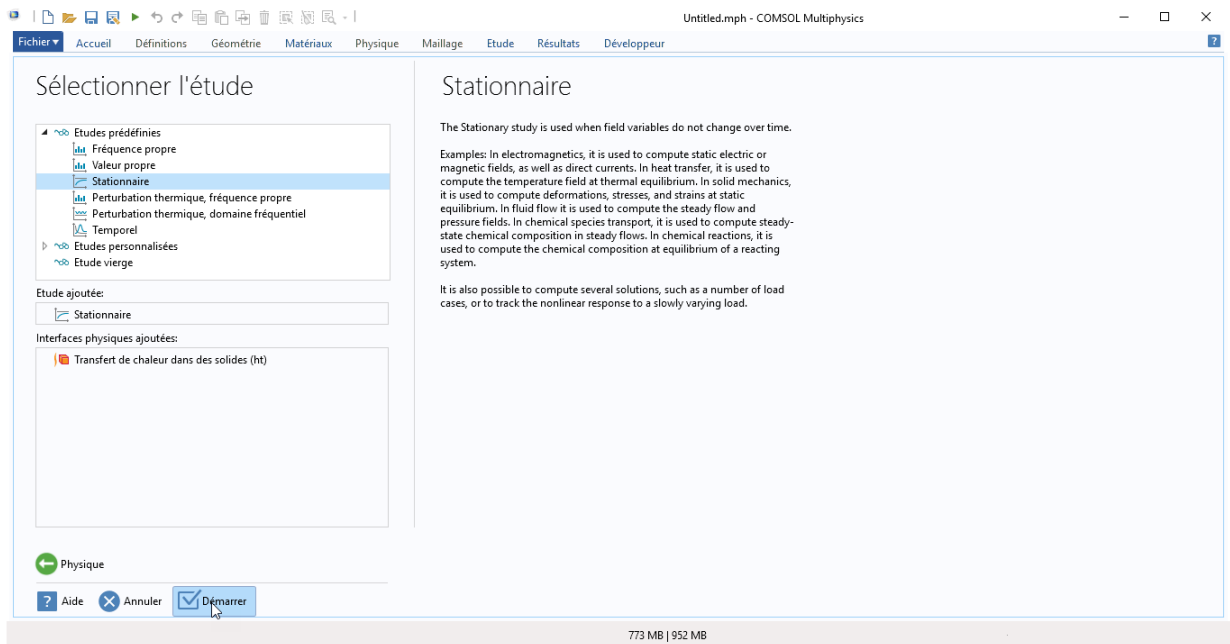


FIGURE B.5 – Sélection de type d'étude

## B.2 Paramètres et variables

Parmi les avantages de Comsol, c'est qu'il permet de paramétrer notre système, soit les dimensions de la géométrie, ou les conditions aux limites ou les charge à appliquer pour simplifier les tâches dans le cas des modifications. Les paramètres globaux sont des scalaires constants définis par l'utilisateur qui sont utilisables dans tout le modèle. En d'autres termes, ils sont de nature "globale". Les utilisations importantes sont :

- Paramétrer les dimensions géométriques.
- Spécifier la taille des éléments du maillage.
- Définir des balayages paramétriques (simulations répétées pour une variété de valeurs différentes d'un paramètre tel que la fréquence ou la charge).

Une expression de paramètre global peut contenir des nombres, des paramètres globaux, des constantes intégrées, des fonctions intégrées et définies par l'utilisateur avec des expressions de paramètre global comme arguments, ainsi que des opérateurs unitaires et binaires. Pour obtenir une liste des opérateurs disponibles

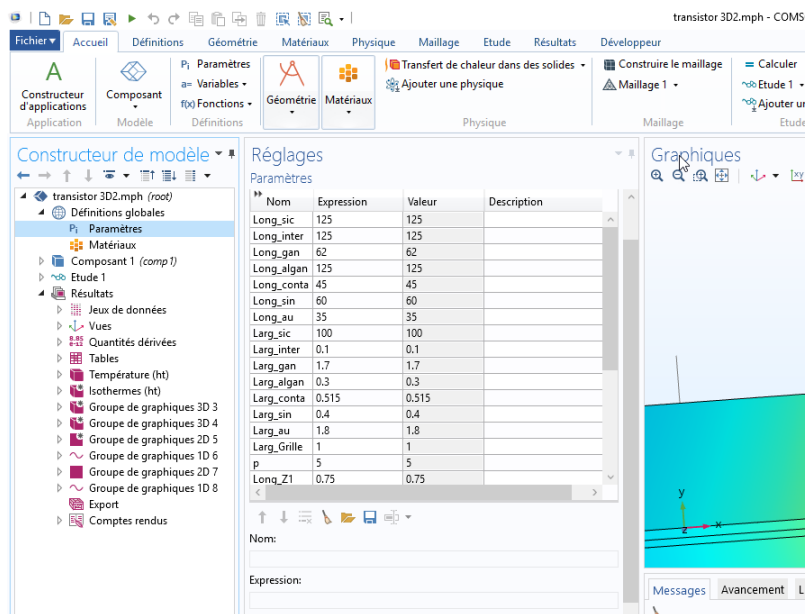


FIGURE B.6 – Définition des paramètres de simulation

### B.3 Création de la géométrie

Cette section permet de créer la géométrie du modèle à l'aide des outils de géométrie intégrés dans Comsol Multiphysics. Les instructions vous guident à travers la construction de la géométrie à l'aide des paramètres définis dans la section "Définitions globales". L'utilisation de dimensions paramétrées permet de faciliter la construction de la géométrie. D'autre part, au lieu de construire la géométrie à l'aide des outils disponibles dans COMSOL Multiphysics, vous pouvez importer une géométrie créée avec un logiciel de CAO.

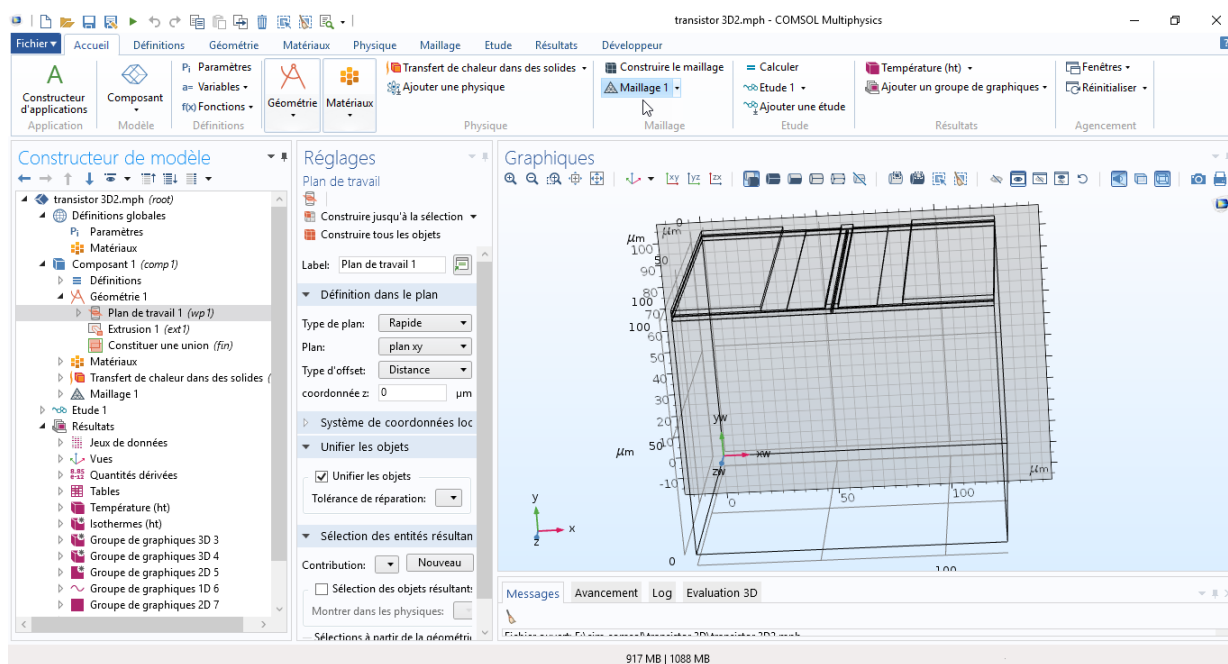


FIGURE B.7 – La géométrie sur COMSOL

## B.4 Les propriétés des matériaux

Le nœud Matériaux stocke les propriétés des matériaux pour tous les domaines physiques. vous pouvez aussi ajouter les propriétés d'un matériau manuellement.

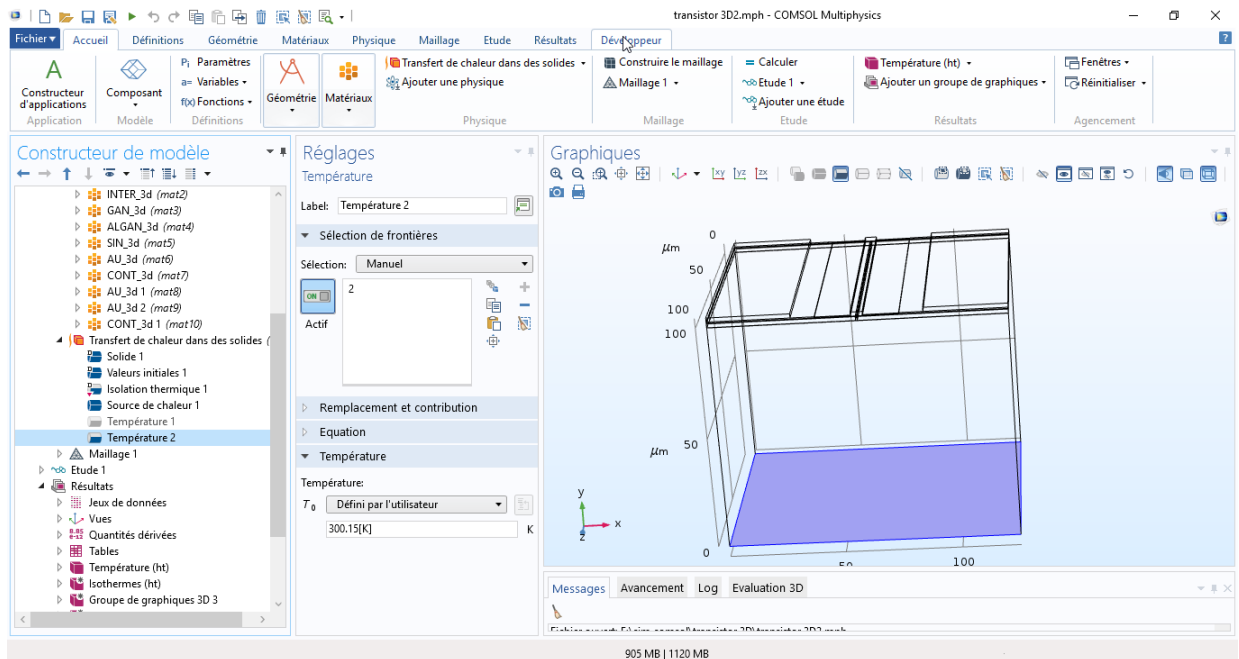


FIGURE B.8 – Les propriétés des matériaux

## B.5 Charges et conditions aux limites

Une fois la géométrie et les matériaux sont définis, vous pouvez définir les conditions aux limites.

- Les conditions aux limites : pour appliquer les conditions aux limites on a utilisé la fonction « physique », et l'option frontière qui nous permet d'appliquer la température de référence  $T_{ref}$  au niveau du substrat qui varie entre 25 et 300°C. Dans le cas de modélisation thermomécanique, on doit introduire aussi les conditions aux limites mécaniques.



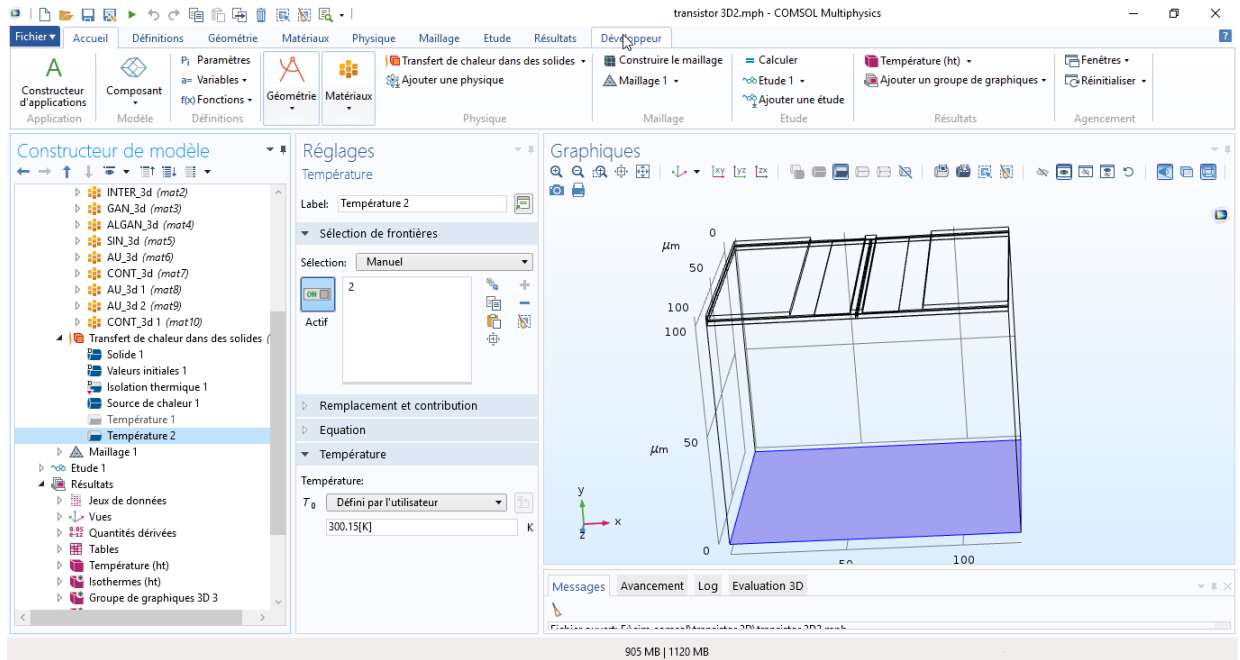


FIGURE B.9 – Application des conditions aux limites

- Application de la charge : pour appliquer la charge qui est dans notre cas la densité linéaire de la puissance dissipée au niveau de la zone active qui va varier souvent entre 1 et 12 W/mm.

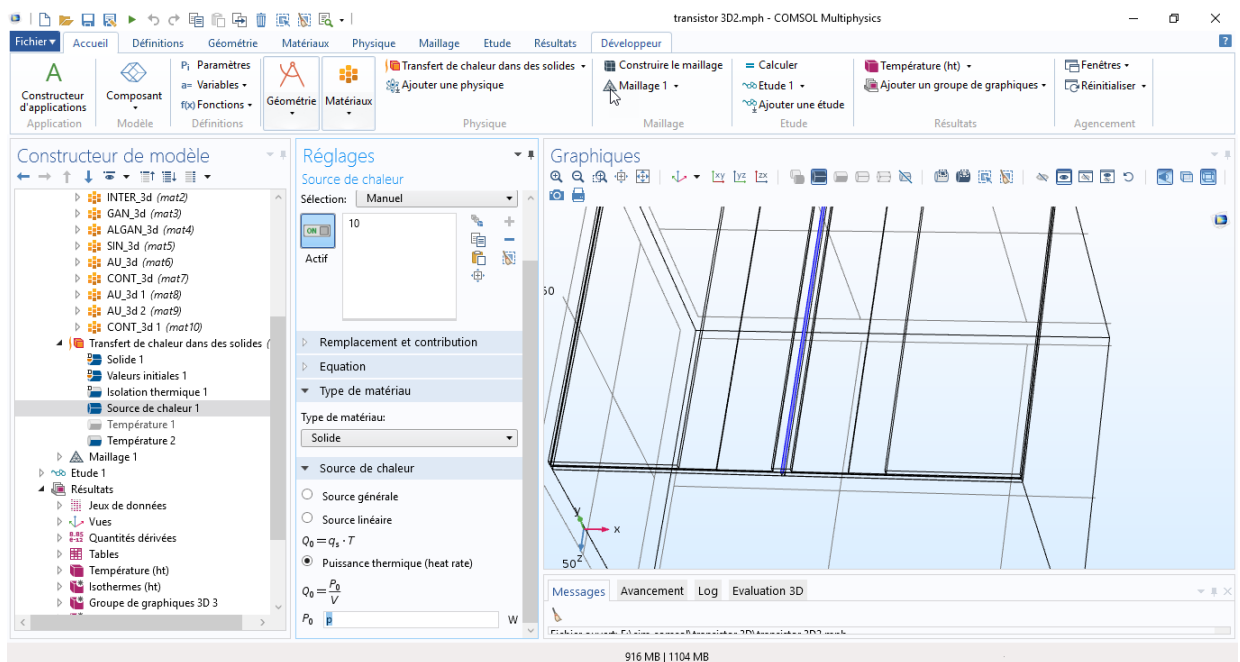


FIGURE B.10 – Application de charge

## B.6 Maillage

Les paramètres de maillage déterminent la résolution du maillage d'éléments finis utilisé pour discrétiser le modèle. La méthode des éléments finis divise le modèle en petits éléments

de formes géométriques simples : tétraédrique, hexagonale, parallélépipédique. etc. Le calcul thermomécaniques par éléments finis est basé sur la résolution des équations thermomécaniques dans chaque noeud de maillage. Le maillage de la géométrie du composant est important pour la résolution numérique. Il peut également influencer la convergence du calcul numérique.

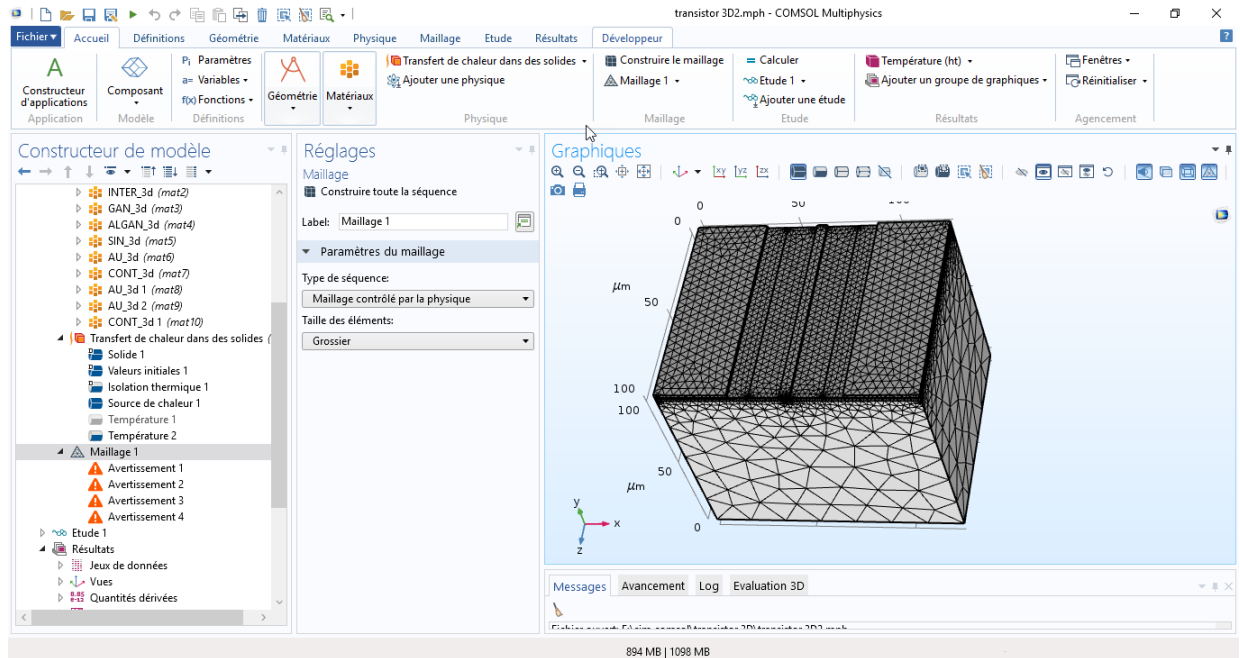


FIGURE B.11 – Étape de maillage

## B.7 Résultat

c'est une fonction qui nous permet d'afficher les résultats de simulation ainsi le type d'affichage, dans notre cas on observe la variation de la température au niveau du composant. Cette fonction permet aussi d'extraire des résultats soit dans les surfaces ou dans les volumes et donne la possibilité de choisir les éléments à afficher.

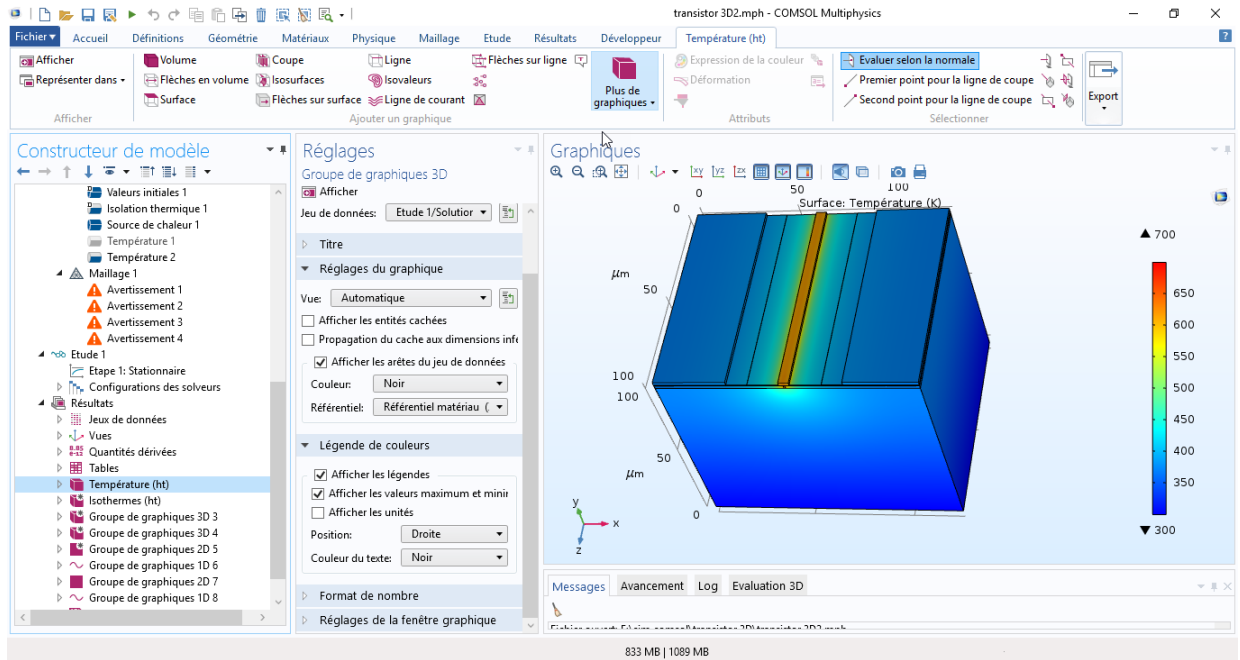


FIGURE B.12 – Résultat

on peut aussi extraire la variation d'un paramètre en fonction d'un autre soit par un graphe en volume, surface, ligne ou ponctuelle ( dans un point bien déterminé à préciser). Et pour observer l'évolution de la distribution d'un paramètre au niveau de la structure du système, cette fonction offre l'option d'animation dont on peut choisir la fréquence et le nombre des images à afficher

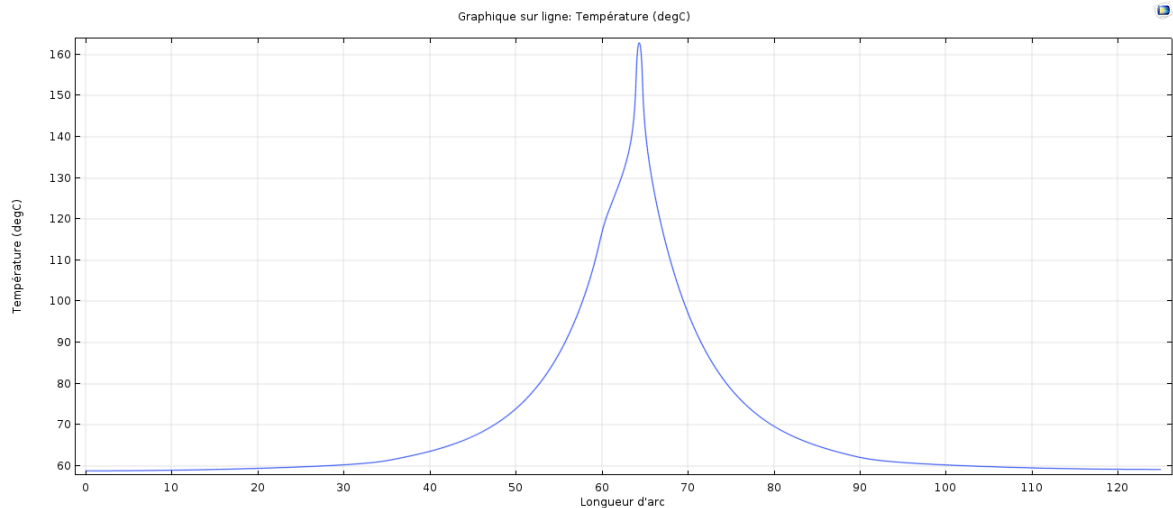


FIGURE B.13 – Résultat en graphe

### C.1 Algorithm 2 : Modified approximate ranking procedure

---

#### Algorithm 2 Modified approximate ranking procedure

---

- 1 : given :  $(z_k, x_k)_{k=1}^\lambda \cdot m^{(g)}, \sigma^{(s)}, C^{(g)}, t, \mathcal{A}, f(x)$
- 2 : approximate : build surrogate model  $f$  based on  $\mathcal{A}$ , and predict  $f_k = f(\mathbf{x}_k), k = 1, \dots, \lambda$
- 3 : rank and determine the parent set  $\mathcal{P}_1 = \{\mathbf{x}_{i:\lambda}\}_{i=1}^{j^x}$   
 where  $\hat{f}(\mathbf{x}_1:\lambda) \leq \dots \leq \hat{f}(\mathbf{x}_{2:\lambda})$
- 4 : select  $n_{\text{init}}$  controlled individual based on criterion  $C(\mathbf{x}_k), k = 1, \dots, \lambda$
- 5 : evaluate the  $n_{\text{init}}$  selected individuals by  $f(\mathbf{x})$  and update set  $\mathcal{A}, t \leftarrow t + n_{\text{init}}$
- 6 : for  $m = 2 : (\lambda - n_{\text{init}}) / m_b$  do
- 7 : approximate : build model  $\hat{f}$  based on  $\mathcal{A}$ , and predict  $f_k = \hat{f}(\mathbf{x}_k), k = 1, \dots, \lambda$
- 8 : rank and determine the parent set  $\mathcal{P}_m = \{\mathbf{x}_{i:\lambda}\}_{i=1}^\mu$   
 where  $\hat{f}(\mathbf{x}_{1:\lambda}) \leq \dots \leq \hat{f}(\mathbf{x}_{\lambda:\lambda})$
- 9 : if  $\mathcal{P}_{m-1} \neq \mathcal{P}_m$  (the parent set has changed) then
- 10 : select  $n_b$  controlled individual based on criterion  $C(\mathbf{x}_k), k = 1, \dots, \lambda$  and  $\mathbf{x}_k \notin \mathcal{A}$
- 11 : evaluate the  $n_b$  selected individuals by  $f(\mathbf{x})$  and update set  $\mathcal{A}, t \leftarrow t + n_b$
- 12 : else
- 13 : break (exit for loop)
- 14 : end if
- 15 : end for
- 16 : output :  $t, \mathcal{A}, (\mathbf{x}_k, \mathbf{z}_k, f_k)_{k=1}^\lambda - 1$
-

## C.2 Algorithm3 : Kriging-assisted CMA-ES

---

### Algorithm 3. Kriging-assisted CMA-ES.

---

- 1 : Initialize evolution path  $p_s^{(0)} = 0, p_c^{(0)} = 0$ , the covariance matrix  $C^{(i)} = I$   
the step size  $a^{\text{ion}}$  and the selection parameters .
- 2 : Initialize the mean vector  $m^{(0)}$  to a random candidate  $g - 0$
- 3 : while Convergence criterion is not reached do
- 4 :  $T \leftarrow \left\{ (x_i, f_i) \in \mathcal{S} \mid (x_i - m^{(b)})^T \right.$
- 5 :  $\left. \left( ((\infty)^2 c^4) - 1 (x_i - m^{(y)}) \leq r^2 \right\} \right.$
- 6 : if  $|T| < m_2$  then
- évaluation
- 7 :  $f_k - f(x_k^{(s+1)}) \quad k = 1, \dots, \lambda$
- 8 :  $\mathcal{S} = \mathcal{S} \cup \left\{ (x_k^{(g+1)}, 9 : f_k) \right\}_{\varepsilon-1}^\lambda$
- 10 :  $\leftarrow \left\{ (x_i, f_i) \in \left| (x_i - m^{(g)})^T \left( (\sigma^{(g)})^2 C^{(\Delta)} \right)^{-1} (x_i - m^{(g)}) \leq r^2 \right\} \right.$
- 11 : else
- 12 :  $\hookrightarrow$  Metamodel-based evaluation
- 13 : Run approximate ranking according to Algorithm 2 .
- 14 : end if
- 15 :  $m^{(g+1)} = \sum_{i=1}^\mu w_i x_{i=\lambda}^{(s)}$
- 16 :  $p_\sigma^{(g+1)} = (1 - c_\sigma) p_\sigma^{(g)} + \sqrt{c_\sigma (2 - c_\sigma) \mu_{eff}} (C^{(g)})^{-\frac{1}{2}} \frac{m^{(g+1)} - m^{(g)}}{\sigma^{(g)}}$
- 17 :  $\sigma^{(g+1)} = \sigma^{(g)} \exp \left( \frac{c_\sigma}{d_\sigma} \left( \frac{\|p_\sigma^{(g+1)}\|}{E(\|N(0, I)\|)} - 1 \right) \right)$
- 18 :  $p_c^{(g+1)} = (1 - c_c) p_c^{(g)} + h_\sigma \sqrt{c_c (2 - c_c) \mu_{eff}} \frac{m^{(g+1)} - m^{(g)}}{\sigma^{(g)}}$
- 19 :  $C^{(g+1)} = (1 - c_1 - c_u + c_1 \delta(h_\sigma)) C^{(g)} + c_1 p_c^{(g+1)} (p_c^{(g+1)})^T \dots$
- 20 :  $+ c_\mu \sum_{i=1}^u w_i \left( \frac{x_{i=\lambda}^{(g+1)} - m^{(g)}}{\sigma^{(g)}} \right) \left( \frac{x_{i=1}^{(g+1)} - m^{(g)}}{\sigma^{(g)}} \right)^T$
- 21 : end while
- 22 : return best optimum  $x_{\text{opt}}$
-

- [1] H. Hamdani, Métamodèles pour l'étude fiabiliste des systèmes mécatroniques, Ph.D. thesis, Normandie Université ; Université Hassan Ier (Settat, Maroc) (2019).
- [2] A. Amar, B. Radi, A. El Hami, Reliability based design optimization applied to the high electron mobility transistor (hemt), *Microelectronics Reliability* 124 (2021) 114299.
- [3] Power electronics news. <https://www.powerselectronicsnews.com/electric-vehicle-inverters-get-gans-efficient-cost-effective-values/> (2021).
- [4] Compound Semiconductor. <https://www.compoundsemiconductor.net/article/99943/Demonstrating-the-capability-of-GaN-HEMTs-for-satellite-communication/feature> (2021).
- [5] R. Mehandru, S. Kim, J. Kim, F. Ren, J. Lothian, S. Pearton, S. Park, Y. Park, Thermal simulations of high power, bulk gan rectifiers, *Solid-State Electronics* 47 (6) (2003) 1037–1043.
- [6] A. El Hami, P. Pougnet, *Embedded Mechatronic Systems 2 : Analysis of Failures, Modeling, Simulation and Optimization*, ISTE editions, 2015.
- [7] A. El Hami, P. Pougnet, *Les systèmes mécatroniques embarqués 2 - analyse des causes de défaillances, modélisation, simulation et optimisation*, ISTE editions, 2019.
- [8] G. L. Coustre, Contribution au développement d'une filière de transistor de forte puissance à base de technologie HEMT GaN pour applications télécoms et radar, Thèse de doctorat, Université des sciences et Technologies de Lille (2010).
- [9] A. Amar, B. Radi, A. El Hami, Optimisation du comportement thermique du transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) par la méthode KA-CMA-ES, Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques 4 (2) (2020) 1–11. [doi:10.21494/iste.op.2021.0600](https://doi.org/10.21494/iste.op.2021.0600).
- [10] A. Demri, Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle, Ph.D. thesis, Université d'Angers (2009).
- [11] A. G. Mihalache, Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué, Thèse de doctorat, Université d'Angers (2007).

- [12] A. Safa, Fiabilité et optimisation des structures mécaniques à paramètres incertains : application aux cartes électroniques, Thèse de doctorat., Université de Normandie. (2013).
- [13] F. Iucolano, T. Boles, GaN-on-si hems for wireless base stations, *Materials Science in Semiconductor Processing* 98 (2019) 100–105.
- [14] D. Maier, M. Alomari, N. Grandjean, J.-f. Carlin, M.-a. Forte-poisson, C. Dua, A. Chuvilin, D. Troadec, C. Gaquière, U. Kaiser, S. L. Delage, E. Kohn, Testing the Temperature Limits of GaN-Based HEMT Devices, *IEEE Transactions on device and materials reliability* 10 (4) (2010) 427–436.
- [15] R. Aubry, Etude des aspects électrothermiques de la filière HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> pour application de puissance hyperfréquence, Thèse de doctorat., L'université des sciences et technologiques de Lille (2004).
- [16] M. A. Mestaria, Etude et modélisation d'un transistor HEMT AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, Magister, Université Tlemcen (2012).
- [17] J. W. Pomeroy, R. B. Simon, H. Sun, D. Francis, F. Faili, D. J. Twitchen, M. Kuball, Contactless thermal boundary resistance measurement of GaN-on-diamond wafers, *IEEE Electron Device Letters* 35 (10) (2014) 1007–1009. doi:10.1109/LED.2014.2350075.
- [18] K. Shenai, R. S. Scott, B. J. Baliga, Optimum semiconductors for high-power electronics, *IEEE Transactions on Electron Devices* 36 (9) (1989) 1811–1823. doi:10.1109/16.34247.
- [19] F. Schwierz, An electron mobility model for wurtzite GaN, *Solid-State Electronics* 49 (6) (2005) 889–895. doi:10.1016/j.sse.2005.03.006.
- [20] Y. Jannot, C. Moyne, Transferts thermiques, EdiLivres (2016) 298.
- [21] L. Baczkowski, Modélisation et Caractérisation Thermique de Transistors de Puissance Hyperfréquence GaN et Conséquences sur la Fiabilité de Modules Radars d'Émission/Réception en Bande X, Thèse de doctorat, Université de Lille (2015).
- [22] L. Baczkowski, J. C. Jacquet, O. Jardel, C. Gaquiere, M. Moreau, D. Carisetti, L. Brunel, F. Vouzelaud, Temperature measurements in RF operating conditions of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs using IR microscopy and Raman spectroscopy, *European Microwave Week 2015* : 5 (2015) 152–155. doi:10.1109/EuMIC.2015.7345091.
- [23] I. Nifa, C. Leroux, A. Torres, M. Charles, D. Blachier, G. Reibold, G. Ghibaudo, E. Bano, Characterization of 2DEG in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructure by Hall effect, *Microelectronic Engineering* 178 (2017) 128–131. doi:10.1016/j.mee.2017.05.009.  
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2017.05.009>
- [24] A. Amar, B. Radi, A. El Hami, La modélisation thermique de transistor à haute puissance de type HEMT, *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques* 3 (2019) (2019) 1–7. doi:10.21494/iste.op.2019.0431.

- [25] M. A. Alim, S. Afrin, A. A. Rezazadeh, C. Gaquiere, Thermal response and correlation between mobility and kink effect in GaN HEMTs, *Microelectronic Engineering* 219 (April 2019) (2020).
- [26] D. Kara, N. Donmezer, T. F. Canan, O. Sen, E. Ozbay, Effects of field plate on the maximum temperature and temperature distribution for gan HEMT devices, Vol. 1, ASME International, 2016, p. V001T04A003. [doi:10.1115/HT2016-7367](https://doi.org/10.1115/HT2016-7367).
- [27] T.-S. Kang, Reliability study of AlGaN / GaN high electron mobility transistor by thermal simulation and sub-bandgap optical pumping, Ph.D. thesis, University of Florida (2015).
- [28] A. J. Tzou, D. H. Hsieh, S. H. Chen, Z. Y. Li, C. Y. Chang, H. C. Kuo, [Non-thermal alloyed ohmic contact process of GaN-based HEMTs by pulsed laser annealing](#), *Semiconductor Science and Technology* 31 (5) (2016) 0. [doi:10.1088/0268-1242/31/5/055003](https://doi.org/10.1088/0268-1242/31/5/055003).  
URL <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/31/5/055003>
- [29] S. Cheng, P. C. Chou, Novel packaging design for high-power GaN-on-Si high electron mobility transistors (HEMTs), *International Journal of Thermal Sciences* 66 (2013) 63–70. [doi:10.1016/j.ijthermalsci.2012.10.003](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.10.003).
- [30] X. Tang, Optimisation théorique et expérimentale de composants hyperfréquences de la filière nitrure de gallium à partir d'études physico-thermiques et électriques, Thèse de doctorat., Université des sciences et technologies de Lille 1 (2010).
- [31] F. M. Amine, Modélisation numérique des effets thermiques des effets thermiques dans le transistor HEMT en technologie GaN, Thèse de doctorat., Université de Tlemcen (2013).
- [32] H. Kim, R. M. Thompson, V. Tilak, T. R. Prunty, J. R. Shealy, L. F. Eastman, Effects of SiN passivation and high-electric field on AlGaIn-GaN HFET degradation, *IEEE Electron Device Letters* 24 (7) (2003) 421–423. [doi:10.1109/LED.2003.813375](https://doi.org/10.1109/LED.2003.813375).
- [33] F. Medjdoub, J. F. Carlin, C. Gaquiere, N. Grandjean, E. Kohn, Status of the Emerging InAlN/GaN Power HEMT Technology, *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal* 2 (1) (2008) 1–7. [doi:10.2174/1874129000802010001](https://doi.org/10.2174/1874129000802010001).
- [34] J. Lehmann, Caractérisation électrique d' hétérostructures AlGaIn / GaN pour des applications de puissance, Thèse de doctorat., Université Grenoble Alpes (2015).
- [35] O. Ambacher, J. Smart, J. Shealy, N. Weimann, K. Chu, M. Murphy, W. Schaff, L. Eastman, R. Dimitrov, L. Wittmer, et al., Two-dimensional electron gases induced by spontaneous and piezoelectric polarization charges in n-and ga-face algan/gan heterostructures, *Journal of applied physics* 85 (6) (1999) 3222–3233.
- [36] S. d. Meyer, Etude d'une nouvelle filière de composants HEMTs sur technologie nitrure de gallium : Conception d'une architecture flip-chip d'amplificateur distribué de puissance à très large bande, Thèse de doctorat., Université de Limoges (2005).
- [37] D. Y. Jeon, D. K. Kim, S. J. Park, Y. Koh, C. Y. Cho, G. T. Kim, K. H. Park, [Effects of series resistance and interface properties on the operation of AlGaIn/GaN high electron](#)



- mobility transistors, *Microelectronic Engineering* 199 (2018) 40–44. doi:10.1016/j.mee.2018.07.010.  
URL <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.07.010>
- [38] J.-G. Tartarin, La technologie GaN et ses applications pour l'électronique robuste, haute fréquence et de puissance, hal.archives-ouvertes.fr (2008).
- [39] A. Wang, Thermal, stress, and traps effects in AlGaIn/GaN HEMTs, Thèse de doctorat., ETSI Telecomunicación (UPM) (2014).
- [40] A. Sarua, H. Ji, K. Hilton, D. Wallis, M. J. Uren, T. Martin, M. Kuball, Thermal boundary resistance between GaN and substrate in AlGaIn/GaN electronic devices, *IEEE Transactions on electron devices* 54 (12) (2007) 3152–3158.
- [41] G. Meneghesso, G. Verzellesi, F. Danesin, F. Rampazzo, F. Zanon, A. Tazzoli, M. Meneghini, E. Zanoni, Reliability of GaN high-electron-mobility transistors : State of the art and perspectives, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 8 (2) (2008) 332–343.
- [42] L. Brunel, Contribution à l'assurance fiabilité de filières HEMTs à base de GaN sur substrat SiC : caractérisation électrique approfondie et modélisation des effets parasites, Thèse de doctorat., Université de Bordeaux (2014).
- [43] G. Meneghesso, A. Paccagnella, Y. Haddab, C. Canali, E. Zanoni, Evidence of interface trap creation by hot-electrons in AlGaAs/GaAs high electron mobility transistors, *Applied Physics Letters* 69 (10) (1996) 1411–1413. doi:10.1063/1.117598.
- [44] G. Meneghesso, G. Verzellesi, R. Pierobon, F. Rampazzo, A. Chini, U. K. Mishra, C. Canali, A. Member, E. Zanoni, S. Member, Meneghesso et al. - 2004 - Surface-Related Drain Current Dispersion Effects in AlGaIn–GaN HEMTs.pdf 51 (10) (2004) 1554–1561.
- [45] P. Valizadeh, High-temperature very low frequency noise-based investigation of slow transients in AlGaIn/GaN MODFETs, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* 8 (2) (2008) 265–271. doi:10.1109/TDMR.2008.916302.
- [46] D. Marcon, J. Viaene, P. Favia, H. Bender, X. Kang, S. Lenci, S. Stoffels, S. Decoutere, Reliability of AlGaIn/GaN HEMTs : Permanent leakage current increase and output current drop, *Proceedings of the International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, IPFA* (2013) 249–254doi:10.1109/IPFA.2013.6599162.
- [47] U. Chowdhury, J. L. Jimenez, C. Lee, E. Beam, P. Saunier, T. Balistreri, S. Y. Park, T. Lee, J. Wang, M. J. Kim, J. Joh, J. A. del Alamo, TEM observation of crack- and pit-shaped defects in electrically degraded GaN HEMTs, *IEEE Electron Device Letters* 29 (10) (2008) 1098–1100. doi:10.1109/LED.2008.2003073.
- [48] S. S. Sajjadi Jaghargh, A. A. Orouji, An AlGaIn/GaN HEMT by a reversed pyramidal channel layer : Investigation and fundamental physics, *International Journal of Numerical Modelling : Electronic Networks, Devices and Fields* (December 2019) (2020) 13–18. doi:10.1002/jnm.2719.

- [49] S. García, I. Níguez-De-La-Torre, J. Mateos, T. González, S. Pérez, Impact of substrate and thermal boundary resistance on the performance of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs analyzed by means of electro-thermal Monte Carlo simulations, *Semiconductor Science and Technology* 31 (6) (2016). doi:10.1088/0268-1242/31/6/065005.
- [50] A. Sengupta, A. Islam, *Comparative analysis of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistor with sapphire and 4H-SiC substrate*, *Microsystem Technologies* 25 (5) (2019) 1927–1935. doi:10.1007/s00542-018-3903-5.  
URL <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3903-5>
- [51] Y. Dong, Z. Xie, D. Chen, H. Lu, R. Zhang, Y. Zheng, Effects of dissipative substrate on the performances of enhancement mode AlInN/Ga<sub>N</sub> HEMTs, *International Journal of Numerical Modelling : Electronic Networks, Devices and Fields* 32 (1) (2019) 1–9. doi:10.1002/jnm.2482.
- [52] J. P. Jones, E. Heller, D. Dorsey, S. Graham, *Transient stress characterization of Al-GaN/GaN HEMTs due to electrical and thermal effects*, *Microelectronics Reliability* 55 (12) (2015) 2634–2639. doi:10.1016/j.microrel.2015.08.019.  
URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2015.08.019>
- [53] S. Shamsir, F. Garcia, S. K. Islam, Modeling of enhancement-mode Ga<sub>N</sub>-GIT for high-power and high-temperature application, *IEEE Transactions on Electron Devices* 67 (2) (2020) 588–594.
- [54] Y. Chen, Temperature-dependent small signal performance of.pdf, *Int J Numer Model.* 2019;e2620 (2019).
- [55] C. Dundar, N. Donmezer, Thermal characterization of field plated AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs, *InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2019-May* (2019) 755–760. doi:10.1109/ITHERM.2019.8757323.
- [56] A. Chvála, R. Szobolovszký, J. Kováč, M. Florovic, J. Marek, L. Cernaj, D. Donoval, C. Dua, S. L. Delage, J. C. Jacquet, Advanced characterization techniques and analysis of thermal properties of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Multifinger Power HEMTs on SiC substrate supported by three-dimensional simulation, *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME* 141 (3) (2019) 1–7. doi:10.1115/1.4043477.
- [57] M. Florovič, R. Szobolovszký, J. Kováč, J. Kováč, A. Chvála, J. C. Jacquet, S. L. Delage, Rigorous channel temperature analysis verified for InAlN/AlN/Ga<sub>N</sub> HEMT, *Semiconductor Science and Technology* 34 (6) (2019). doi:10.1088/1361-6641/ab1737.
- [58] B. Chatterjee, C. Dundar, T. E. Beechem, E. Heller, D. Kendig, H. Kim, N. Donmezer, S. Choi, Nanoscale electro-thermal interactions in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors, *Journal of Applied Physics* 127 (4) (2020). doi:10.1063/1.5123726.
- [59] L. Arivazhagan, D. Nirmal, J. Ajayan, D. Godfrey, J. S. Rakkumar, S. Bhagya Lakshmi, Modeling of self-heating for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT with thermal conductivity degradation effect, *AIP Conference Proceedings* 2201 (December) (2019). doi:10.1063/1.5141434.

- [60] K. R. Bagnall, E. A. Moore, S. C. Badescu, L. Zhang, E. N. Wang, Simultaneous measurement of temperature, stress, and electric field in GaN HEMTs with micro-Raman spectroscopy, *Review of Scientific Instruments* 88 (11) (2017). doi:10.1063/1.5010225.
- [61] M. A. D. Maur, A. D. Carlo, AlGa<sub>N</sub> / GaN HEMT Degradation : An Electro-Thermo-Mechanical Simulation, *IEEE Transactions on Electron Devices* 60 (10) (2013) 3142–3148.
- [62] T. M. Wagner, A very short introduction to the Finite Element Method (1908) (2004) 1–14.
- [63] COMSOL, [Introduction to LiveLink for MATLAB](#) (2013) 1–54.  
URL [papers3://publication/uuid/DF714157-4EF7-4915-AED5-F17A8FE4A259](https://papers3://publication/uuid/DF714157-4EF7-4915-AED5-F17A8FE4A259)
- [64] A. A. Wilson, Kapitza Resistance at the Two-Dimensional Electron Gas Interface, 18th IEEE ITherm Conference 1–6.
- [65] A. Makhloufi, A. EL Hami, Modélisation électro-thermomécanique de système mécatroniques, in : *Les systèmes mécatroniques embarqués 2 - analyse des causes de défaillances, modélisation, simulation et optimisation*, 2015.
- [66] J. Zou, D. Kotchetkov, A. A. Balandin, D. I. Florescu, F. H. Pollak, Thermal conductivity of GaN films : Effects of impurities and dislocations, *Journal of Applied Physics* 92 (5) (2002) 2534–2539. doi:10.1063/1.1497704.
- [67] R. S. Pengelly, S. M. Wood, J. W. Milligan, S. T. Sheppard, W. L. Pribble, *101A\_Review\_of\_GaN\_on\_SiC\_HEMTs\_and\_MMICs.pdf* 60 (6) (2012).
- [68] J. Jacquet, R. Aubry, H. Gérard, E. Delos, N. Rolland, Y. Cordier, A. Bussutil, M. Rousseau, S. Delage, Analytical transport model of AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMT based on electrical and thermal measurement (2004).
- [69] Lorin E. Stevens, Thermo-Piezo-Electro-Mechanical Simulation of AlGa<sub>N</sub> (Aluminum Gallium Nitride) / GaN (Gallium Nitride) High Electron Mobility Transistor, Ph.D. thesis, Utah State University (2013).
- [70] J. Das, H. Oprins, H. Ji, A. Sarua, W. Ruythooren, J. Derluyn, M. Germain, G. Borghs, a Temperature Analysis of High-Power Algan / Gan Hemts, Dans *Proceedings of 12th International Workshop on Thermal investigations of ICs - THERMINIC 2006* (2006) 2–5.
- [71] Y. Jia, Y. Xu, Y. Guo, A Universal Scalable Thermal Resistance Model for Compact Large-Signal Model of AlGa<sub>N</sub>/GaN HEMTs, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 66 (10) (2018) 4419–4429. doi:10.1109/TMTT.2018.2854185.
- [72] H. Belmabrouk, B. Chouchen, E. M. Feddi, F. Dujardin, I. Tlili, M. Ben Ayed, M. H. Gazzah, [Modeling the simultaneous effects of thermal and polarization in InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> based high electron mobility transistors](#), *Optik* (2019) 163883 doi:10.1016/j.ijleo.2019.163883.  
URL <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163883>

- [73] U. Radhakrishna, *Physics-based III-Nitride device modeling*, 1st Edition, Vol. 102, Elsevier Inc., 2019. doi:10.1016/bs.semsem.2019.08.002.  
URL <http://dx.doi.org/10.1016/bs.semsem.2019.08.002>
- [74] M. G. Ancona, S. C. Binari, D. J. Meyer, Fully coupled thermoelectromechanical analysis of GaN high electron mobility transistor degradation, *Journal of Applied Physics* 111 (7) (2012) 0–16. doi:10.1063/1.3698492.
- [75] J. P. Jones, M. R. Rosenberger, W. P. King, R. Vetury, E. Heller, D. Dorsey, S. Graham, Electro-thermo-mechanical transient modeling of stress development in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors (HEMTs), *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference* (2014) 959–965doi:10.1109/ITHERM.2014.6892385.
- [76] L. Wang, J. Liu, W. Zhou, Z. Xu, Y. Wu, H. Tao, A novel method to dynamic thermal impedance and channel temperature extraction of GaN HEMTs, *International Journal of Numerical Modelling : Electronic Networks, Devices and Fields* (October 2018) (2019) 1–9. doi:10.1002/jnm.2599.
- [77] N. Hansen, *The CMA Evolution Strategy : A Tutorial* arXiv : 1604 . 00772v1 [ cs . LG ] 4 Apr 2016 (2016). arXiv:arXiv:1604.00772v1.
- [78] H. Hamdani, B. Radi, A. El Hami, Optimization of solder joints in embedded mechatronic systems via Kriging-assisted CMA-ES algorithm, *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization* 10 (2019) A3. doi:10.1051/smdo/2019002.
- [79] C. Huang, B. Radi, A. E. Hami, Uncertainty analysis of deep drawing using surrogate model based probabilistic method, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86 (9-12) (2016) 3229–3240. doi:10.1007/s00170-016-8436-4.
- [80] C. Huang, A. El Hami, B. Radi, Metamodel-based inverse method for parameter identification : elastic–plastic damage model, *Engineering Optimization* 49 (4) (2017) 633–653. doi:10.1080/0305215X.2016.1206537.
- [81] A. El Hami, B. Radi, *Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures*, Lavoisier, Paris, 2013.
- [82] A. El Hami, B. Radi, *Uncertainty and Optimization in Structural Mechanics* Abdelkhalak El Hami, 2013.
- [83] E. Roux, *Assemblage Mécanique : Stratégies d ’ optimisation des procédés et d ’ identification des comportements mécaniques des matériaux*, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux (2011).
- [84] H. Hamdani, B. Radi, A. El Hami, Metamodel assisted evolution strategies for global optimization of solder joints reliability in embedded mechatronic devices, *Microsystem Technologies* 25 (10) (2019) 3801–3812. doi:10.1007/s00542-019-04520-1.
- [85] U. Andral, *Algorithme d’évolution pour laser à fibre optique en régime d’impulsions courtes*, Thèse de doctorat., Université de Bourgogne Franche-Comté (2016).

- [86] S. Rouchier, M. Woloszyn, Identification des propriétés hygrothermiques des matériaux par stratégie d'évolution CMA, in : IBPSA France 2014 conference, 2014.
- [87] O. A. Elhara, Stochastic black-box optimization and benchmarking in large dimensions, Ph.D. thesis, Université Paris Saclay (COmUE) (2017).
- [88] C. Huang, B. Radi, A. El Hami, H. Bai, CMA evolution strategy assisted by kriging model and approximate ranking, *Applied Intelligence* 48 (11) (2018) 4288–4304. doi:[10.1007/s10489-018-1193-3](https://doi.org/10.1007/s10489-018-1193-3).
- [89] A. Abdelhamid, H. Hamid, R. Bouchaïb, E. H. Abdelkhalak, Optimisation thermique du transistor à haute mobilité d'électron (HEMT) par la méthode CMA-ES, *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques* 4 (2) (2020) 10–21.
- [90] E. Benhamou, J. Atif, R. Laraki, A discrete version of cma-es, Available at SSRN 3307212 (2018).
- [91] K. Dammak, Prise en compte des incertitudes des problèmes en vibro-acoustiques (ou interaction fluide-structure), Thèse de doctorat, Université de Normandie (2018).
- [92] H. Hamdani, B. Radi, A. El Hami, Probabilistic methodology for reliability assessment of electronic packages, *MATEC Web of Conferences* 286 (2019) 02002. doi:[10.1051/mateconf/201928602002](https://doi.org/10.1051/mateconf/201928602002).
- [93] A. Amar, B. Radi, A. El Hami, Optimization based on electro-thermo-mechanical modeling of the high electron mobility transistor (HEMT), *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization* (2021).
- [94] X. Tan, Y. Lv, X. Zhou, X. Song, Y. Wang, G. Gu, H. Guo, S. Liang, Z. Feng, S. Cai, High performance AlGaN/GaN pressure sensor with a Wheatstone bridge circuit, *Microelectronic Engineering* 219 (August 2019) (2020) 111–143.
- [95] M. A. Alim, M. M. Ali, A. A. Rezazadeh, C. Gaquiere, Thermal response for intermodulation distortion components of GaN HEMT for low and high frequency applications, *Microelectronic Engineering* 209 (October 2018) (2019) 53–59.
- [96] Z. Liao, C. Guo, J. Meng, B. Jiang, L. Gao, Y. Su, R. Wang, S. Feng, Thermal evaluation of GaN-based HEMTs with various layer sizes and structural parameters using finite-element thermal simulation, *Microelectronics Reliability* 74 (2017) 52–57.
- [97] R. El Maani, A. Makhloufi, B. Radi, A. El Hami, Reliability-based design optimization with frequency constraints using a new safest point approach, *Engineering Optimization* 50 (10) (2018) 1715–1732. doi:[10.1080/0305215X.2017.1416109](https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1416109).
- [98] O. Bendaou, M. Agouzoul, A. El Hami, O. Bendaou, Reliability based design optimization of BGA electronic packages using the kriging substitution model, *International Journal of Applied Engineering Research* 12 (13) (2017) 3757–3766.
- [99] O. Bendaou, Caractérisation thermomécanique, modélisation et optimisation fiabiliste des packages électroniques, Thèse de doctorat, Université de Normandie (2017).

- [100] A. El Hami, B. Radi, Comparison study of different Reliability-Based Design Optimization approaches, *Advanced Materials Research* 274 (2011) 113–121. [doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.274.113](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.274.113).
- [101] A. El Hami, B. Radi, M. Sbaa, Analysis of the Dynamic Contact Inside the Piezoelectric Motor Using RBDO, *Applied Mathematical Sciences* 2 (42) (2008) 2047–2062.
- [102] B. Radi, A. El Hami, Reliability analysis of a vibro-acoustique system : Application to a marine propeller, *Springer Proceedings in Physics* 168 (2015) 393–416. [doi:10.1007/978-3-319-19851-4\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19851-4_19).
- [103] K. Dammak, A. Yaich, A. El Hami, L. Walha, M. Haddar, An efficient optimization based on the robust hybrid method for the coupled acoustic–structural system, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 27 (21) (2020) 1816–1826. [doi:10.1080/15376494.2018.1525629](https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1525629).
- [104] H. Hamdani, A. El Hami, B. Radi, Reliability analysis of tape based chip-scale packages based metamodel, *Microelectronics Reliability* 102 (August) (2019).
- [105] A. El Hami, B. Radi, A. Cherouat, Reliability-based design optimization analysis of tube hydroforming process, *Simulation* 88 (9) (2012) 1129–1137. [doi:10.1177/0037549712441986](https://doi.org/10.1177/0037549712441986).
- [106] A. Amar, B. Radi, A. E. Hami, Electrothermal Reliability of the High Electron Mobility Transistor (HEMT), *Applied Sciences* 11 (22) (2021) 10720.
- [107] J. Holman, *Heat Transfer Tenth Edition*, Elsevier, 2010. [doi:10.1016/b978-1-933762-24-1.50019-x](https://doi.org/10.1016/b978-1-933762-24-1.50019-x).
- [108] O. Jardel, J.-C. Jacquet, L. Baczkowski, D. Carisetti, D. Lancereau, M. Olivier, R. Aubry, M.-A. di Forte Poisson, C. Dua, S. Piotrowicz, S. L. Delage, InAlN/GaN HEMTs based L-band high-power packaged amplifiers, *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* 6 (6) (2014) 565–572. [doi:10.1017/s175907871400004x](https://doi.org/10.1017/s175907871400004x).