



convertisseur
d'énergie
Intégré
Intelligent

Intégration des convertisseurs GaN et montée en fréquence

Nadir IDIR

Université de Lille, L2EP
(Responsable tâche 1)

Les rencontres
de la Recherche
& de l'Innovation



Événement animé par



Initié et
financé par



Cofinancé par



Ce projet est cofinancé par l'Union européenne avec le Fonds européen de développement régional



1. **Etat de l'art sur l'intégration des convertisseurs dans les moteurs**
2. **Domaines d'application et verrous technologiques**
3. **Objectifs de la tâche 1 « Convertisseur statique à haut rendement »**
4. **Etude et réalisation d'un convertisseur haute fréquence**
 - 4.1 Choix de la technologie des composants de puissance
 - 4.2 Détermination des inductances parasites du PCB
 - 4.3 Conception et réalisation d'un bras d'onduleur
 - 4.5 Validation expérimentale
5. **Conception de l'onduleur intégré**

Variateur de vitesse classique

- Faible densité de puissance
- Deux systèmes de refroidissement
- Nécessite un gros filtre CEM
- Prix plus élevé (+ câble)
- + Plus fiable (conditions d'utilisation)



Variateur de vitesse classique [1]

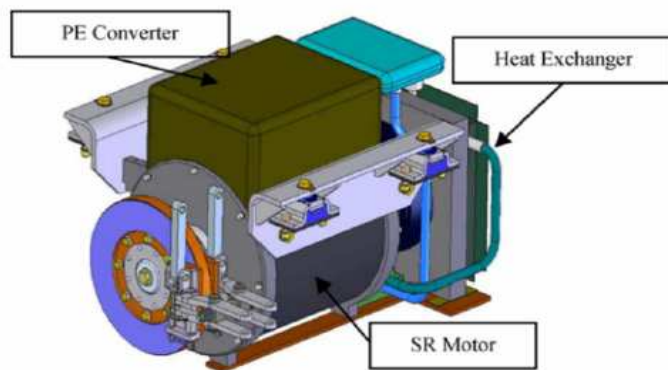
Variateur de vitesse Intégré

- + Forte densité de puissance
- + Un seul système de refroidissement
- + Nécessite un filtre CEM plus petit
- + Réduction des durées de mise en service
- + Amélioration du rendement (efficacité énergétique)
- + Prix plus faible (- Câble)
- Problèmes thermiques (Convertisseur et moteur)
- Protection des enroulements du moteur contre les forts dv/dt
- Problèmes des vibrations du convertisseur



Variateur de vitesse intégré [1]

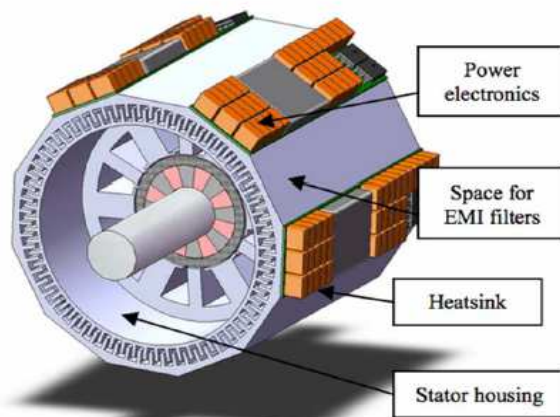
[1] T. M. Jahns and H. Dai, Trans. On Power Electronics and Applications, Vol. 2, N. 3, 9/2017



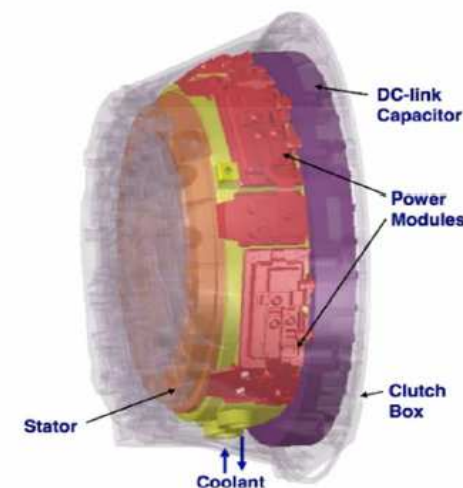
Intégration au-dessus du moteur



Exemple de réalisation



Intégration sur le stator du moteur



Intégration sur le flasque du moteur

[1] : T. M. Jahns and H. Dai, Trans. On Power Electronics and Applications, Vol. 2, N. 3, 9/2017

Domaines d'application

- **Systemes embarqués :**
 - Aéronautique: actionneurs électriques, ...
 - Transports terrestres: trains, véhicules électriques, ...
- **Systemes industriels: motopompes, compresseurs....**
- **Systemes de production d'énergie: éoliennes, ...**

Verrous technologiques et solutions proposées dans le cadre du projet CE2I

- **Augmentation de la densité de puissance et du rendement du convertisseur statique**
 - Montée en fréquence grâce à l'utilisation des composants SiC et GaN (**tâche 1**)
- **Amélioration des systèmes de refroidissement du convertisseur et moteur**
 - Utilisation de matériaux à changement de phase (**tâches 1, 2 et 5**)
- **Protection des enroulements des moteurs contre les forts dv/dt**
 - Utilisation de machines basses tensions (**tâches 1 et 2**)
 - Renforcement de l'isolation diélectrique des enroulements (**tâches 1, 2 et 7**)
- **Détection des défauts du convertisseur (**tâche 1**)**

- L'objectif est de réaliser des convertisseurs de puissance à base de composants semi-conducteurs à grand gap (GaN et SiC) en portant une attention particulière aux critères de l'efficacité énergétique et de la densité de puissance.

- Laboratoires impliqués dans la tâche 1 : **L2EP, URIA, LAMIH, LSEE, IEMN**

- L2EP : S. Vienot, H. Hoffmann, T. Duquesne, L. Pace, A. Videt et N. Idir

- Objectifs des sous tâches:

- T1.1 : Modélisation HF, estimation des pertes :

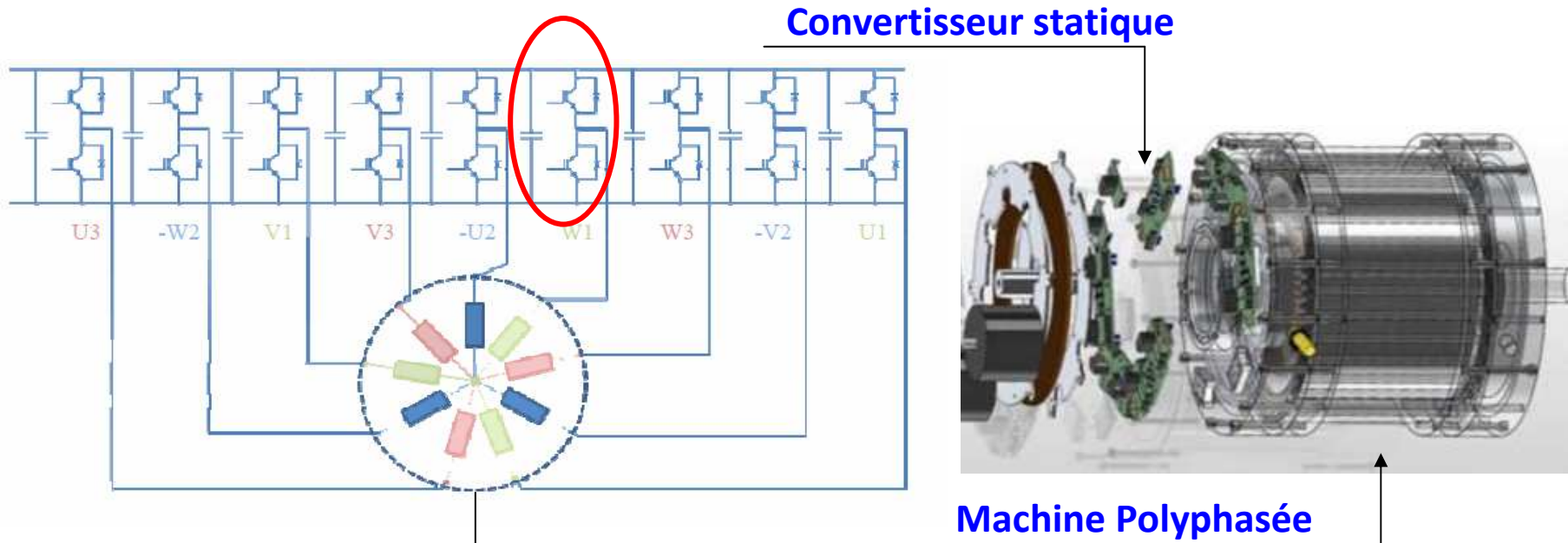
- *Caractérisation et modélisation des composants de puissance (GaN et SiC)*
- *Etude du système de refroidissement des composants de puissance*

- T1.2 : Structures de conversion à composants rapides, faibles pertes :

- *Etude de réalisation du circuit imprimé (PCB) du convertisseur*
- *Diagnostic des défauts des composants des convertisseurs*

- T1.3 : Commande rapprochée

- T1.4 : CEM et filtrage

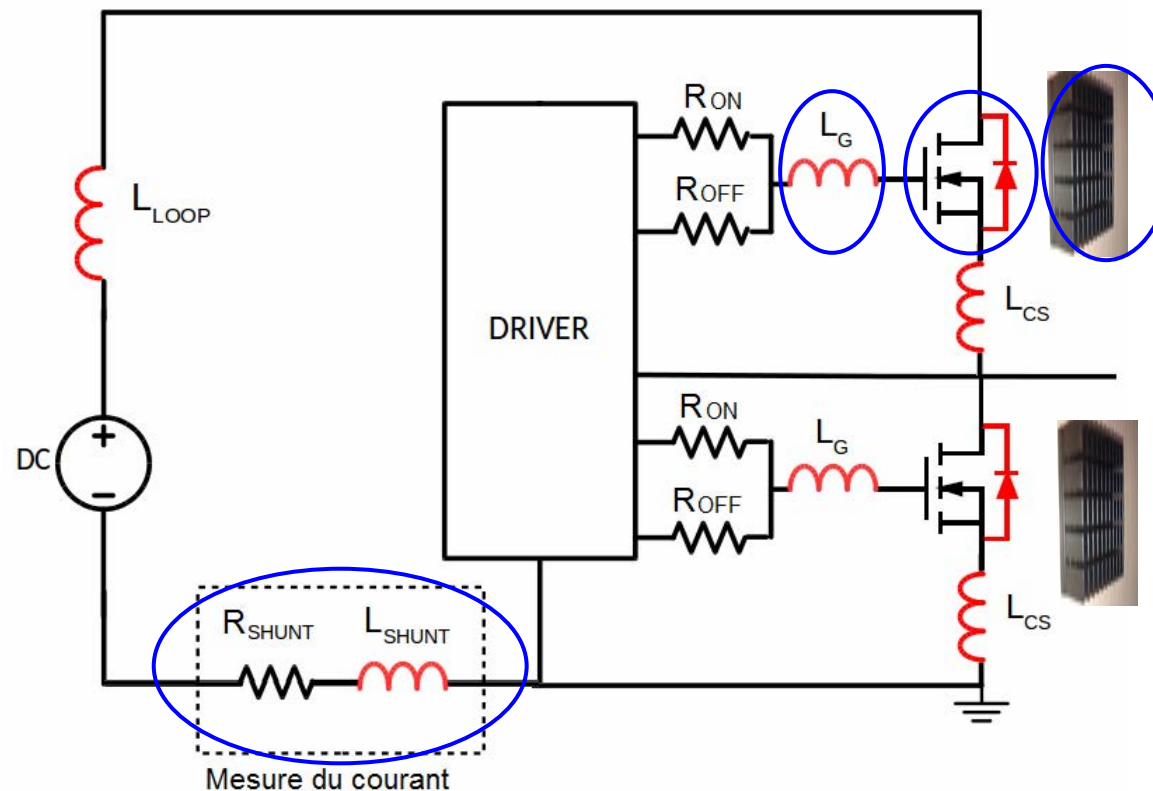


• Cahier des charges du prototype 1:

- La puissance de la machine et du convertisseur : **6 kW**
- Les valeurs des tensions et des courants par bras du convertisseur : **$I = 60A$ et $V = 60V$**
- Nombre de phases : **5**
- Système de refroidissement : Refroidissement forcé par **radiateur + ventilateur**

[3] : <http://www.motorbrain.eu/>

- **Choix des composants de puissance:**
 - Matériaux semi-conducteurs : Si, SiC et GaN
- **Détermination des inductances parasites des différentes boucles du PCB**
- **Dimensionnement des radiateurs**



Choix du composant de puissance



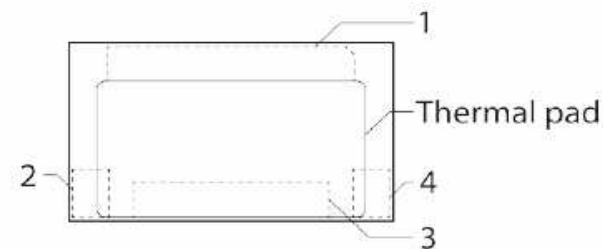
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor

Features

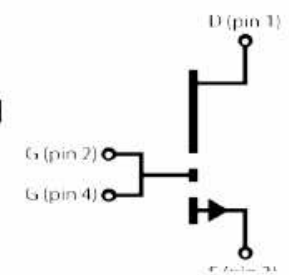
- 100 V enhancement mode power switch
- Top-side cooled configuration
- $R_{DS(on)} = 7 \text{ m}\Omega$
- $I_{DS(max)} = 90 \text{ A}$ (à 25°C)
- Low inductance GaNPX™ package
- Easy gate drive requirements (0 V to 6 V)
- Transient tolerant gate drive (-20 / +10 V)
- Very high switching frequency (> 100 MHz)
- Fast and controllable fall and rise times
- Reverse current capability
- Zero reverse recovery loss
- Small 7.0 x 4.0 mm² PCB footprint
- Dual gate pads for optimal board layout $e = 0.54 \text{ mm}$



Package Outline



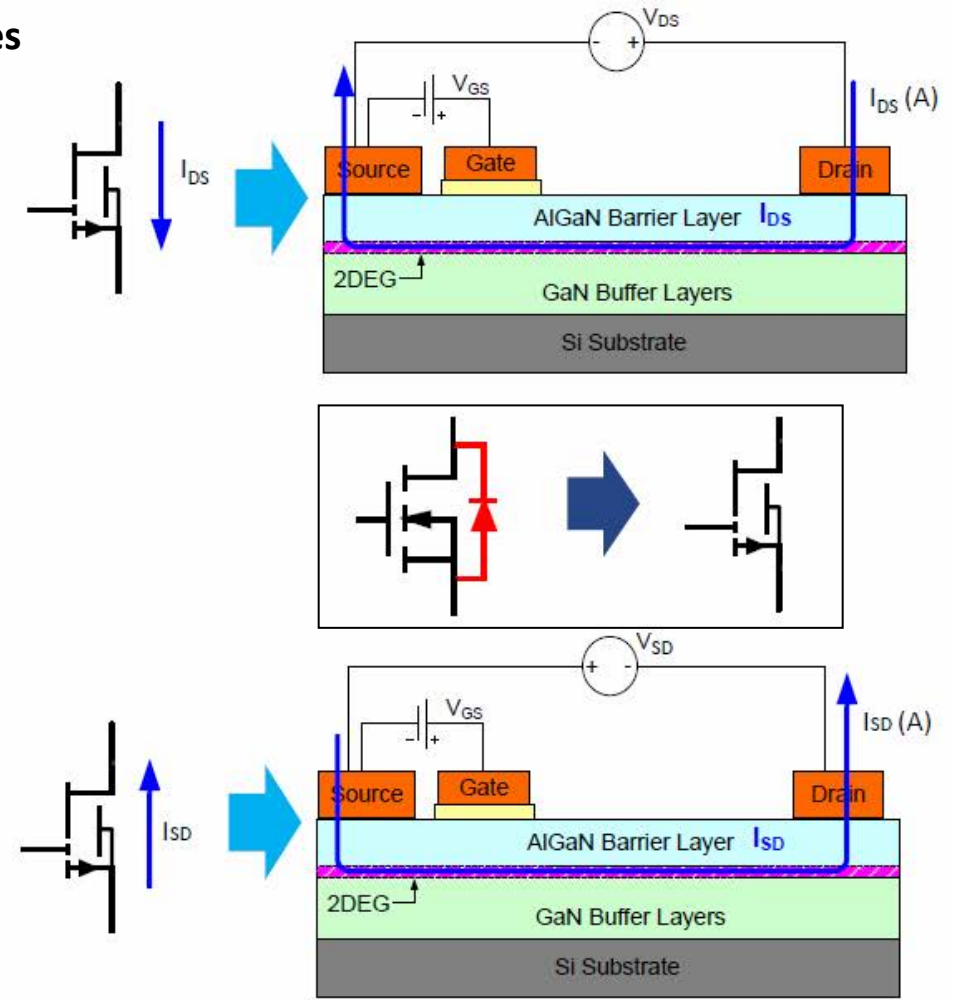
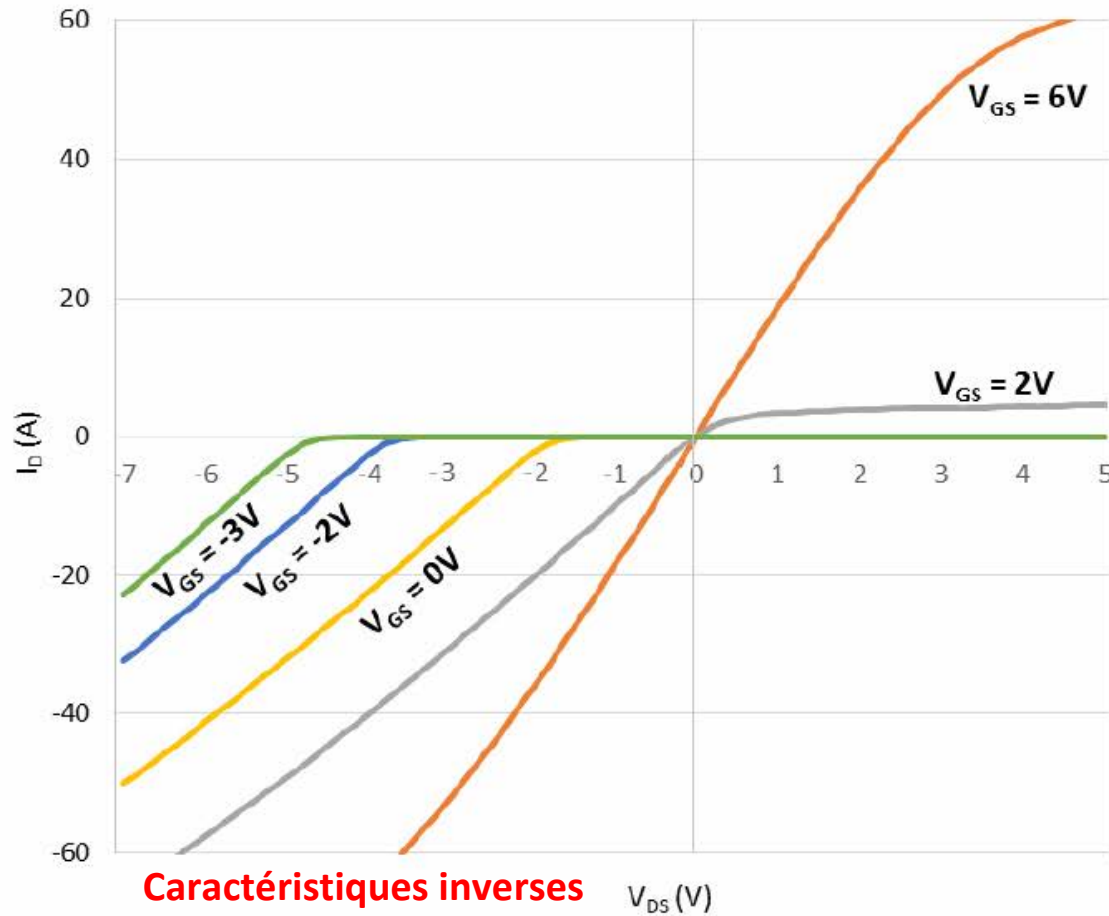
Circuit Symbol



[4] : <https://gansystems.com/>

Caractéristiques directes et inverses du transistor GaN

Caractéristiques directes



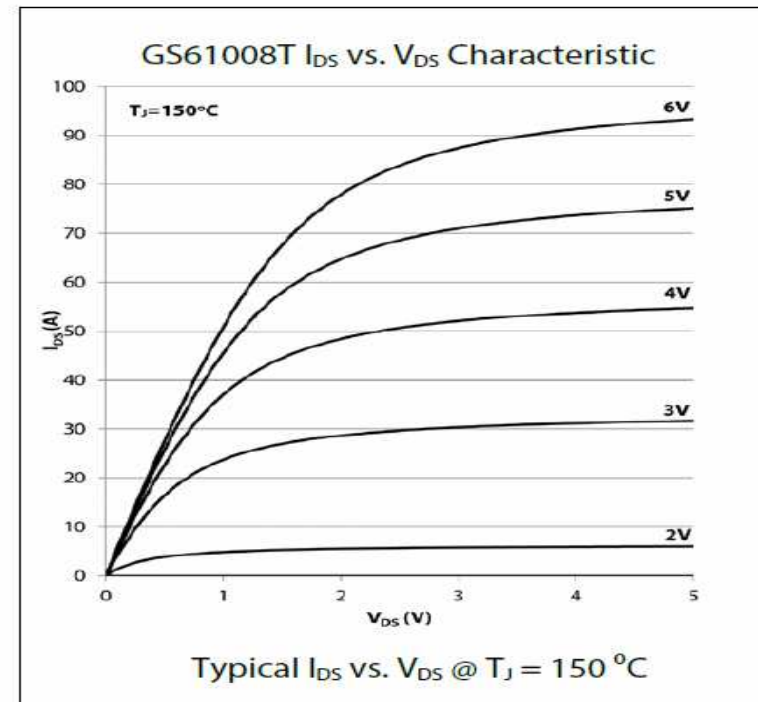
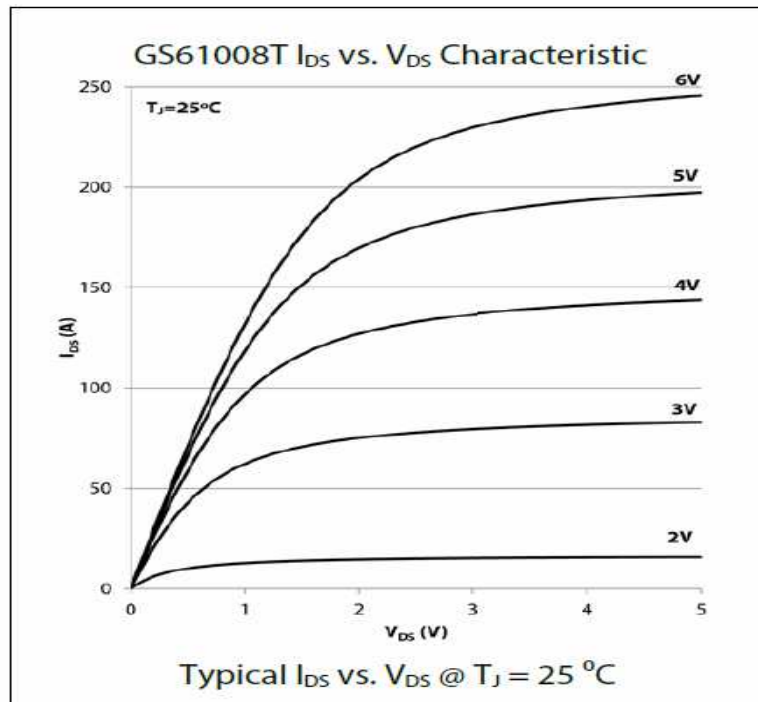
[4] : <https://gansystems.com/>

Caractéristiques de transistor GaN



GS61008T
Top-side cooled 100 V E-mode GaN transistor
Preliminary Datasheet

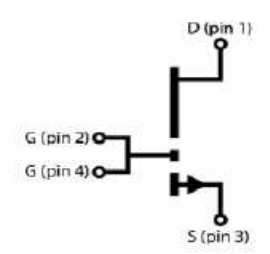
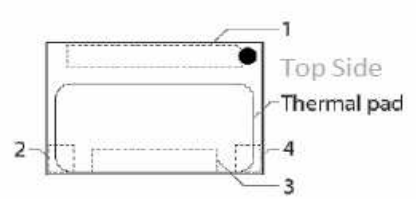
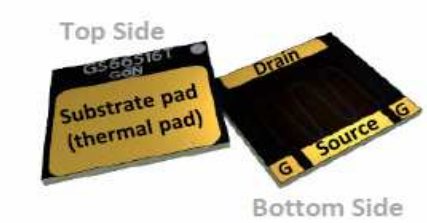
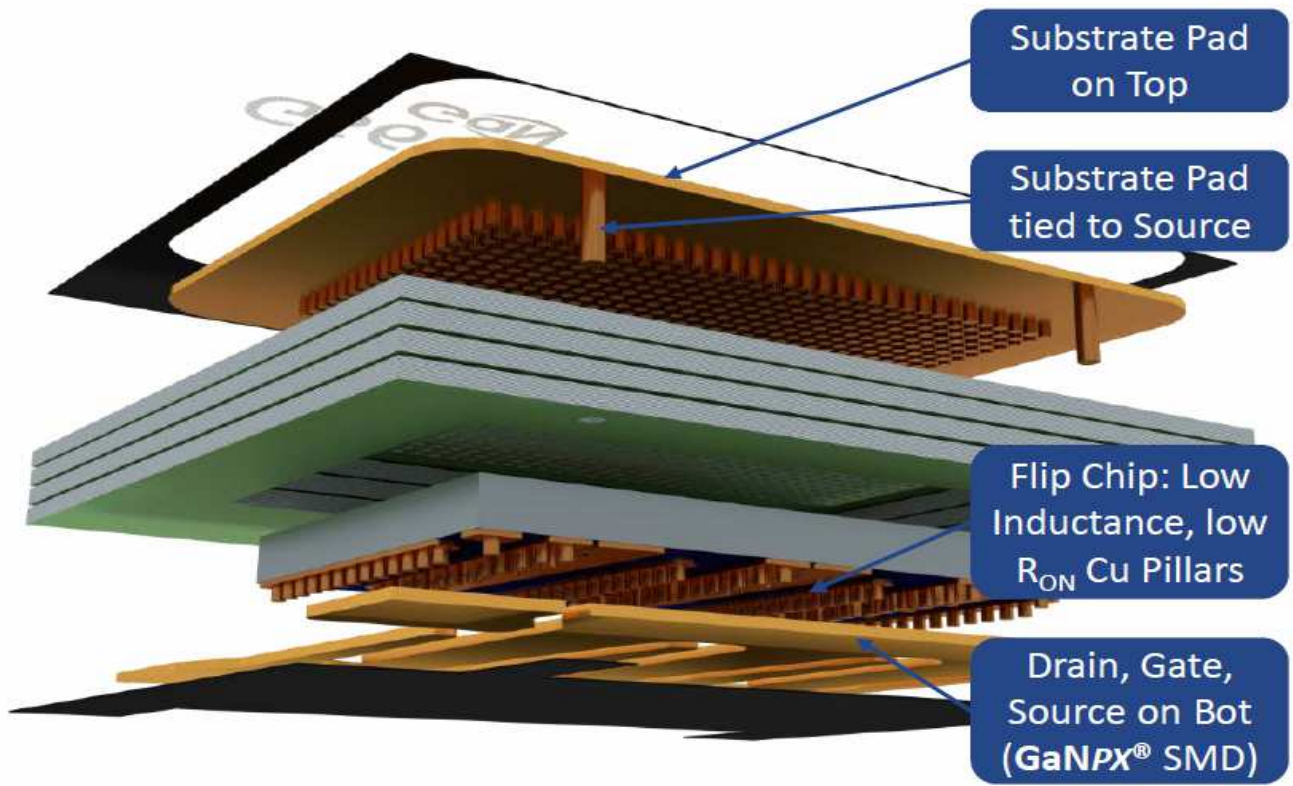
Electrical Performance Graphs



[4] : <https://gansystems.com/>

Boîtier du transistor GaN

GaNPX[®]-T - Embedded Package for Top Side Cooling



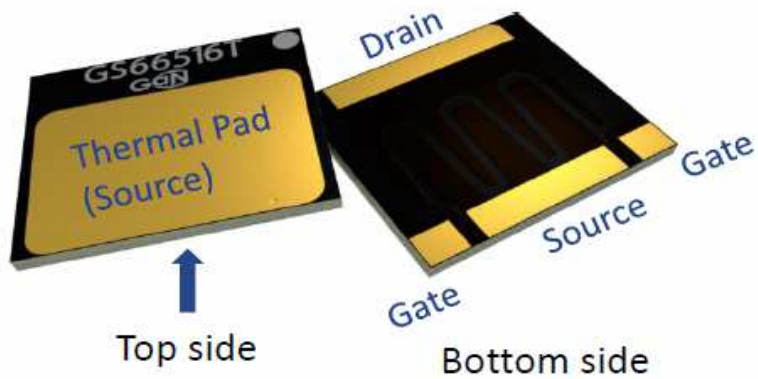
GaNPX[®]-T, optimized for high power applications with Top-Side Heat Sinking

GaN Systems – 3

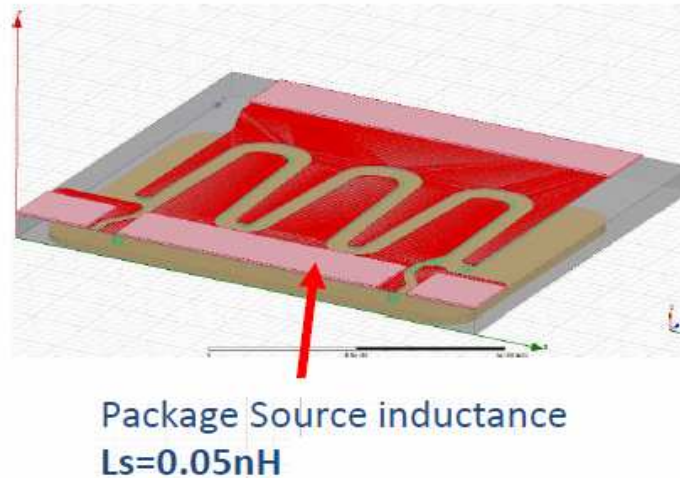
[4] : <https://gansystems.com/>

Inductances parasites d'un transistor GaN systems et d'un MOSFET

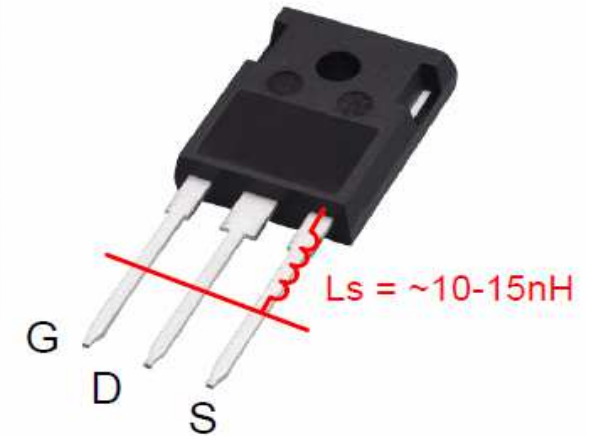
GaN_PX T Package
GS66516T (650V/25mΩ)



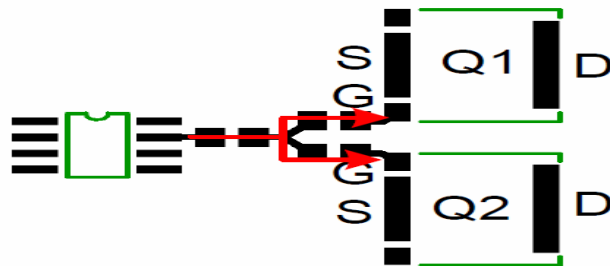
modeling of GS66516T



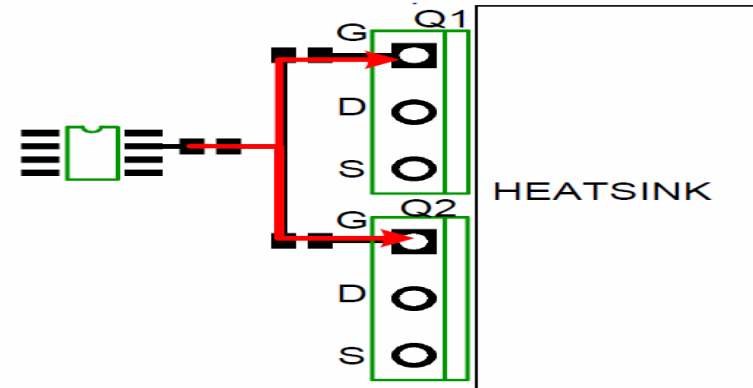
TO-247 Package inductance



2x GS66516T Parallel layout



2x TO-247 Parallel layout



[4] : <https://gansystems.com/>

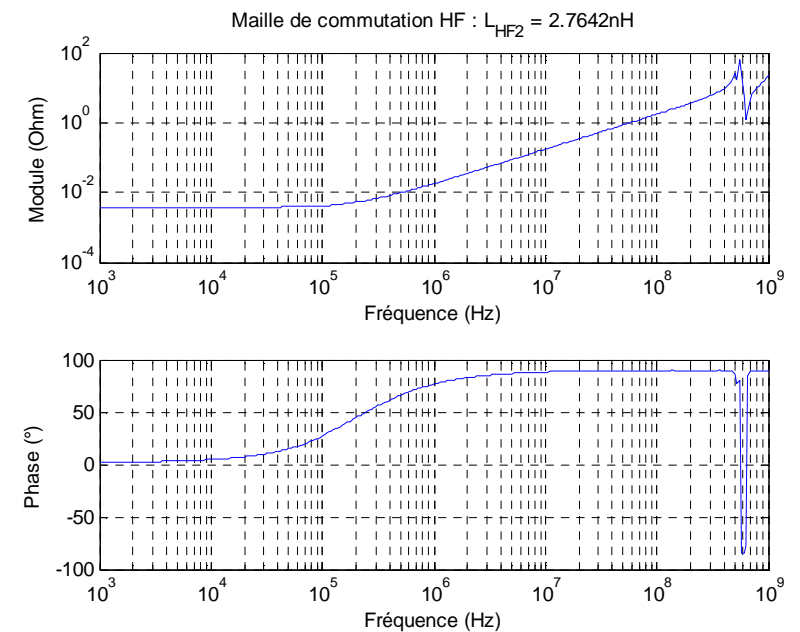
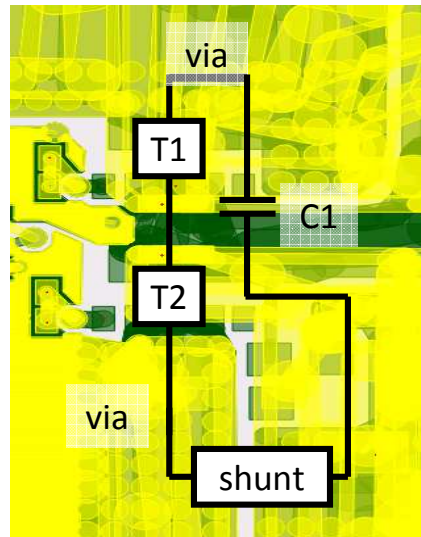
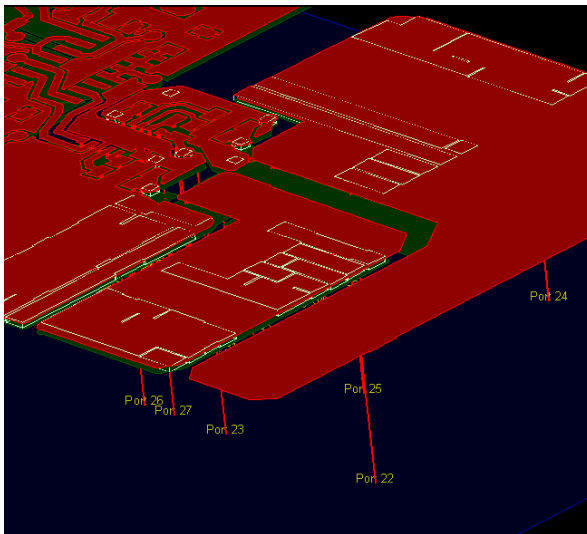
Inductances des mailles à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D

- Importation du design 3D du PCB
- Simulation électromagnétique basée sur une résolution numérique par la méthode des moments

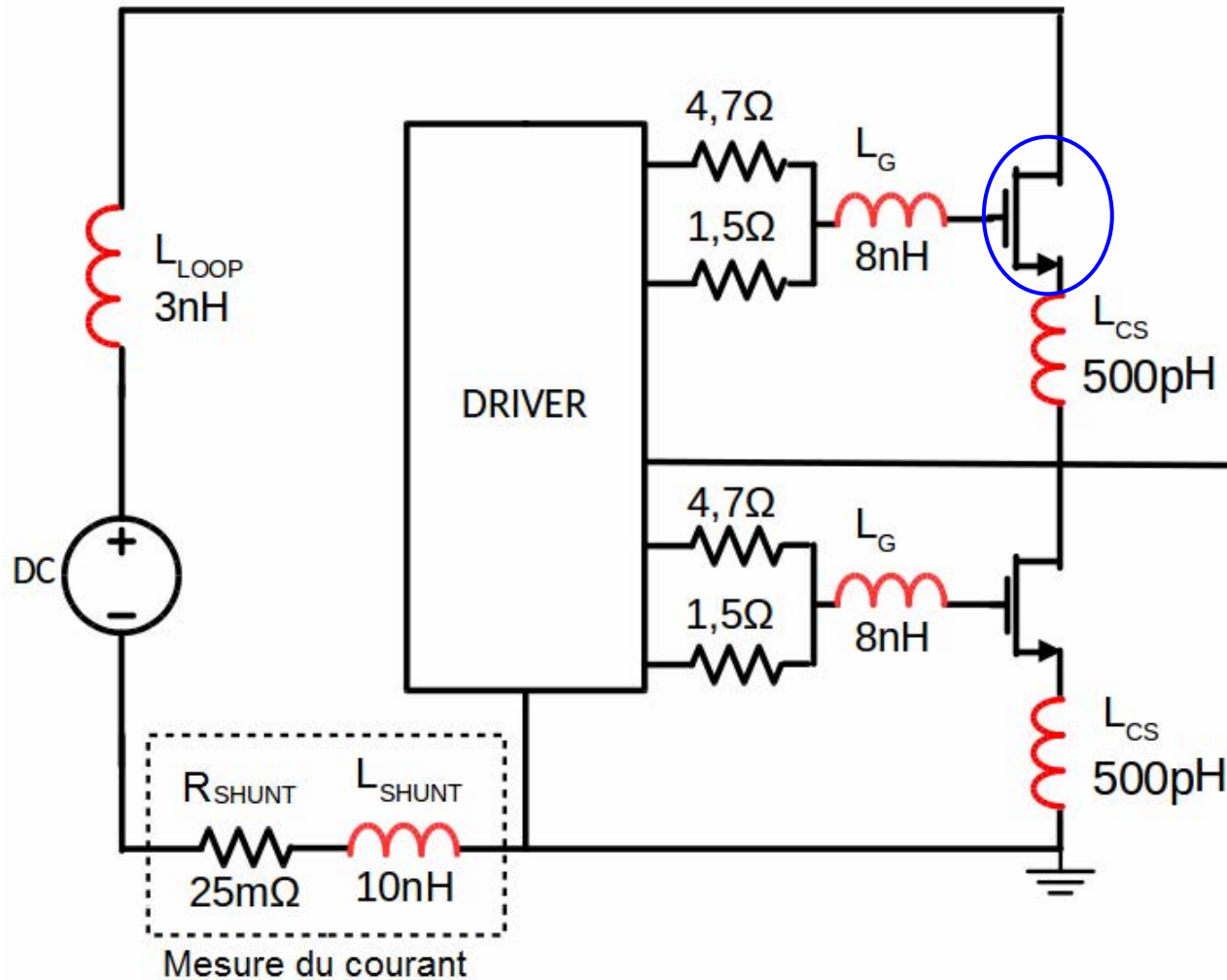
Conception du PCB

Définition des
mailles à simuler

Extraction des valeurs des
inductances parasites

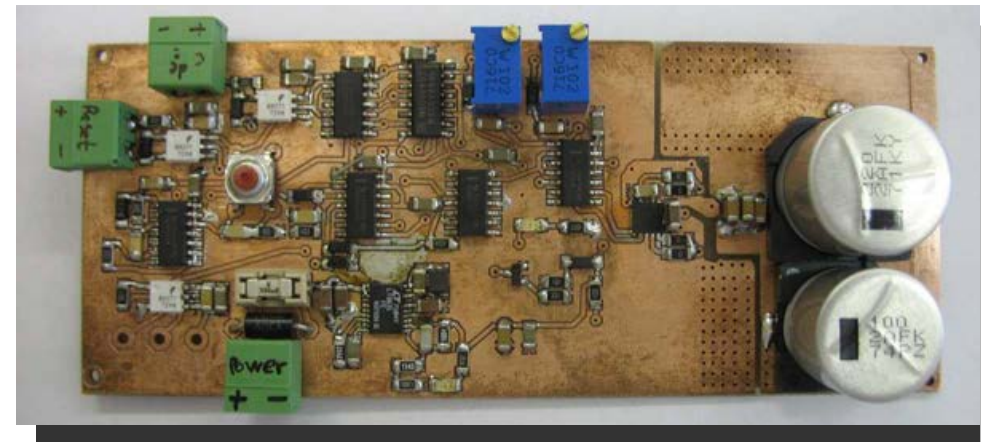
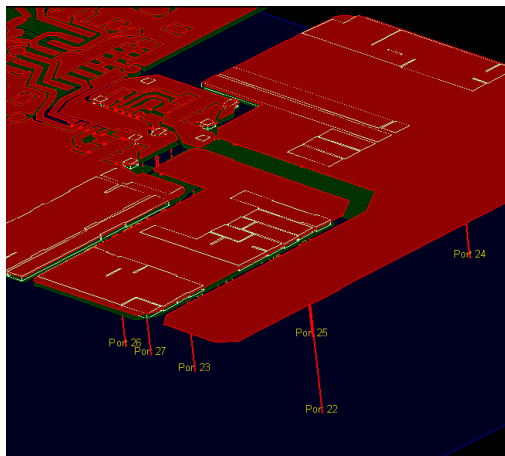
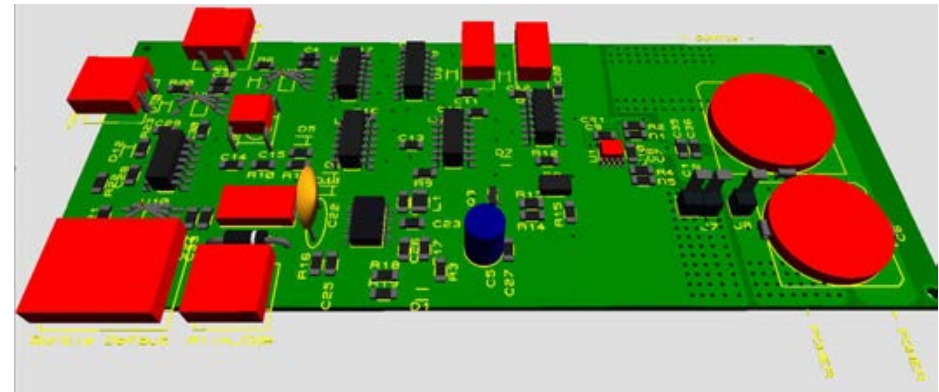
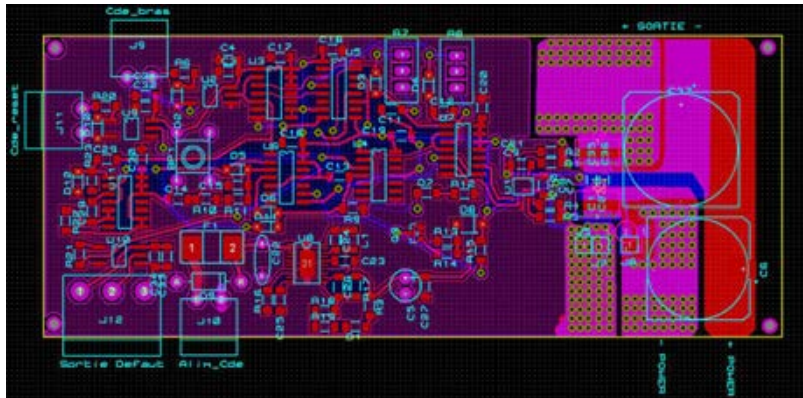


Valeurs des inductances parasites des mailles

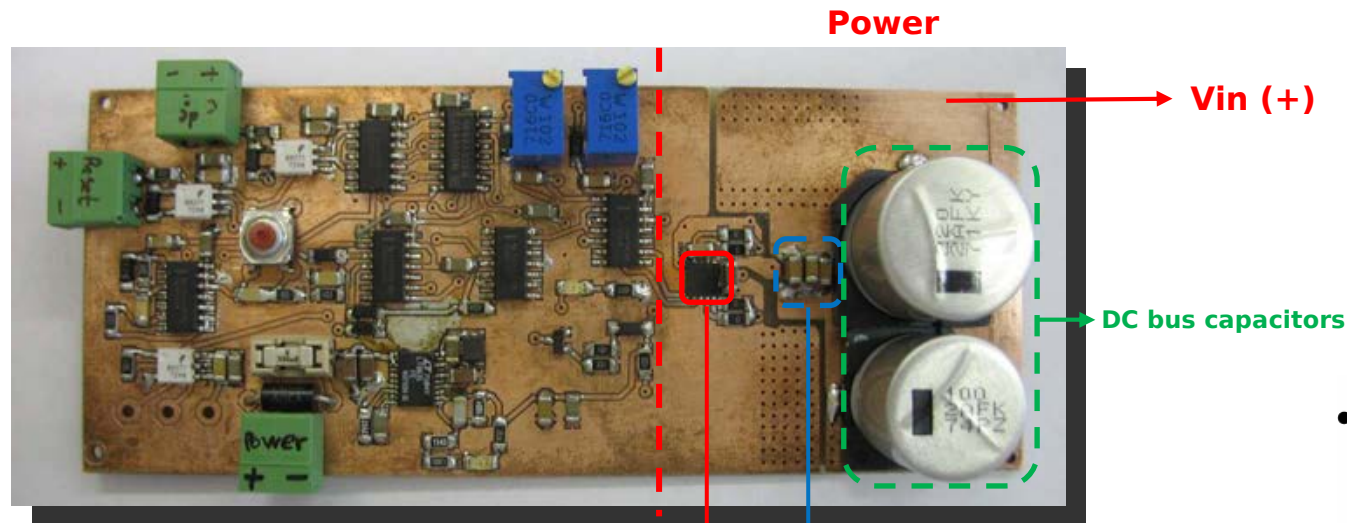


4.3 Conception et réalisation d'un bras d'onduleur

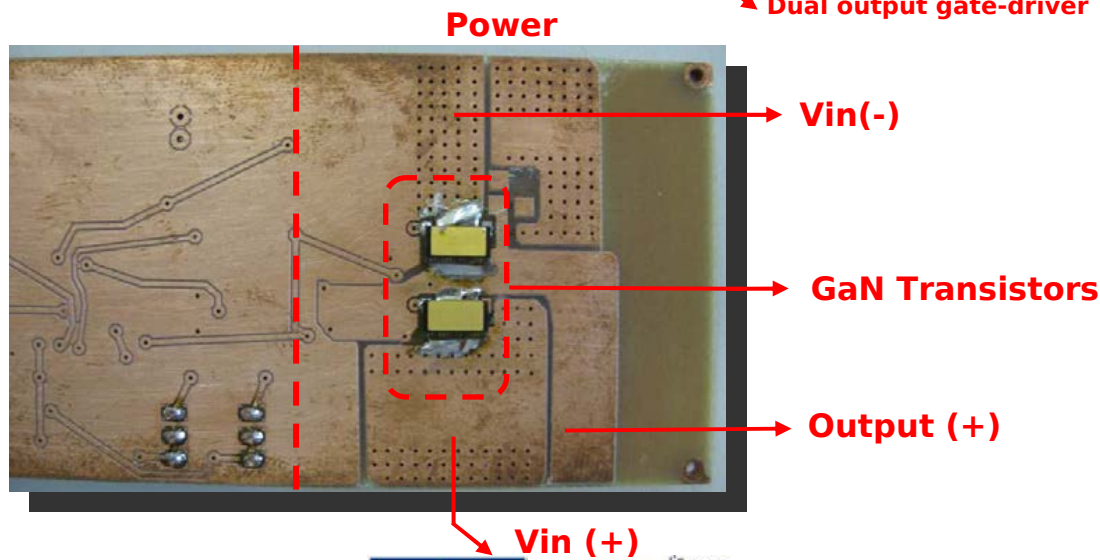
Conception d'un bras d'onduleur



4.3 Conception et réalisation d'un bras d'onduleur

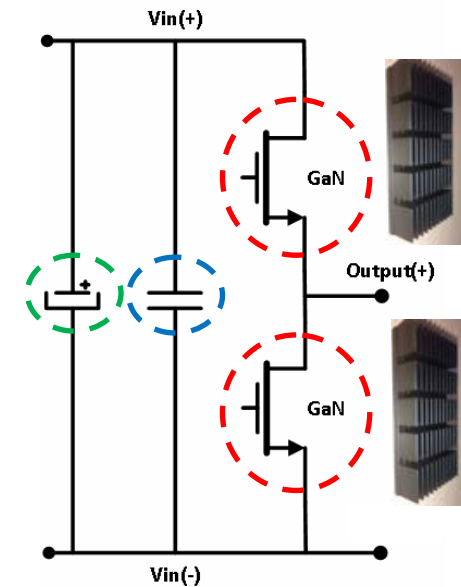


Control + Protection + Insulated power supply



DC bus ceramic capacitors

Dual output gate-driver

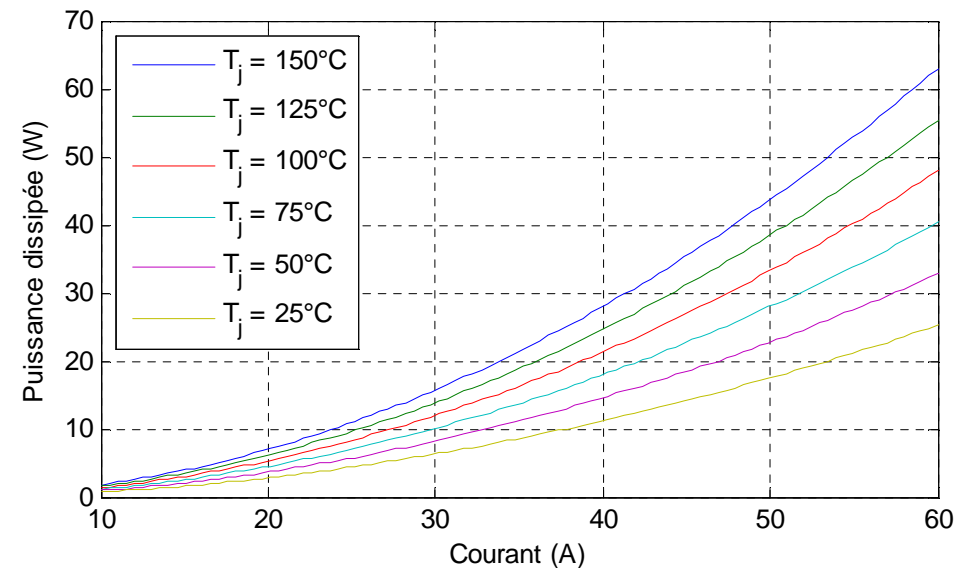


Détermination des pertes dans le transistor GaN

- **Evaluation des pertes**
 - Donnée d'entrée pour le dimensionnement du système de refroidissement
- **Pertes par commutation**
 - Augmentent avec le courant commuté et la fréquence de découpage
 - Paramètres de commutation : 60A/60V

f (kHz)	10	30	100
P_{ON+OFF} (W)	1	3	10

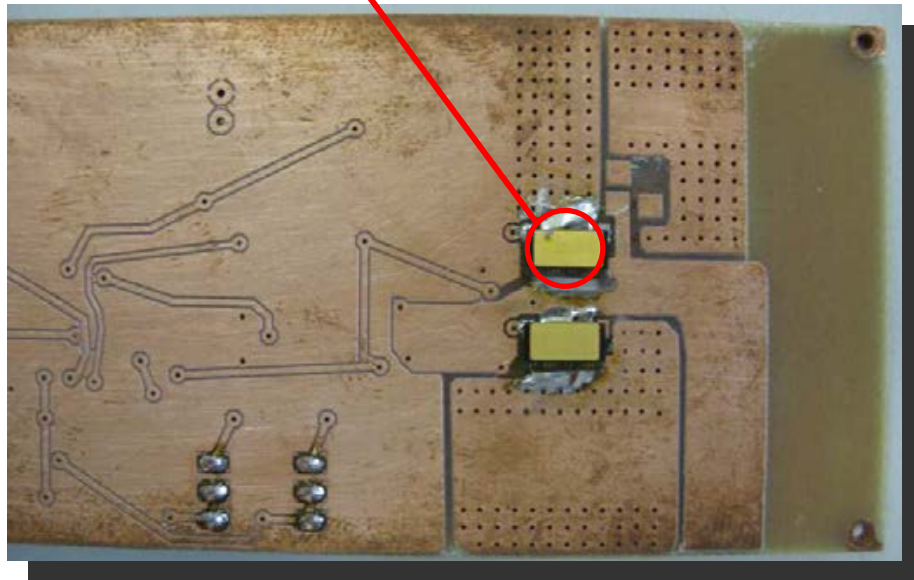
- **Pertes par conduction**
 - Augmentent avec le courant
 - Augmentent avec la température de jonction



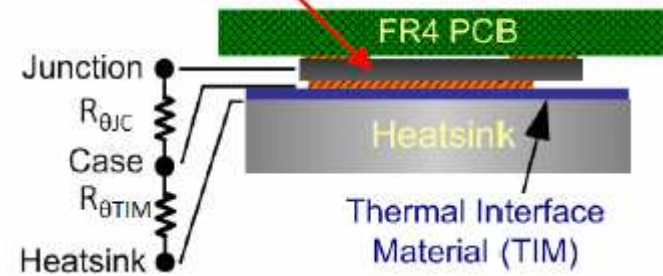
4.4 Etude du système de refroidissement



GS61008T
Thermal pad dimensions
5.9mm x 3.1mm



GaNPX Top-cooled Package [4]



Thermal Interface Material

↓ Thickness ↓ Temperature Drop ↓ BD Voltage Drop
 (electrical insulation constraint is low)



Heat Sink + Forced Air Cooling

[4] : <https://gansystems.com/>

Détermination des paramètres thermiques

Component	Hi-Flow 300P	Sil-Pad® 1500ST	GAP3000S30 R
Fabricant	Bergquist	Bergquist	Bergquist
Thermal Conductivity (W/m-K)	1.6	1.8	3
Thickness (mm) available	0.102	0.203	0.254
Thermal conductance p/ area (W/m ² -K)	15686	8866	11811
Thermal Resistance (°C/W) for GS61008T	3.48	6.16	4.62
Thermal Resistance (°C/W) measured by GaN Systems for 87mm ² (No pressure values were provided). Tests performed for 10W of losses.	1.24	1.98	1.56
Thermal Resistance (°C/W) for GS61008T considering GaN Systems measurement	5.89	9.4	7.41
Temperature drop between TIM considering 35W of losses (°C)	121.8 206.15	215.6 329	161.7 259,35

Valeurs calculées à partir des données du fabricant

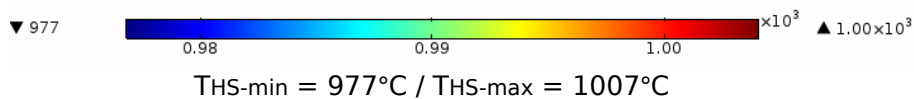
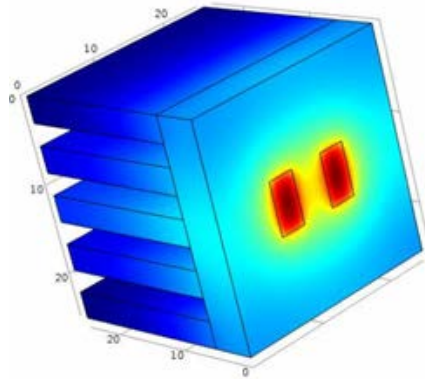
Valeurs calculées à partir des informations du fabricant

Le choix de l'épaisseur et du matériau de l'interface thermique est un paramètre important pour le dimensionnement du système de refroidissement

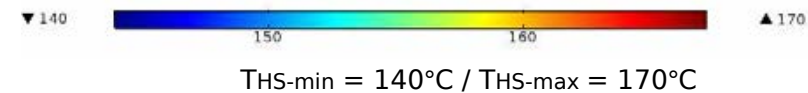
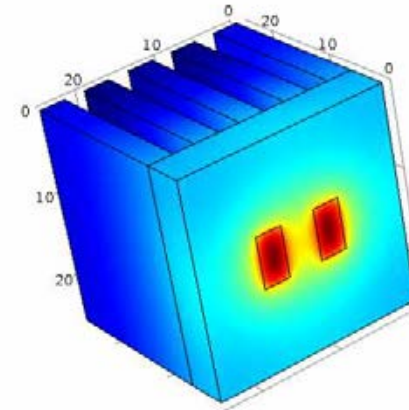
Simulation thermique du système de refroidissement des GaN

- Pertes totales de 70W sont divisées sur chaque transistor
- Dimensions du radiateur est de 25mm x 25mm x 25mm

Natural Convection

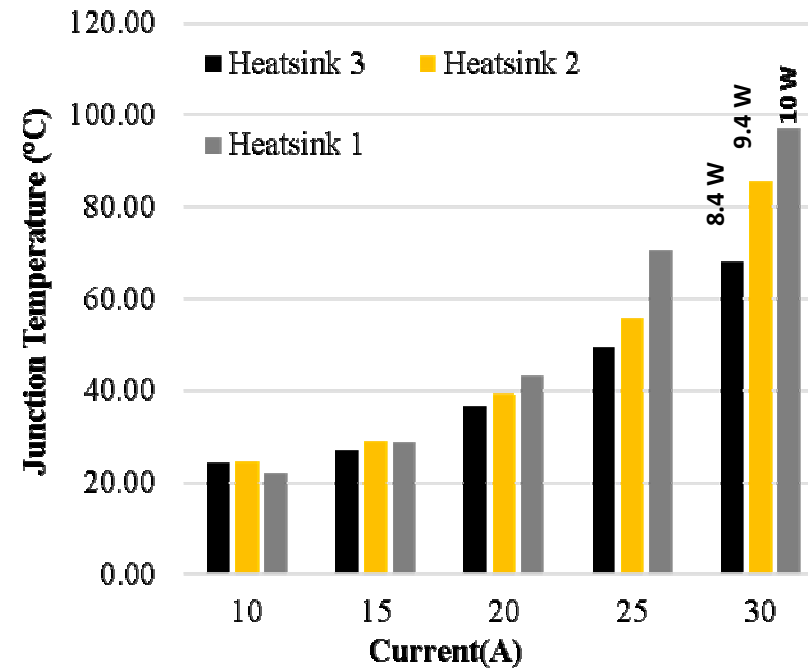
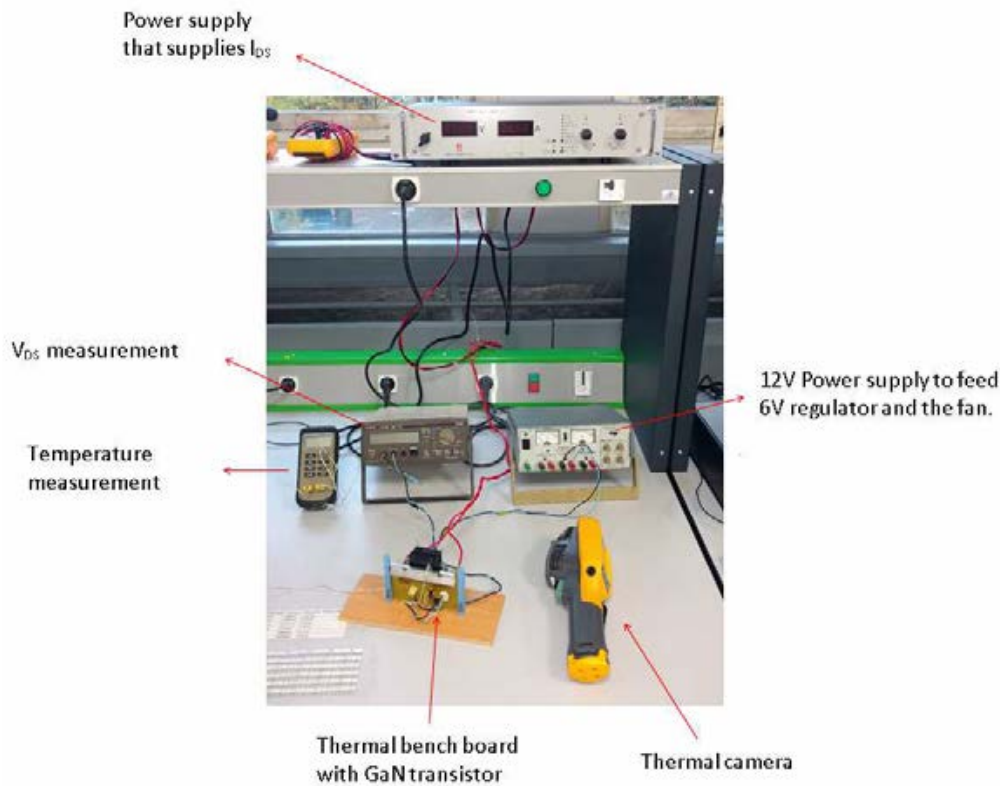


Forced Air Convection



Un refroidissement forcé est nécessaire pour respecter la température maximale du transistor GaN

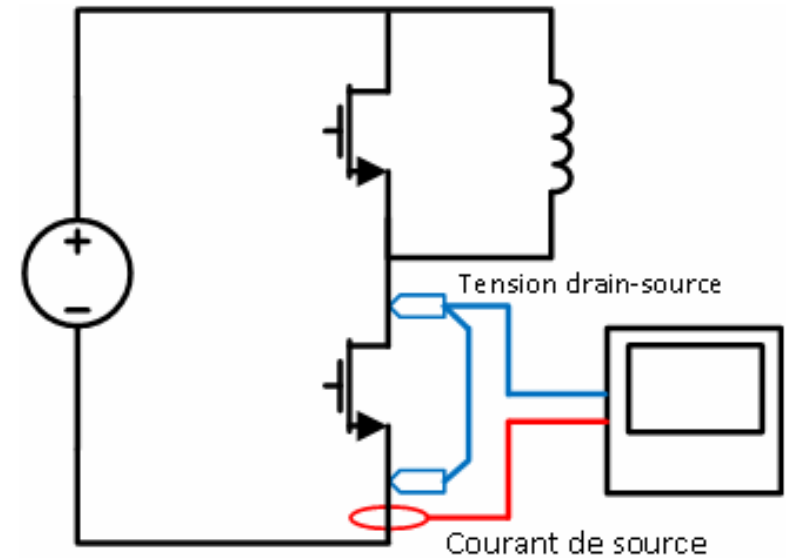
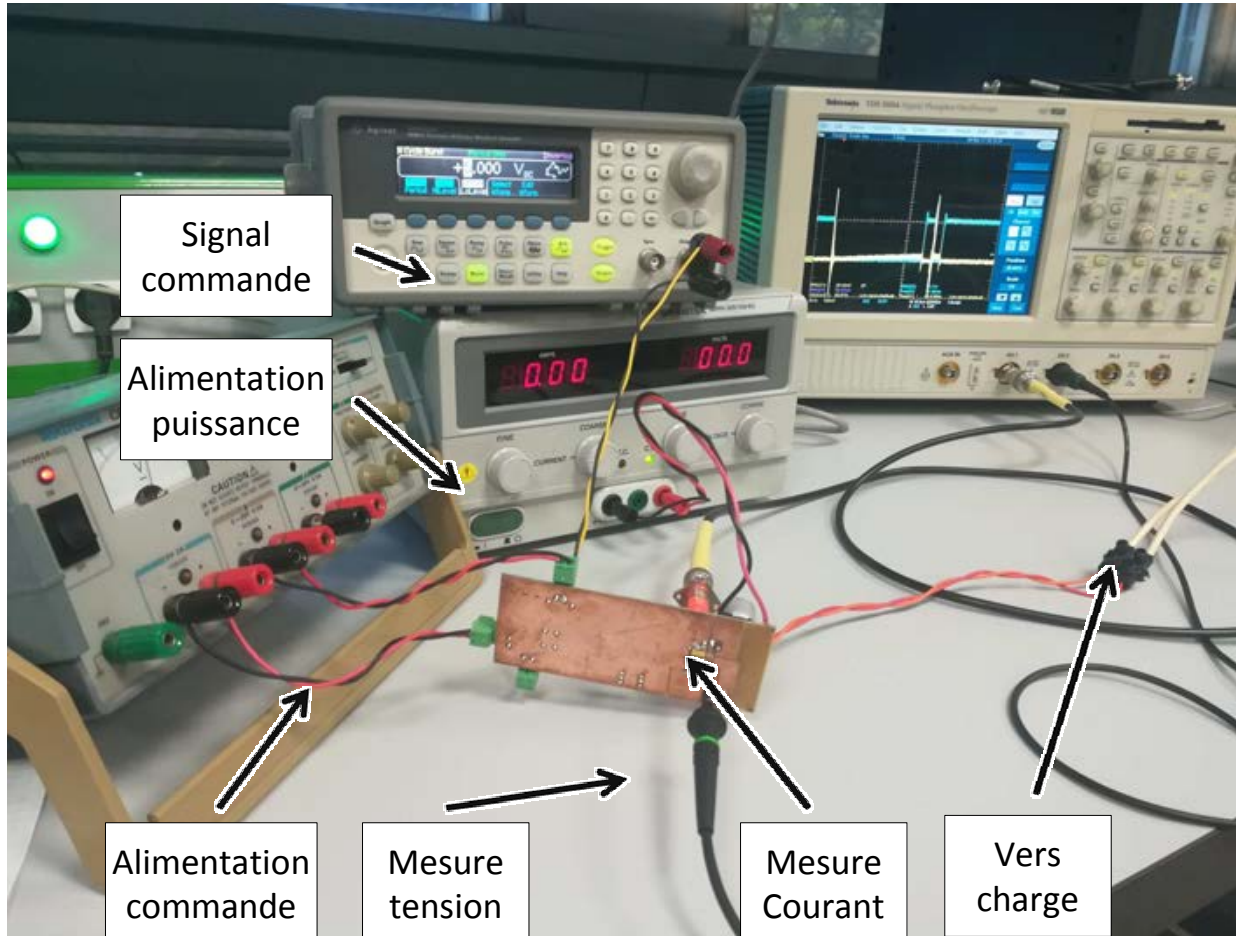
Dimensionnement du radiateur



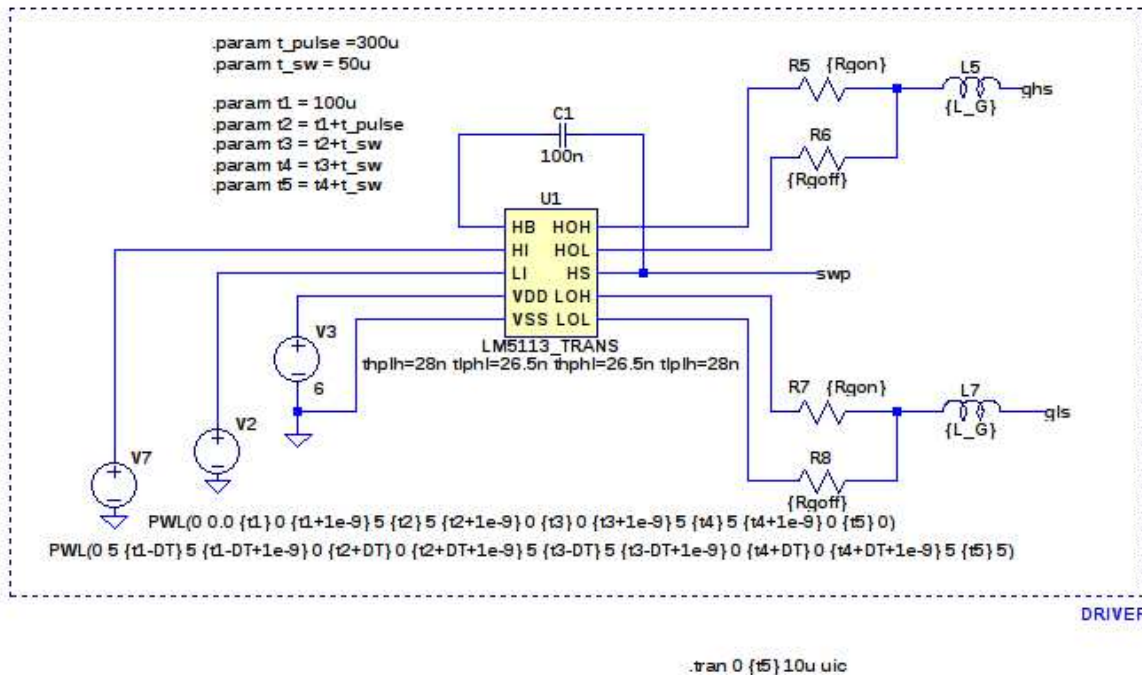
Fan of 12V, 50mmx50mm /CFM 8,84 (Heatsink 2)
 Fan of 12V, 45mmx45mm /CFM 9.18 (Heatsink 1 & 3)

Le radiateur 3 permet d'obtenir une résistance thermique de 4,06K/W

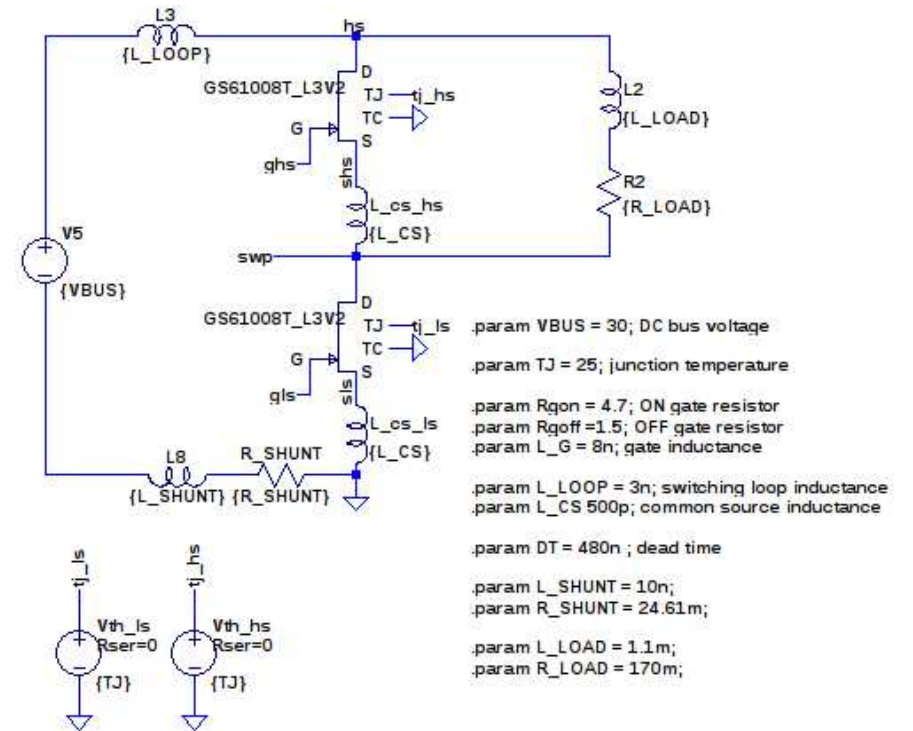
Dispositif expérimental



Circuit de simulation

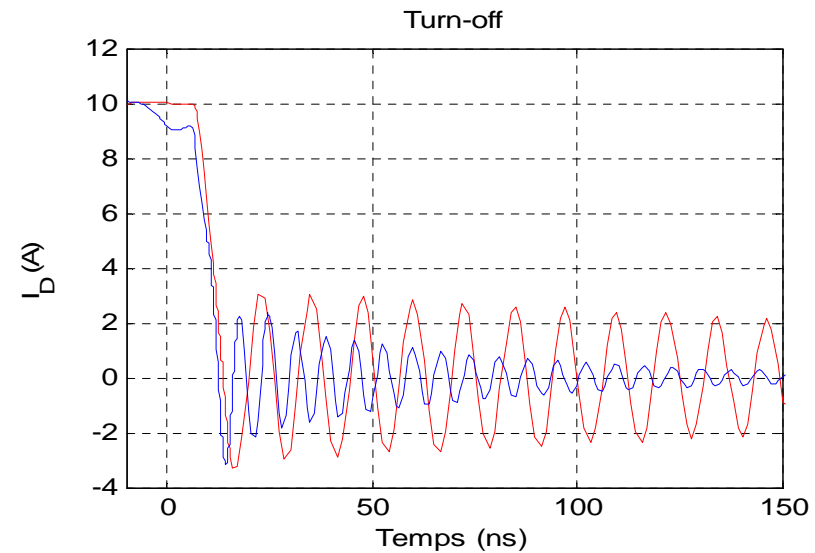
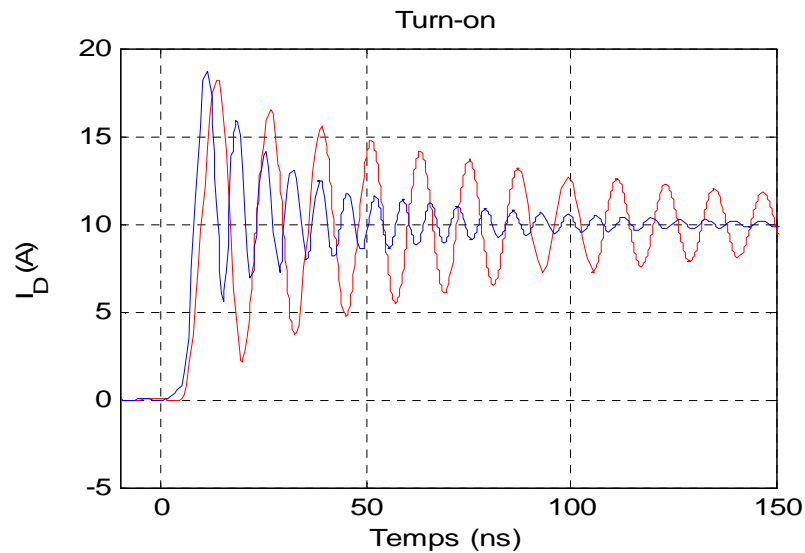
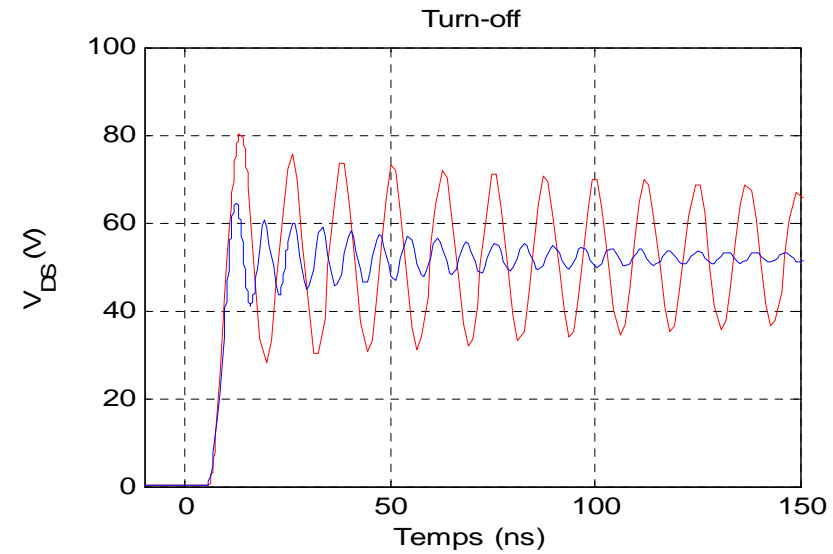
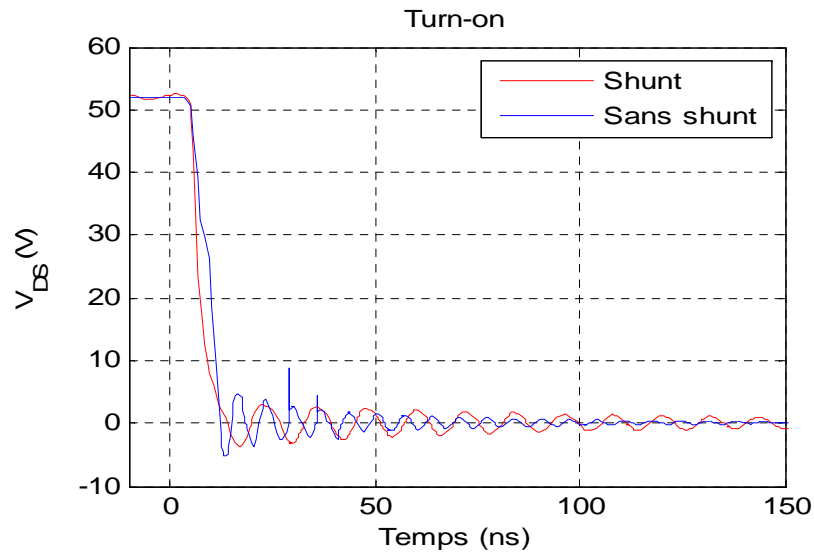


Modèle du driver « LM5113 »

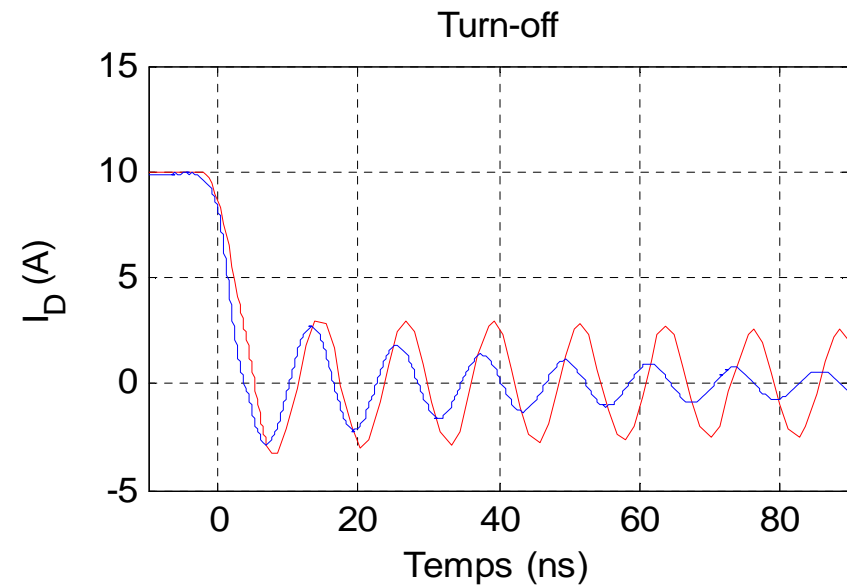
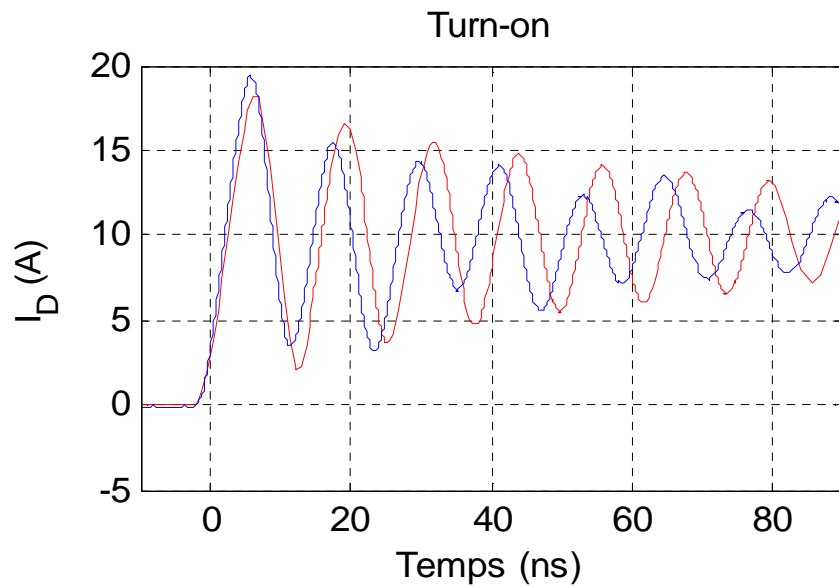
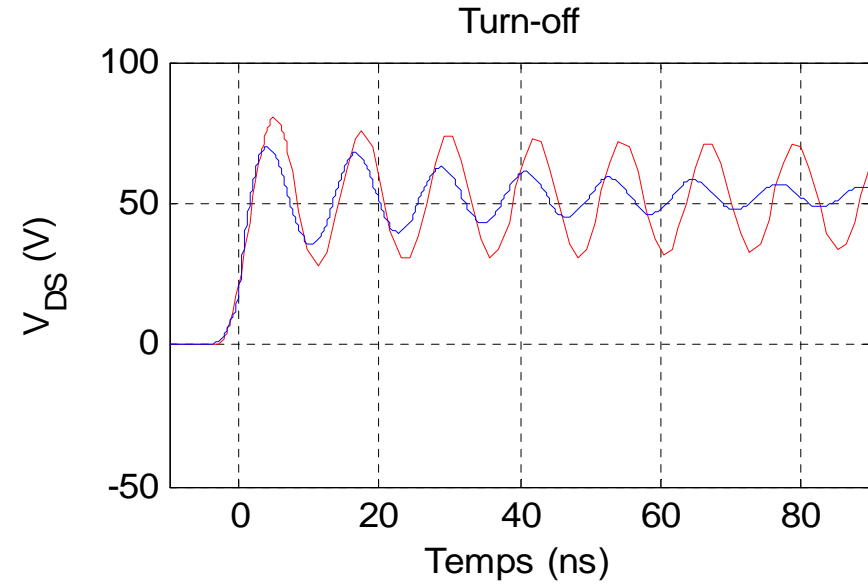
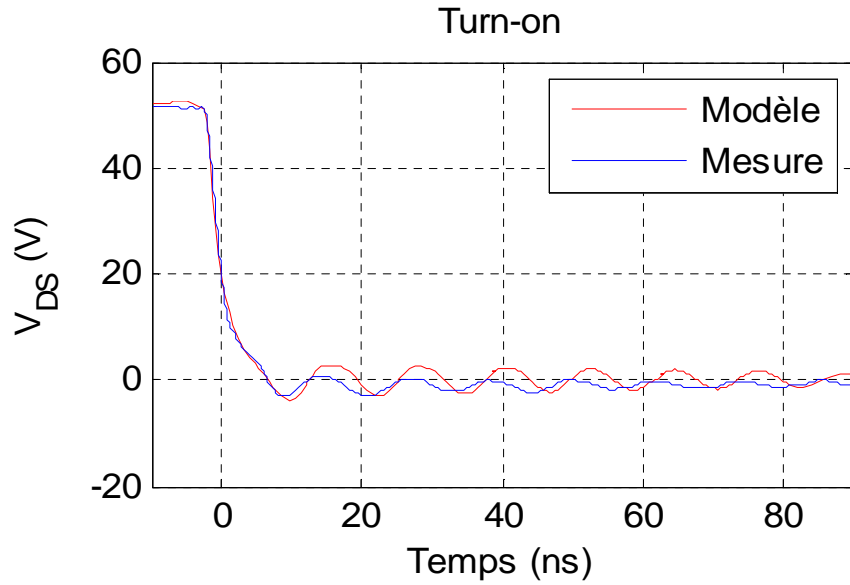


Modèle d'un bras GaN

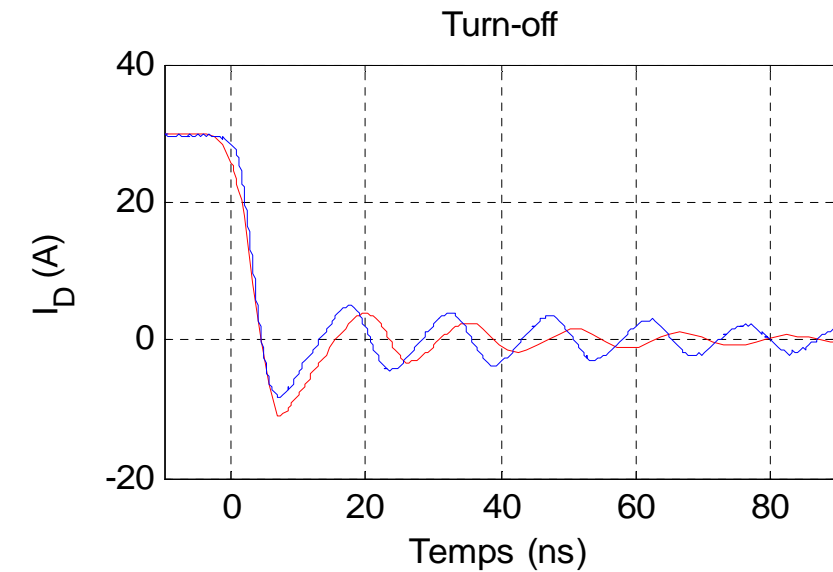
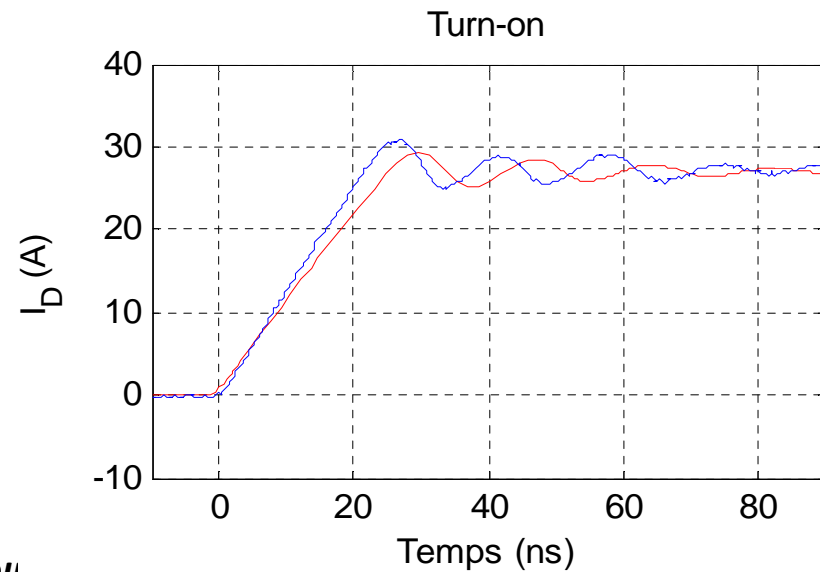
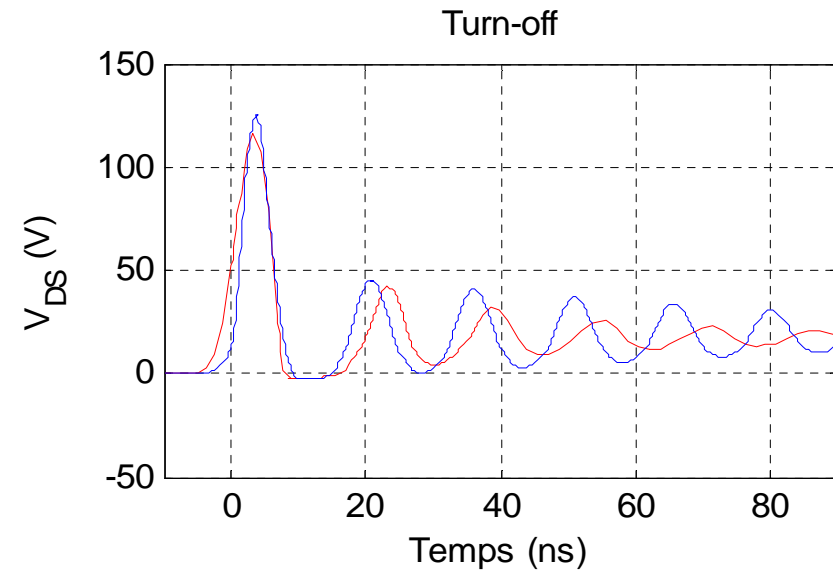
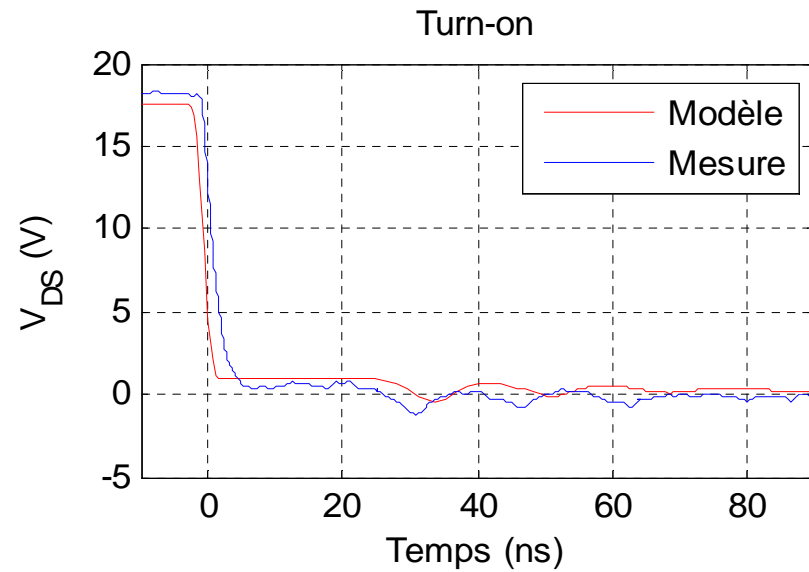
Influence de la mesure de courant (shunt)



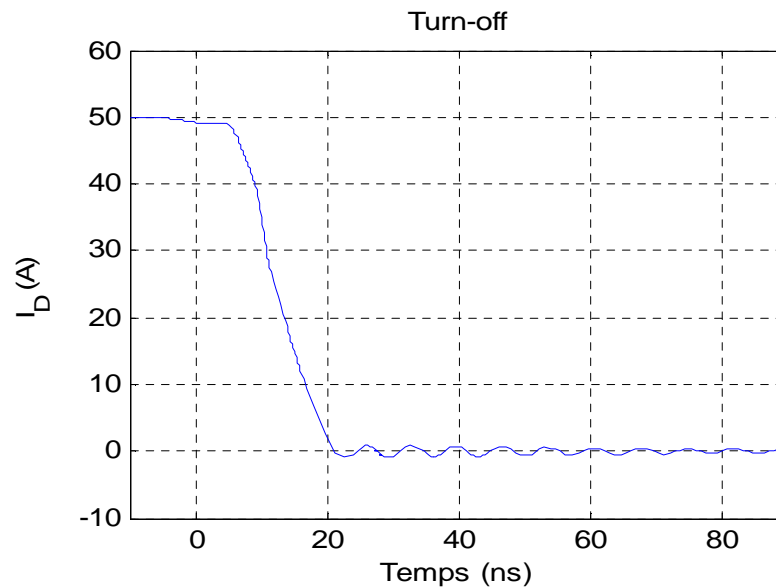
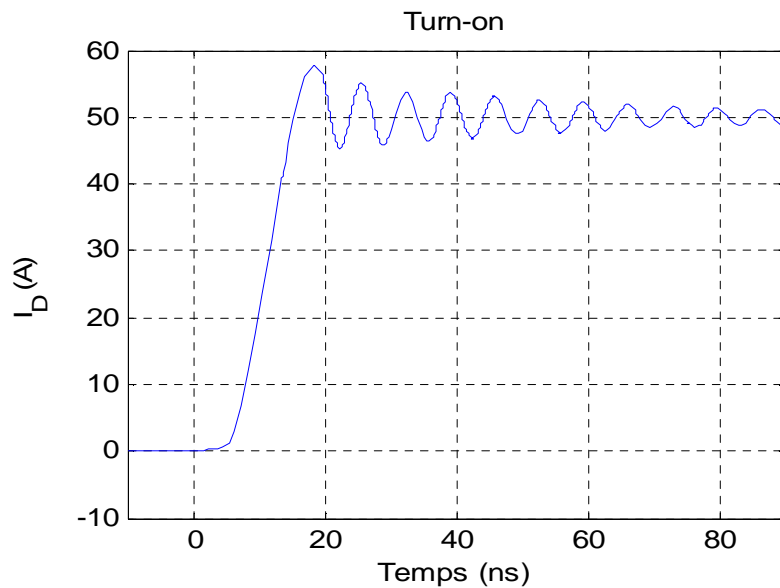
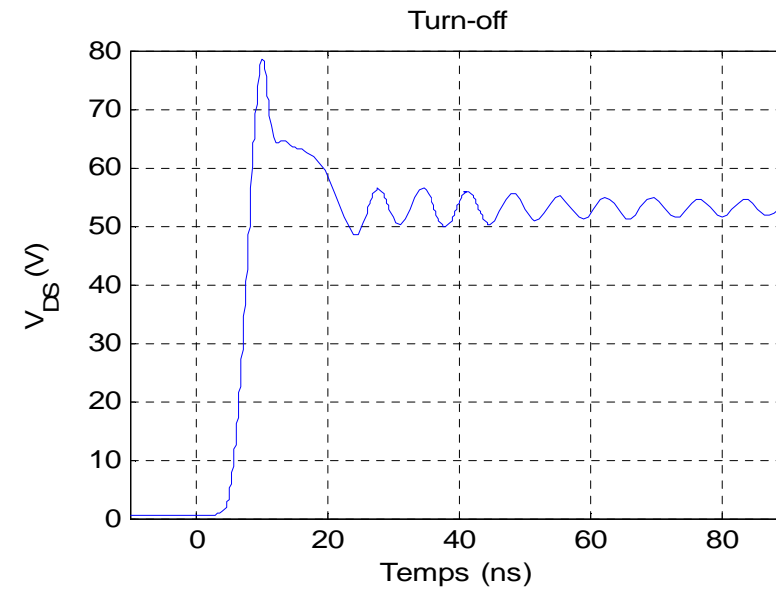
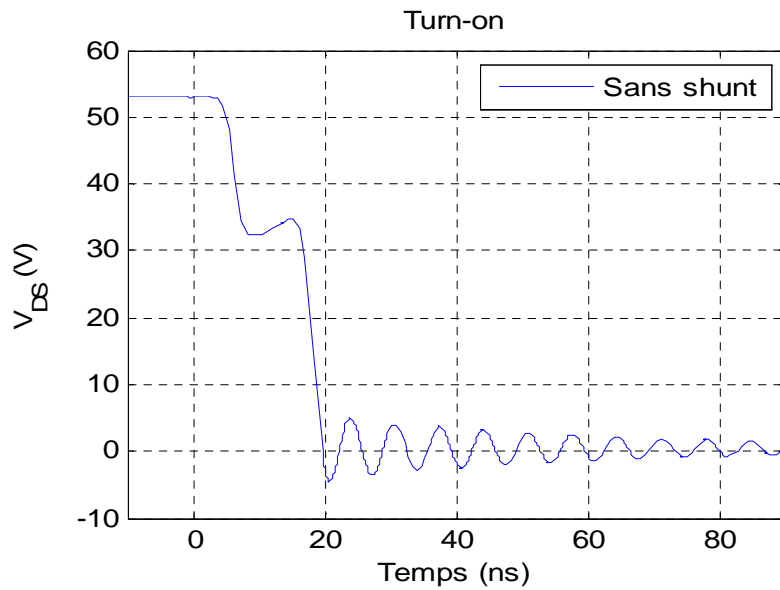
4.5 Validation expérimentale (50V/10A)

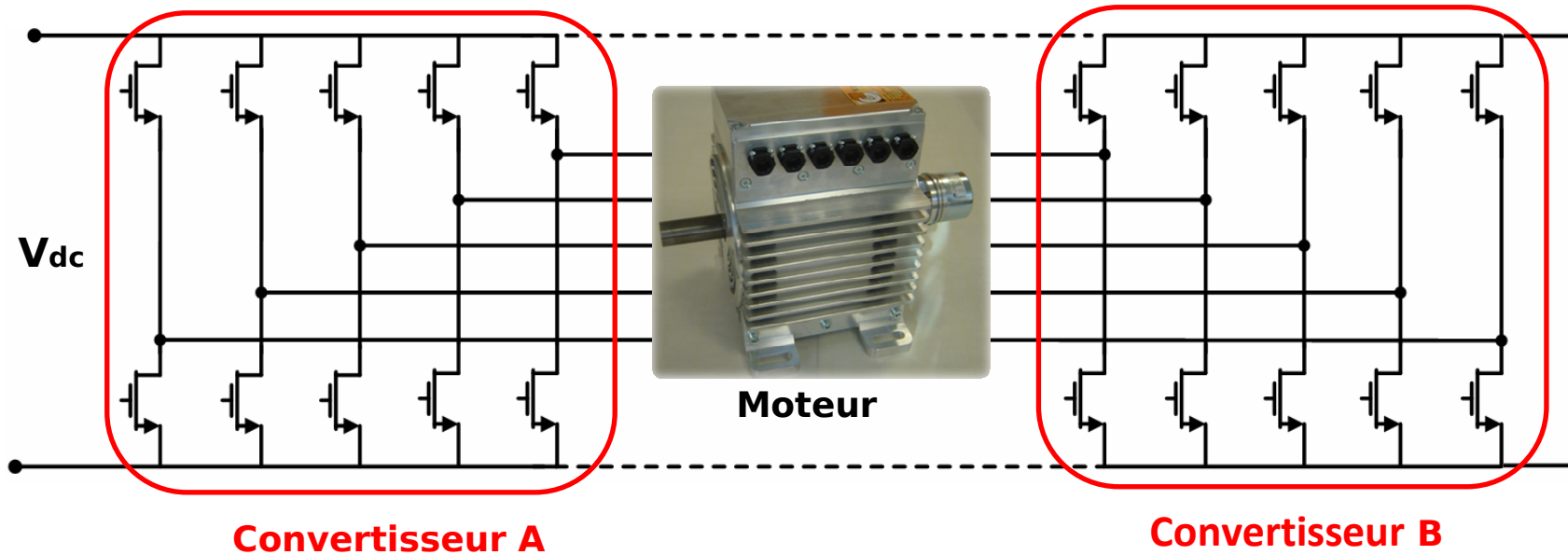


4.5 Validation expérimentale (15V/30A)

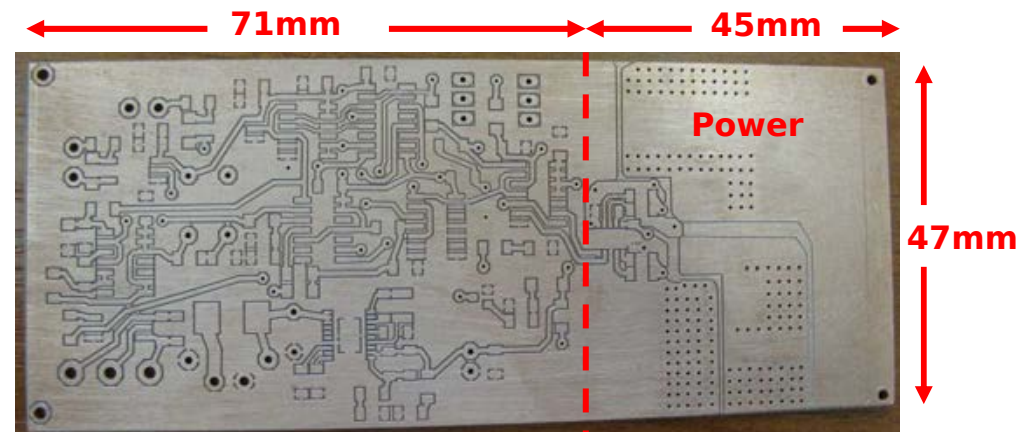
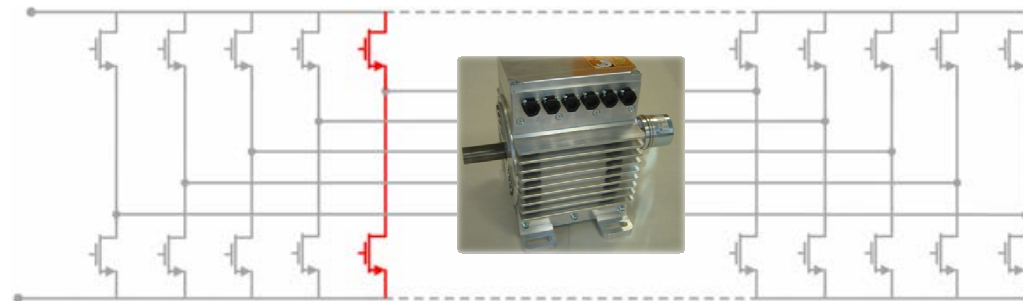
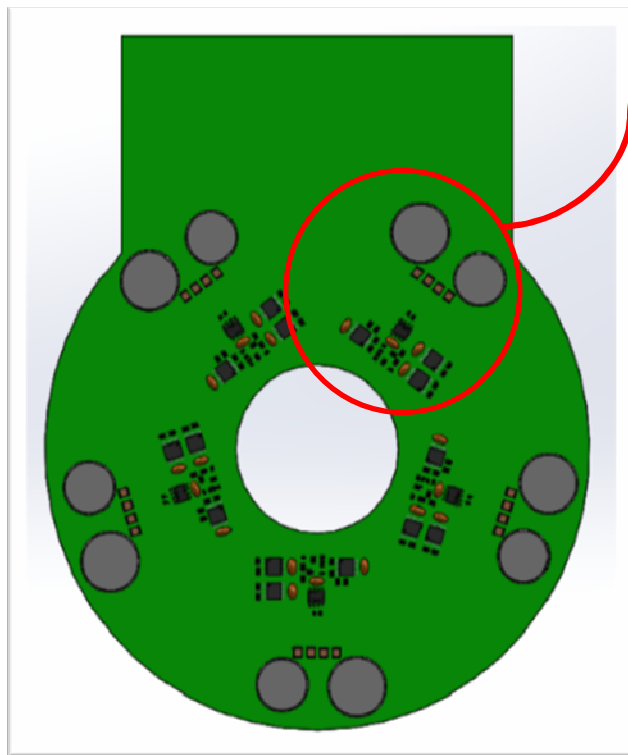


4.5 Résultats de simulation (50V/50A)





Electrical Characteristics	
V_{dc}	60V
I_{pk-ph}	60A
V_{pk-ph}	50V
PF	0.85
P_{TOT}	6750W



Control + Protection + Insulated power supply

Prochaines étapes

- Validation du système de refroidissement des composants GaN
- Réalisation des essais sous 60A/60V à différentes fréquences de commutation
- Optimisation du système de refroidissement des composants GaN
- Conception du PCB du convertisseur DC-AC
- Réalisation du convertisseur DC-AC et validation expérimentale
- Association du convertisseur et moteur
- Réalisation des essais sur un moteur 5 phases

Merci pour votre attention

Nadir IDIR (*)

(*) nadir.idir@univ-lille.fr