



convertisseur
d'énergie
**Intégré
Intelligent**

Tâche 5 : analyse comparative de plusieurs techniques de refroidissement des GaN

Souad Harmand





11 juillet 2018 – comité de suivi

- ❑ Partie 1 : Analyse comparative de plusieurs techniques de refroidissement des GaN
- ❑ Partie 2 : Modélisation du mode dégradé et prise en compte de l'effet de la variation de la température sur les pertes





convertisseur
d'énergie
**Intégré
Intelligent**

11 juillet 2018 – comité de suivi

Partie 1

□ Analyse comparative de plusieurs techniques de refroidissement des GaN



□ Une démarche progressive

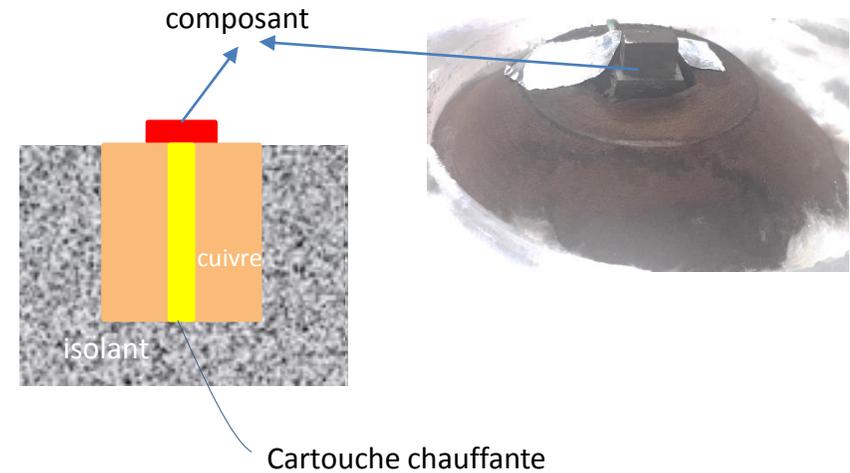
- Essais sur bloc chauffant
- Essais sur les composants GaN réels

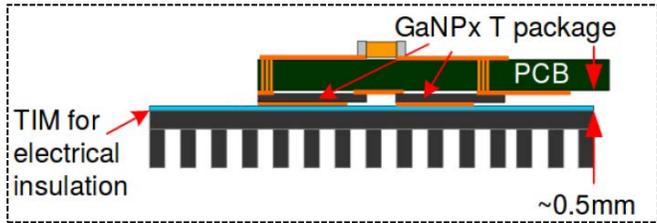
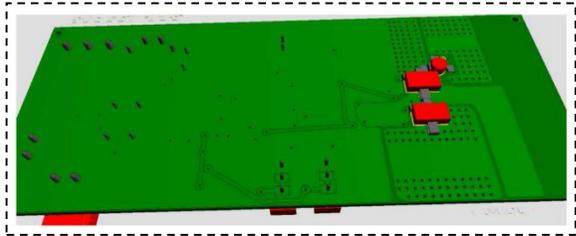
□ Les techniques de refroidissement testées

- Dissipateur à ailettes
- Plaque à eau
- Immersion
- Matériaux à Changement de Phase
- Jet d'air

□ Caractéristique des composants

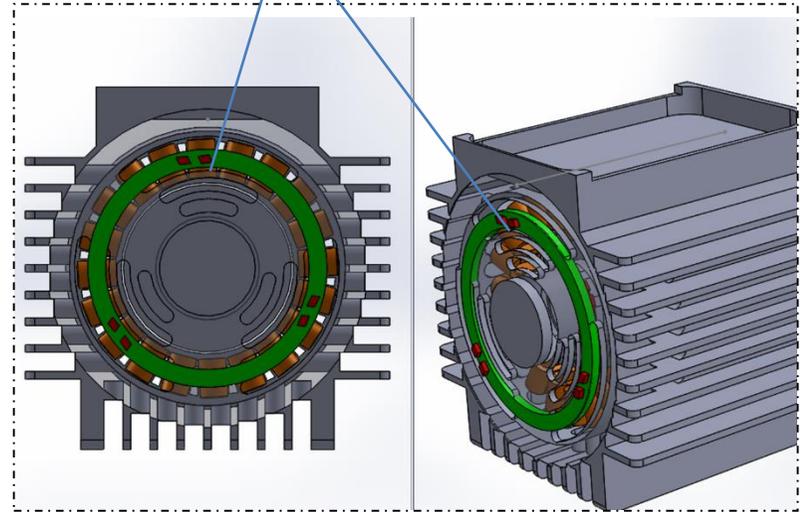
- Dimension : 3,1mm X 5,9 mm
- Puissance totale : 70 W
- Densité de flux thermique maximale : 250 W/m²





Packaging

Transistors



Emplacement niveau machine

Synthèse des essais sur le bloc chauffant

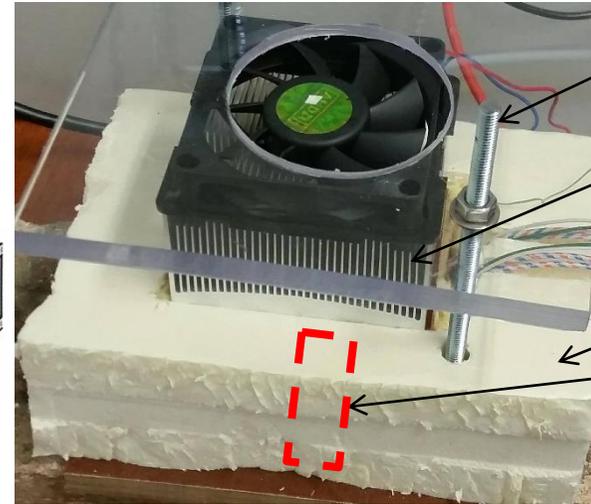
Interface thermique
isolante électriquement

Alimentation transistor
(12v)

Mesure de température

Bloc de chauffe

Alimentation
Electrique



Ventilateur

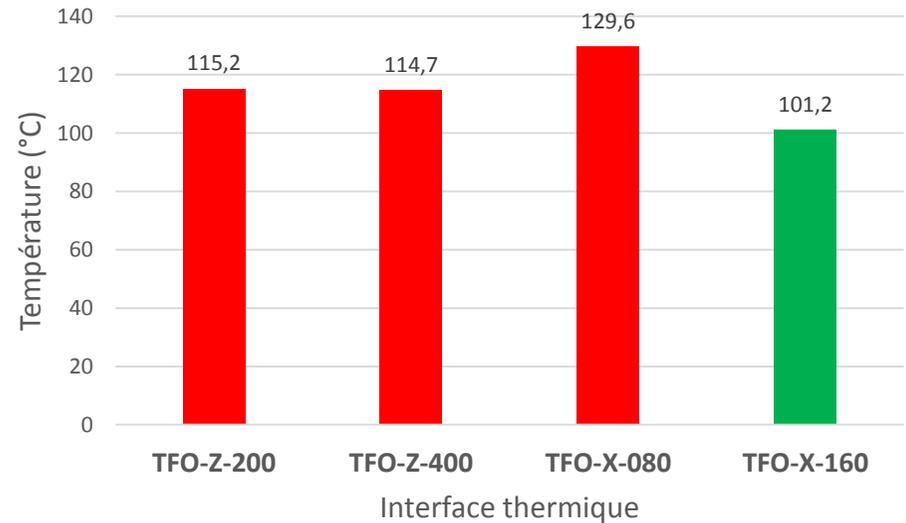
Dissipateur
thermique
en
aluminium
: 75X65X45

Isolant

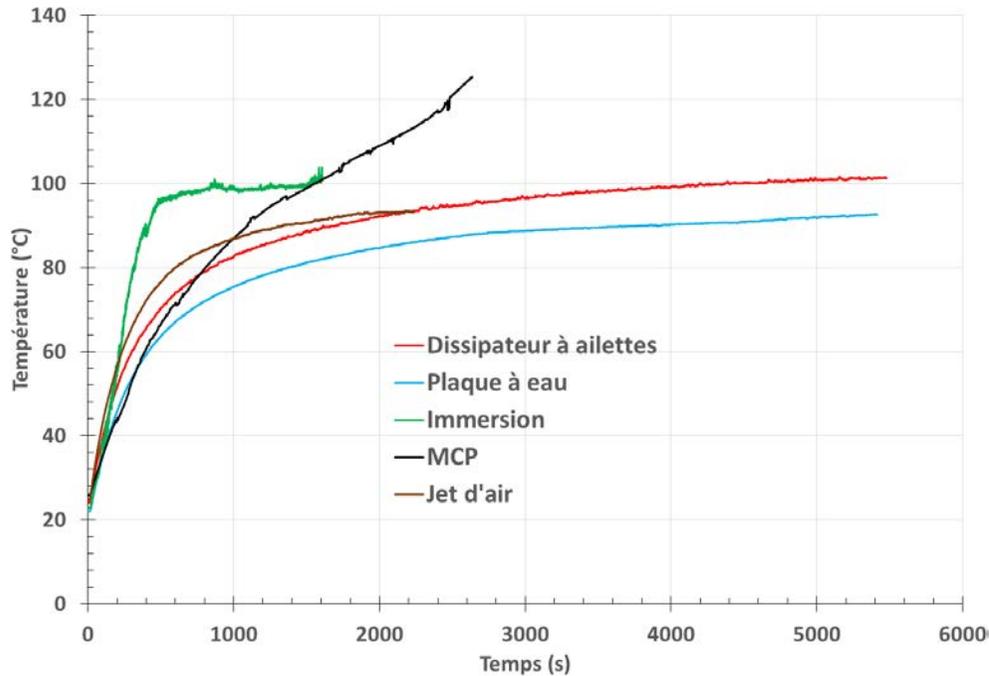
Cartouche
chauffante

Propriétés des interfaces thermique

Interface	TFO-Z200-SI	TFO-Z400-SI	TFO-X080-SI	TFO-X160-SI
Conductivité (W/m-K)	8	8	5	5
Epaisseur (mm)	0,2	0,4	0,08	0,16



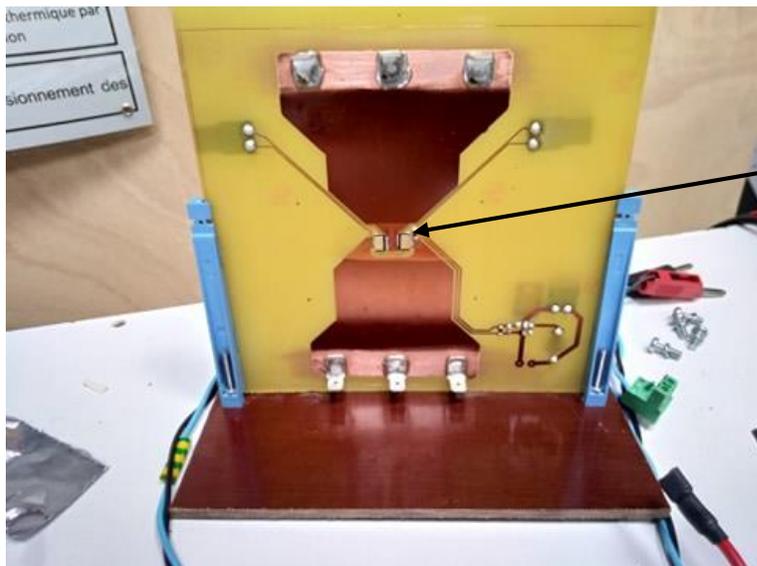
➔ L'interface TFO-X-160 est la plus performante



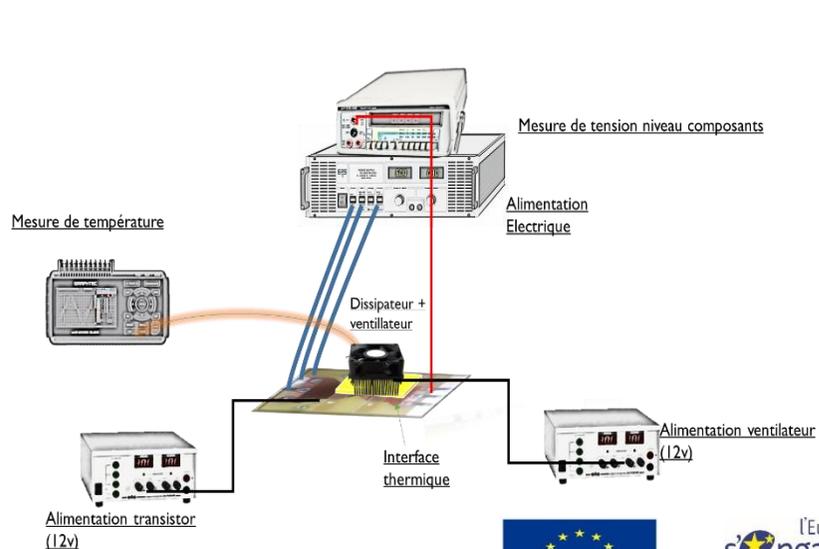
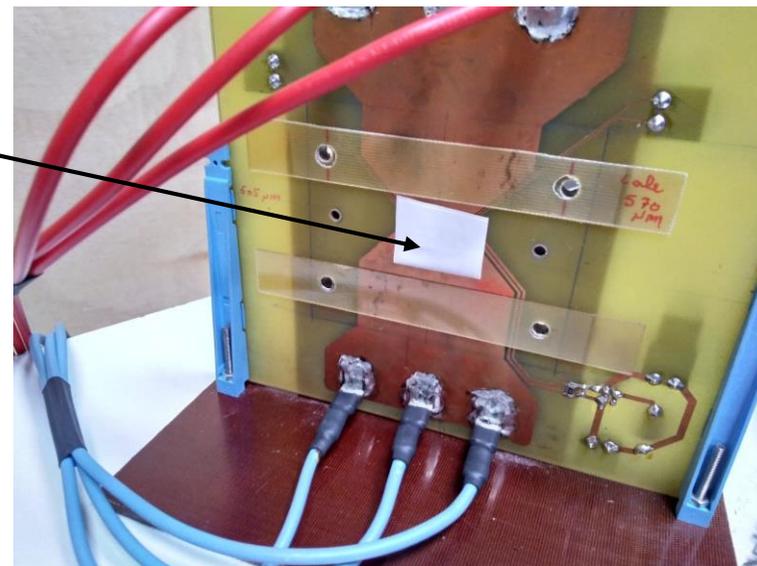
- Pour un fonctionnement de longue durée, Dissipateur, plaque à eau, immersion et jet d'air sont les plus performants;
- MCP peut être intéressant pour un fonctionnement à courte durée,

		Encombrement	Température maximale (°C)	Cout et entretien	Consommation énergétique
Dissipateur à ailettes	actif	-	101	+	++
Plaque à eau	actif	++	92	++	++
Immersion	passif	-	100	-	--
MCP	passif	--	120 à t=2500 s	--	--
Jet d'air	actif	+	93	+	++

Synthèse des essais sur les composants GaN

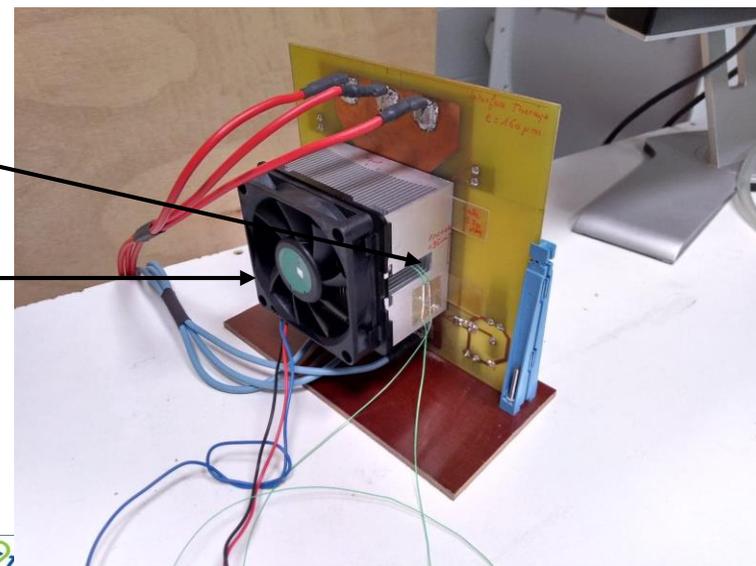


composants GaN et Interface

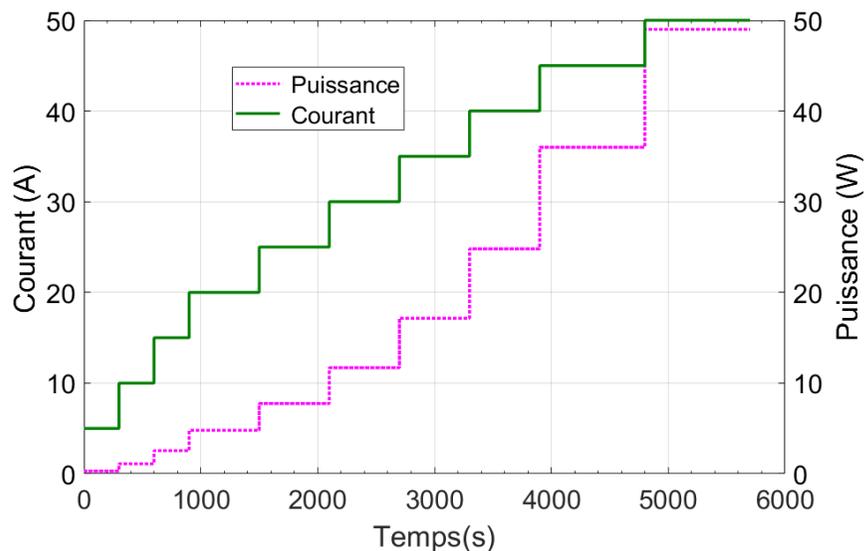


Position des thermocouples

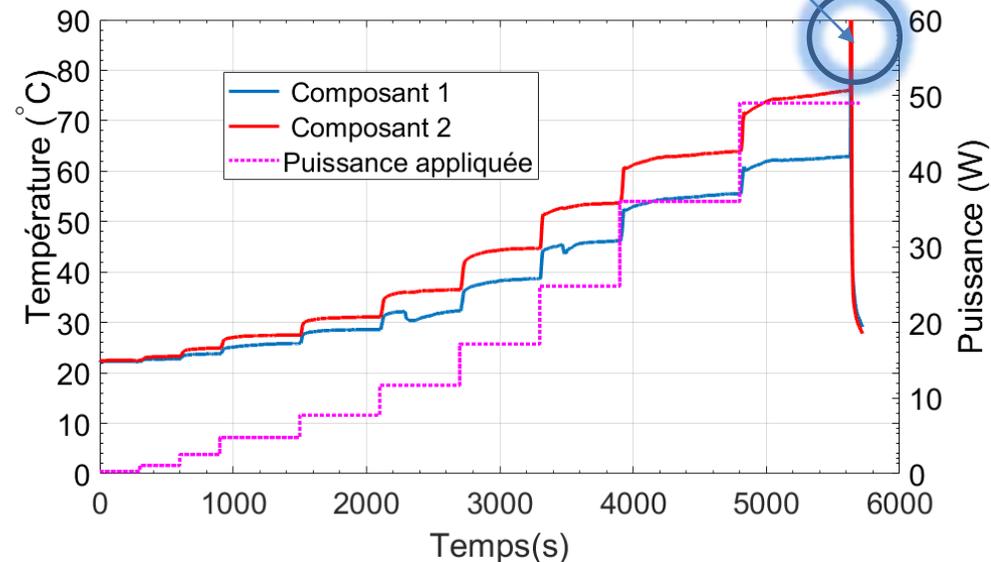
Dissipateur + Ventilateur



Essai dissipateur



Composant détruit

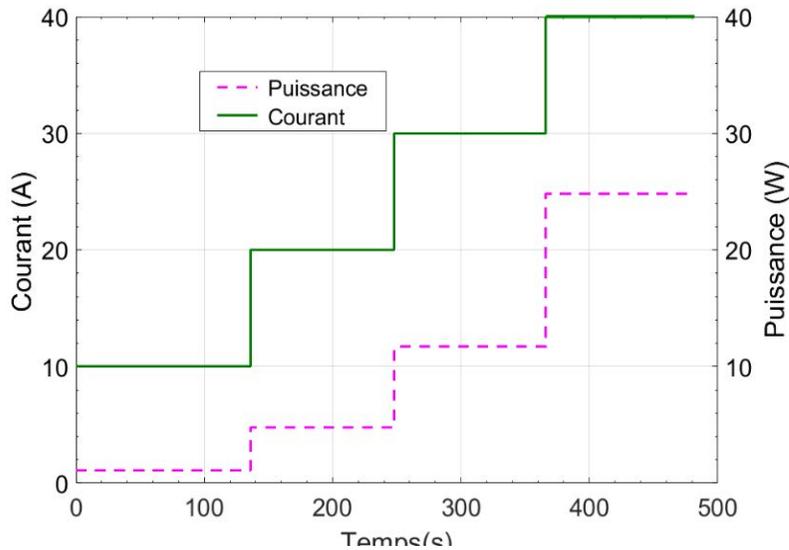


La température est mesurée par thermocouple à l'interface composant – système de refroidissement

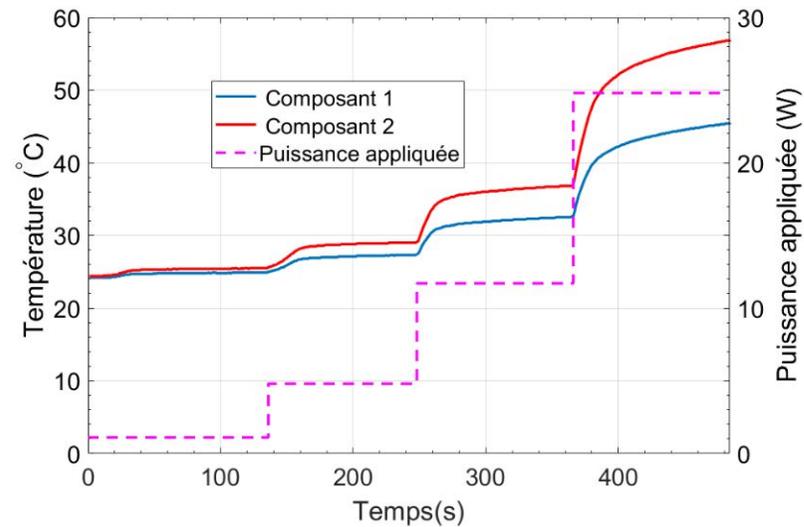
- ❑ Puissance= $U \cdot I$ avec U et I donnés par le système d'alimentation
- ❑ Présence d'un décalage entre les températures des composants 1 et 2 car les deux composants :
 - ne sont pas alignés
 - montés en parallèle, ne consomment pas le même courant



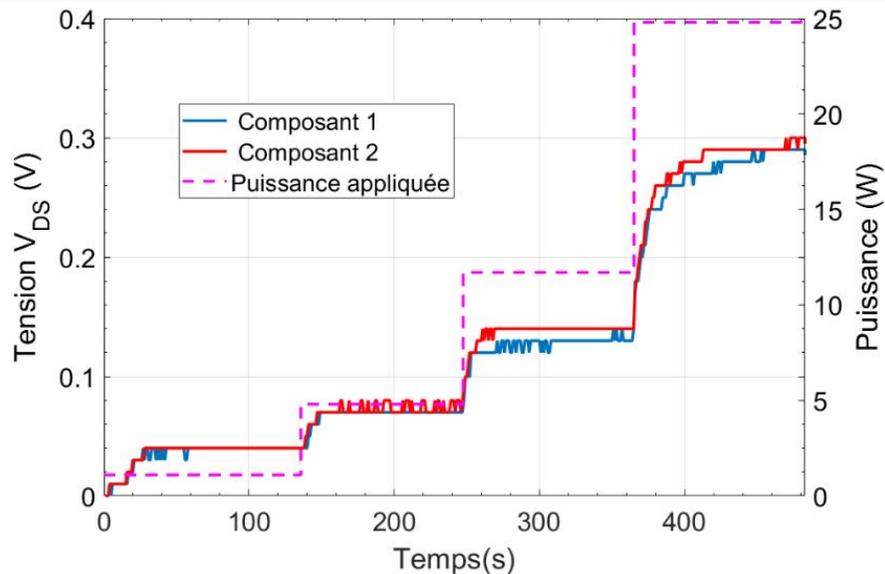
- ❑ Définition d'un profil de puissance type pour tous les essais
- ❑ Plusieurs paliers de 2 mn et durée totale de 8 mn



Variation de la puissance en fonction du courant appliqué



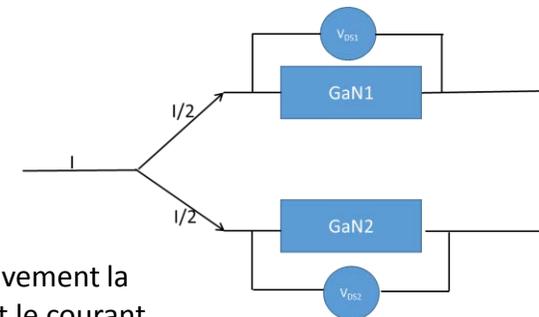
Température à la surface de deux composants



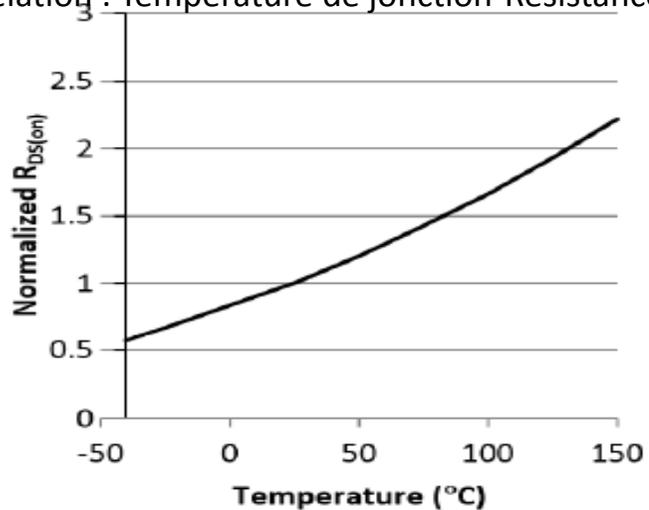
Méthode de calcul de R_{DS}

$$R_{DS} = V_{DS} / I_{GaN}$$

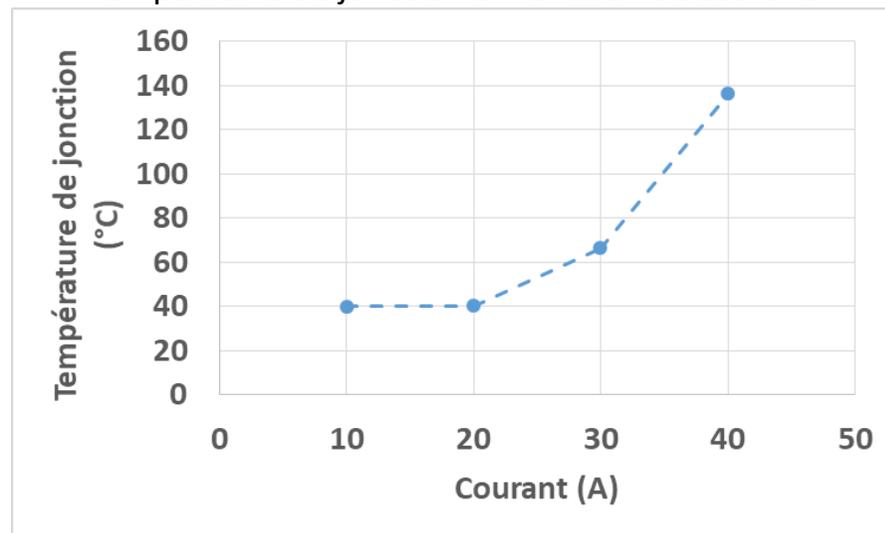
V_{DS} et I_{GaN} sont respectivement la tension drain-source et le courant aux bornes de GaN

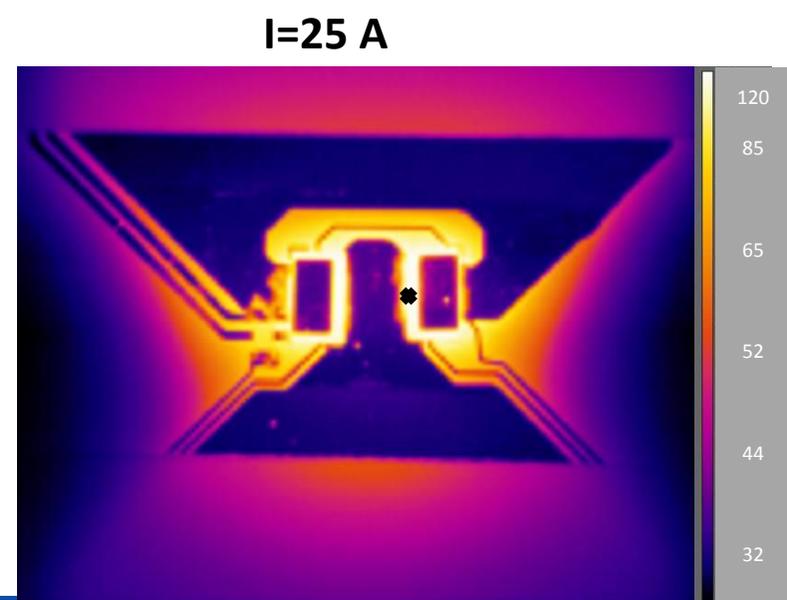
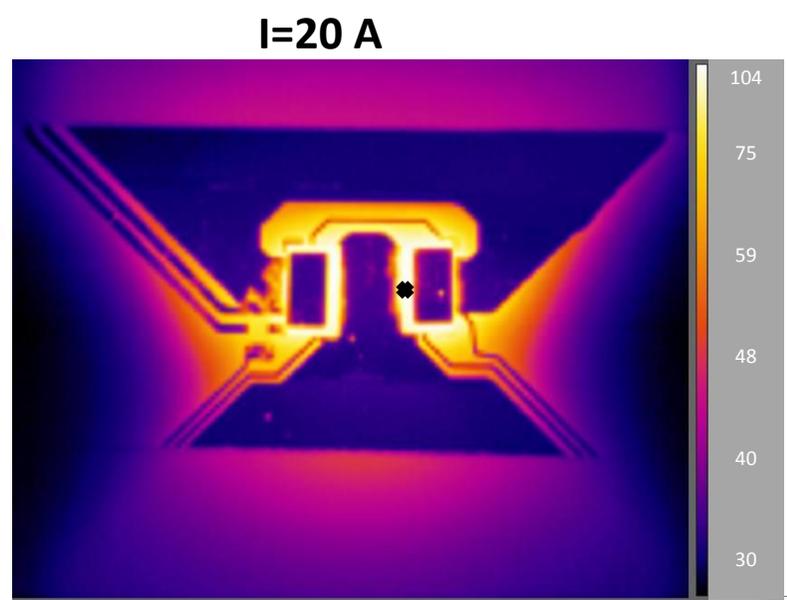
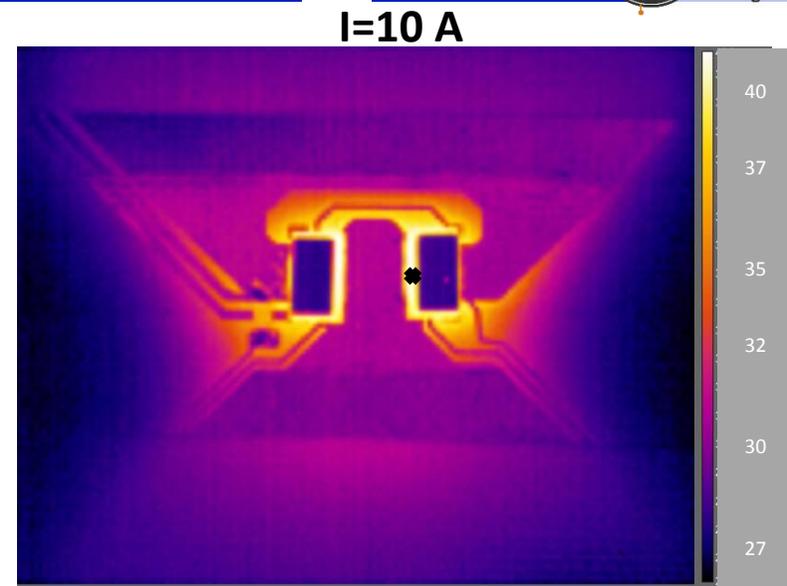
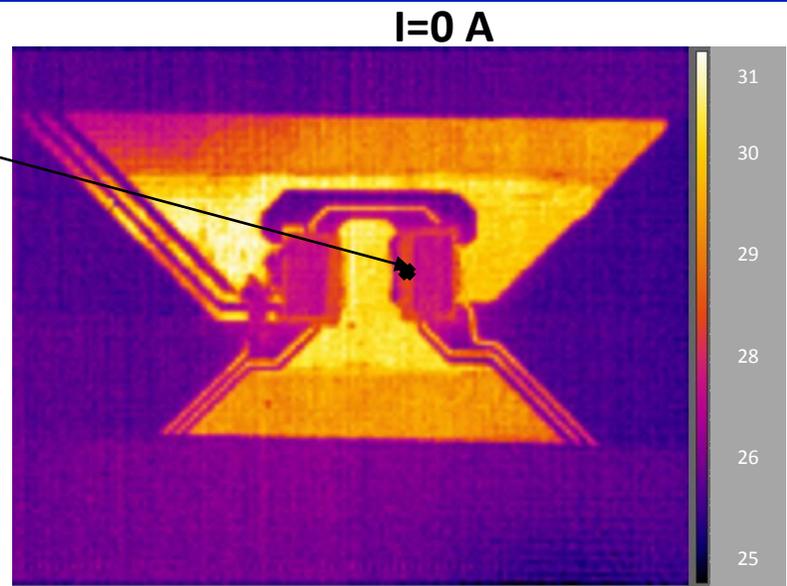
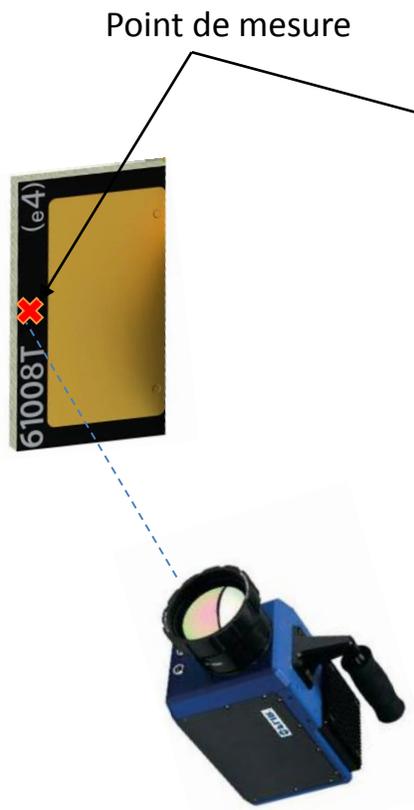


Variation de tension drain-source en fonction de courant
Corrélation : Température de jonction-Résistance R_{ds}



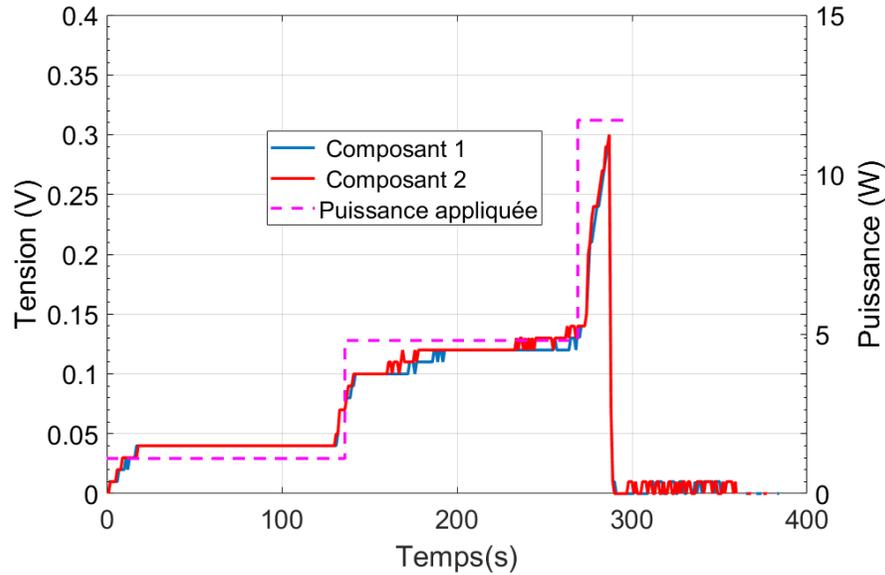
Température de jonction en fonction de courant



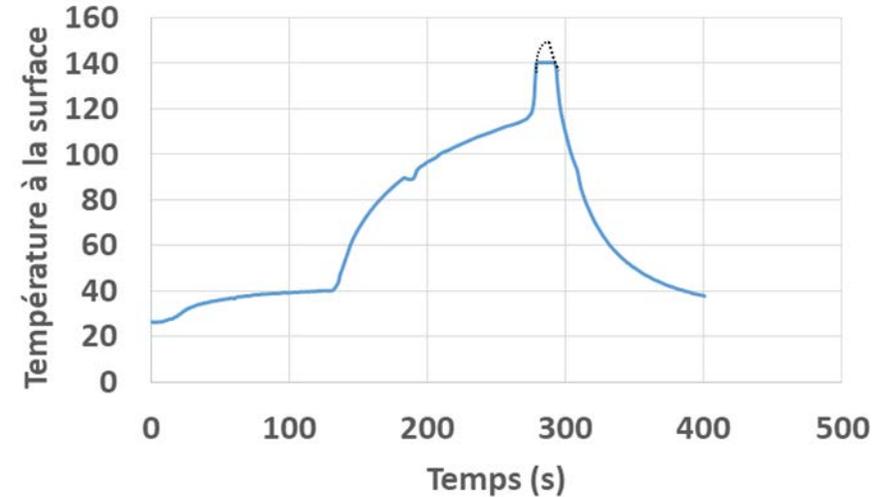


Peinture noire →
Emissivité ≈ 1

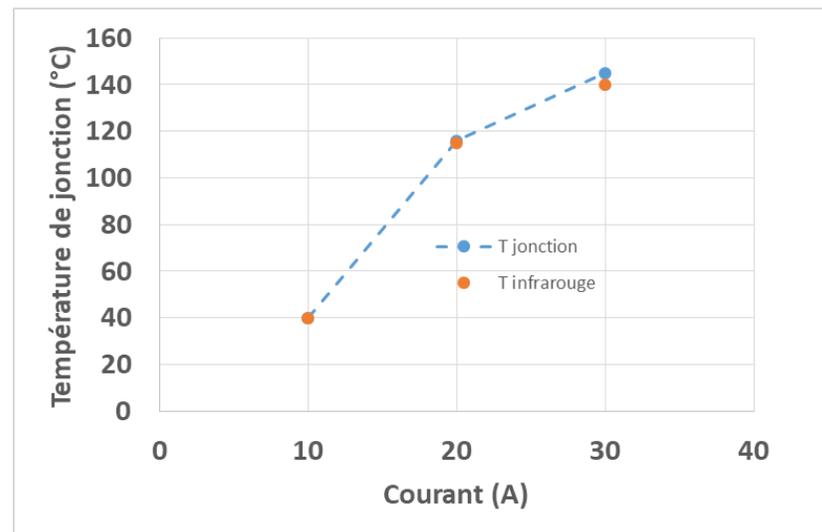
Variation du tension en fonction du courant

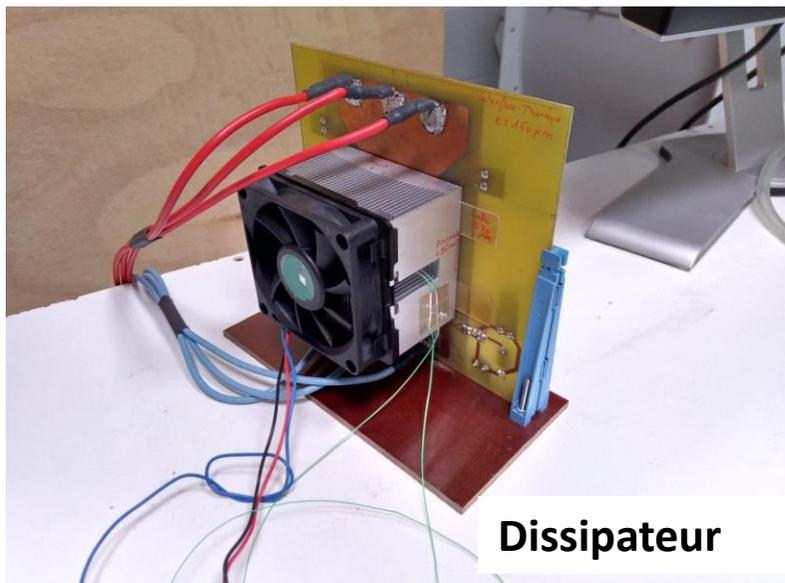


Variation de la température à la surface de composant mesurée par la caméra Infrarouge

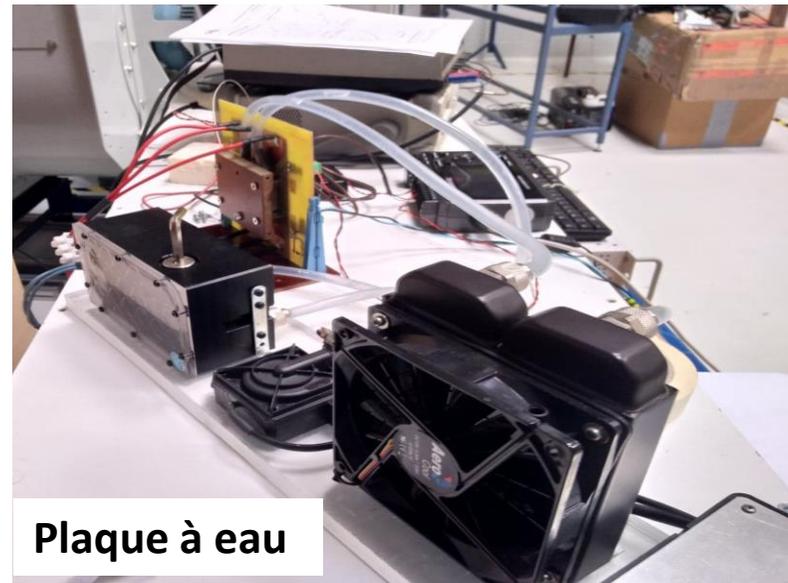


Température de jonction calculée en fonction du courant

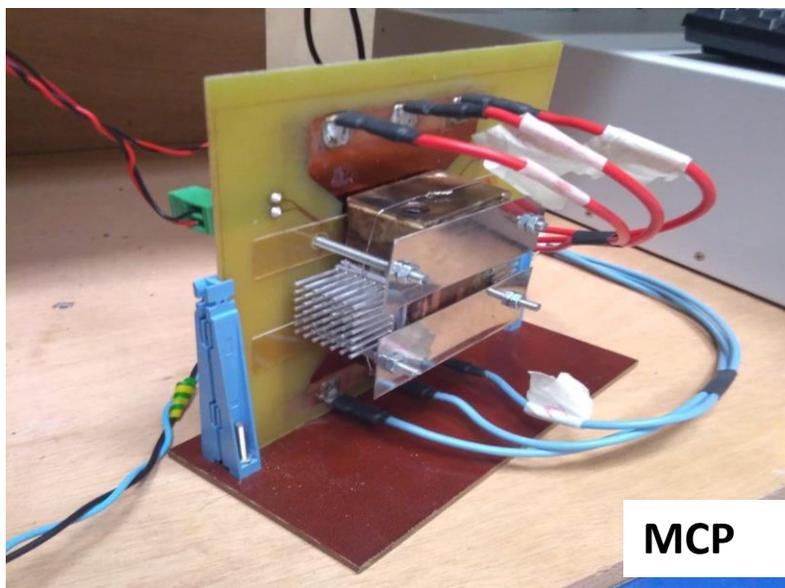




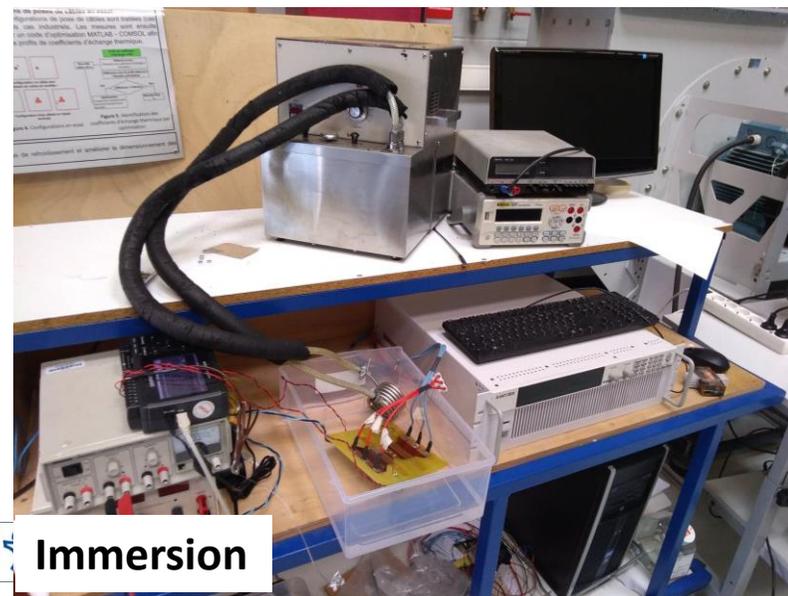
Dissipateur



Plaque à eau

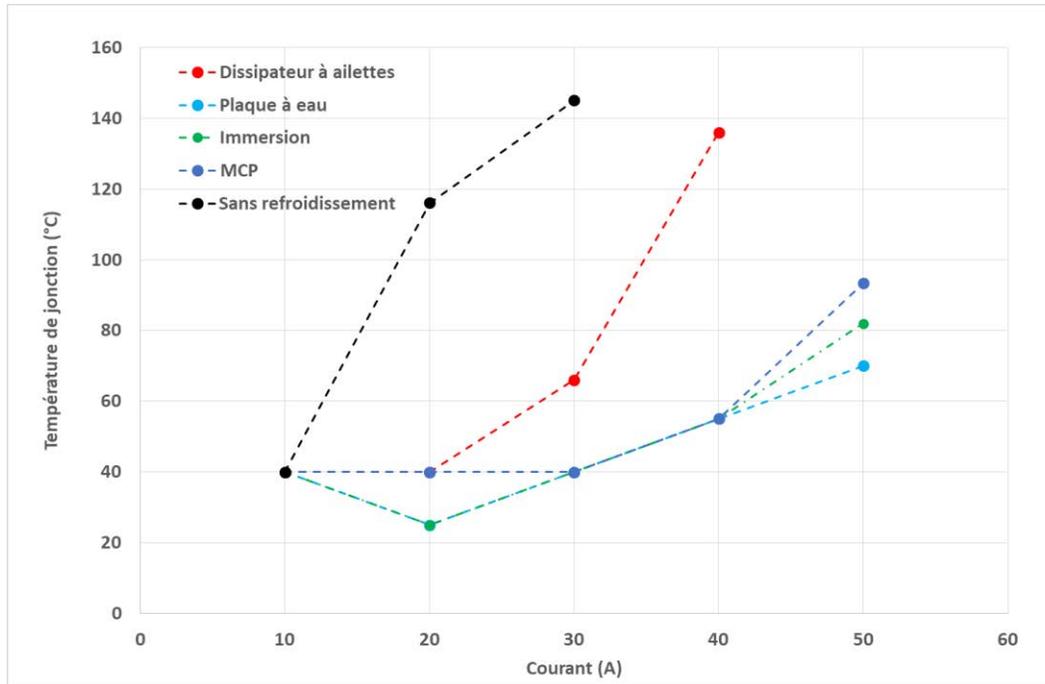


MCP



Immersion

Température de jonction pour les différents technologies de refroidissement



- Les résultats sont cohérents avec ceux réalisés avec le bloc chauffant
- Pour le dissipateur, la température de jonction atteint rapidement les limites (à 50 A le composant est détruit),
- La plaque à eau ainsi que l'immersion présentent de meilleures performances,
- Le MCP, système totalement passif, est une solution prometteuse

Dissipateur à ailettes et ventilateur : détruit à 50 A

Plaque à eau : Température de jonction 70°C à 50 A

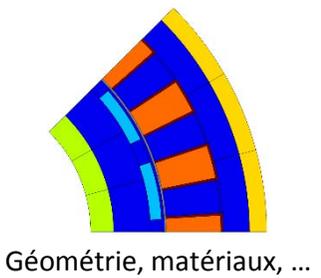
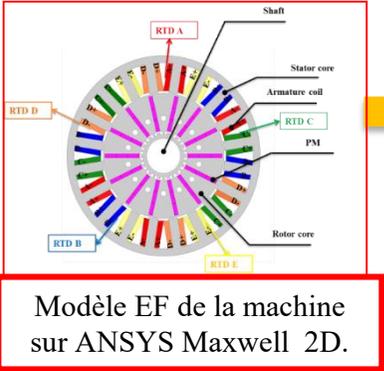
Immersion dans le liquide diélectrique : Température de jonction 82°C à 50 A

MCP paraffine : Température de jonction 93,3°C à 50 A (après 480 s)

Partie 2

- ❑ **Prise en compte de l'évolution des pertes en fonction de la température**
- ❑ **Simulations de modes dégradés et comparaison avec les essais expérimentaux**

Simulation
Aérothermique
des
Machines
Electriques

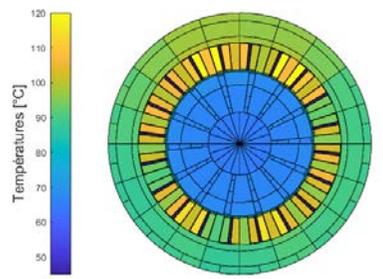


Méthodes d'optimisation

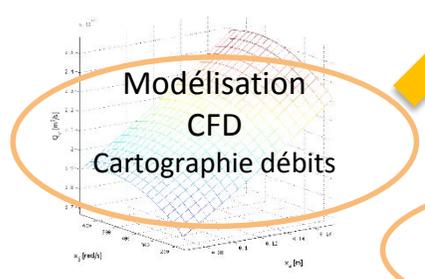
Pertes (calculées à température ambiante)

SAME
Méthode nodale

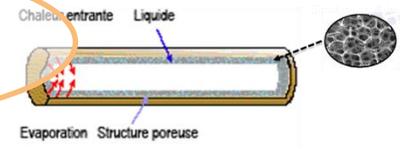
Températures



$P=f(T)$



Modèles de refroidissement convection, jets, MCP, immersion, caloduc, boucles diphasiques...



Prise en compte de l'évolution des pertes Joule en fonction de la température

Calcul des Pertes joules à la température ambiante ($T_0=22\text{ °C}$)

Résistivité du cuivre en fonction de la température

$$\rho_i = \rho_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

$$\Delta T = (T_i - T_0)$$
$$\alpha = 3.9 \times 10^{-3} K^{-1}$$

Injection des pertes cuivre dans le code SAME

$$P(T_i) = P(T_0) \times (1 + \alpha(T_i - T_0))$$

Calcul de la température dans les parties « cuivre » de la machine à partir du code SAME

Test de Convergence ??
On fait un test de convergence en température entre T_i et T_{i-1}

Oui

Arrêt

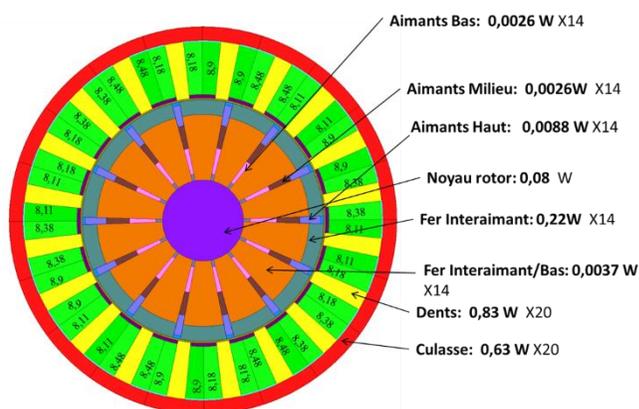
No
n

Mise à jour des valeurs des pertes cuivre uniquement (les valeurs des pertes fer et aimants restent les mêmes).

Dans cette étape, les pertes cuivre dans chaque phase sont calculées de nouveau en prenant en compte les nouvelles valeurs des températures calculées dans cette itération numéro i . En effet, pour chaque phase (ou maille de cuivre), les nouvelles valeurs pertes $P_j(T_i)$ à la température T_i sont calculées à partir des pertes à la température T_0

Exemple Mode M1 (mode sain)

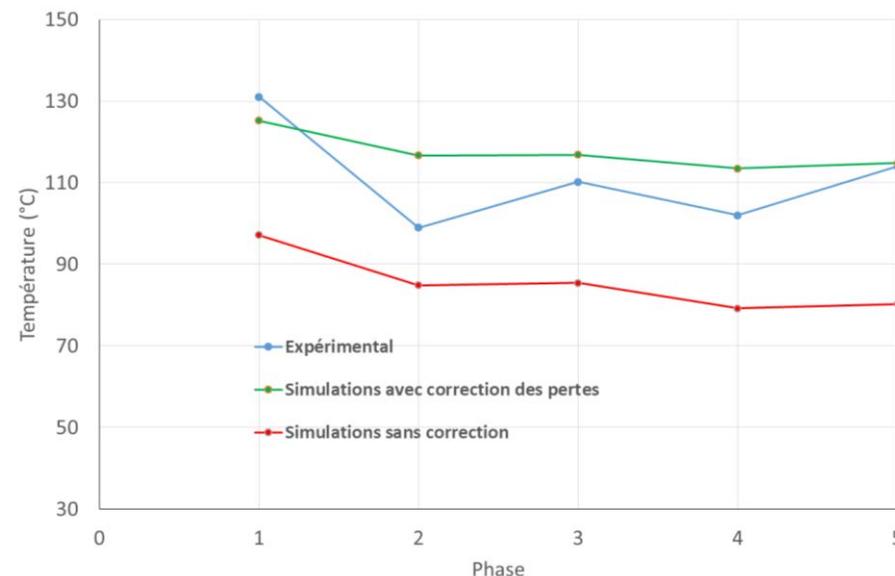
Couple : 20N,m ; 750 rpm



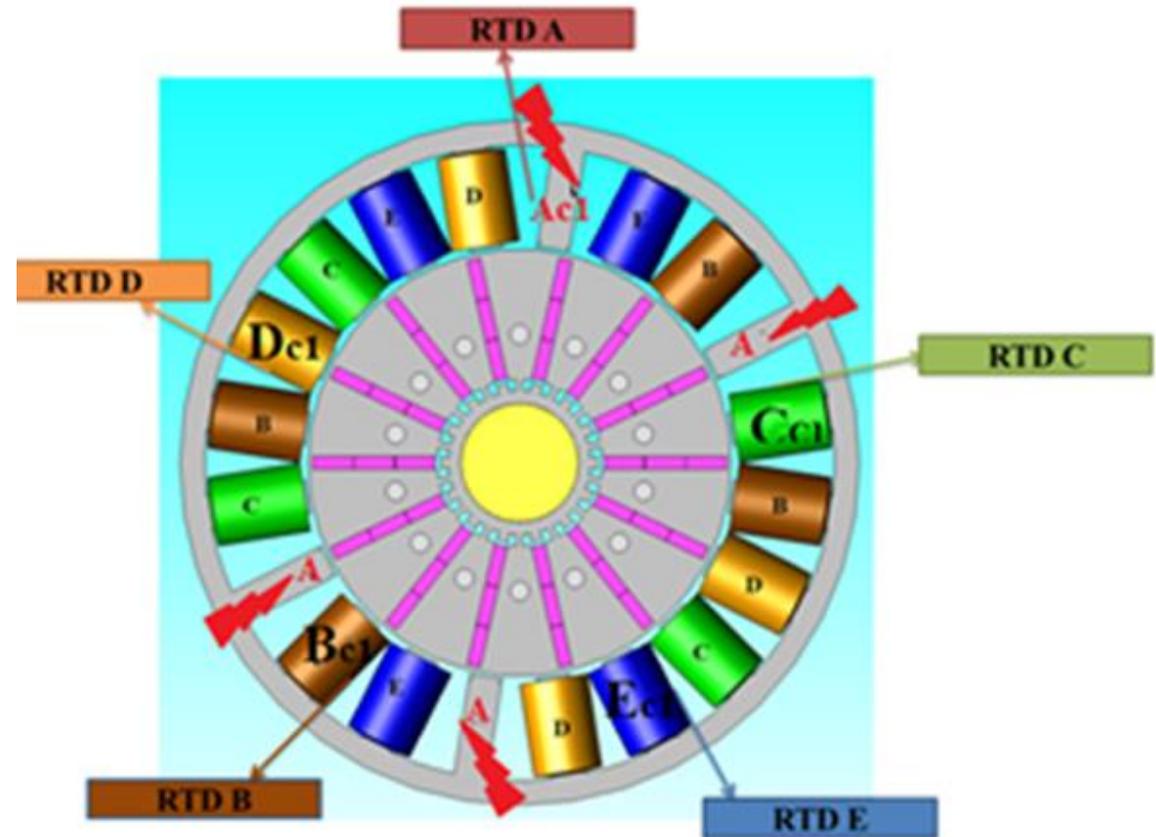
Pertes totales Rotor = 3,8 W
 Pertes totales Stator = 29,2 W
 Pertes totales Cuivre (bobines) = 337 W

Phase	Mesures	Simulations (avec correction en pertes)	Simulations (sans correction en pertes)
1	131	125,2	97,2
2	99	116,7	84,9
3	110,2	116,8	85,4
4	102	113,5	79,2
5	114	114,8	80,3

Comparaison avec et sans correction

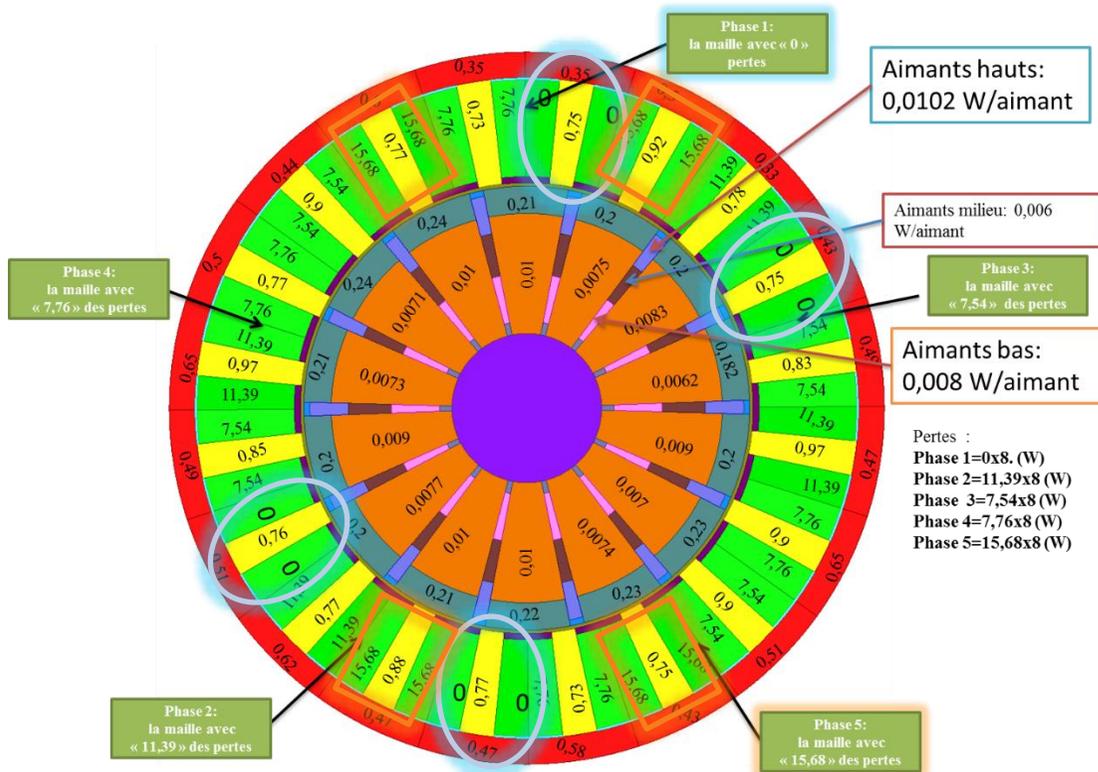


- Pour des machines « redondantes » (augmentation du nombre de phases de la machine $n > 3$), en cas de défaut sur une phase, la machine peut toujours fonctionner sous un mode « dégradé »
- Distribution non régulière des pertes dans la machine,
- Nécessité de suivre et prédire le comportement thermique de la machine sous ce mode,



Cartographie des pertes mode dégradé M2

Mode dégradé M2, 750 rpm, Couple= 27,72 N.m

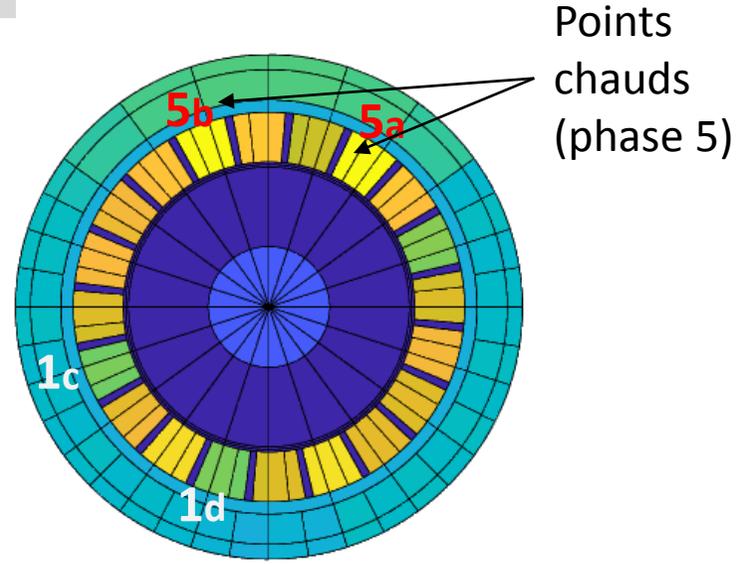
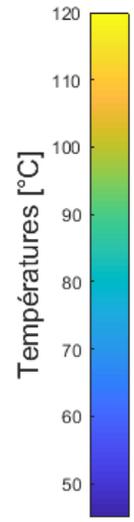
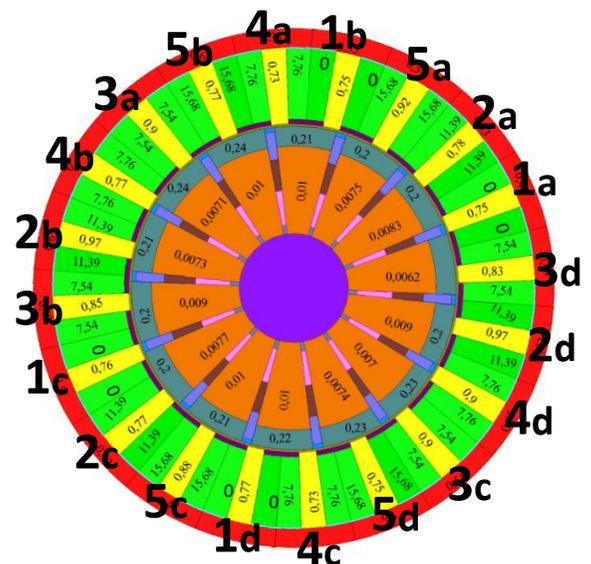


- Distribution non homogène des pertes dans la machine,
- Défaut phase I → pertes dans la phase I=0
- Pertes totales cuivre (bobines) = **339 W**

Pertes faibles : Phase 1

Pertes élevées : Phase 5

Cartographie des températures



Section têtes des bobines 1

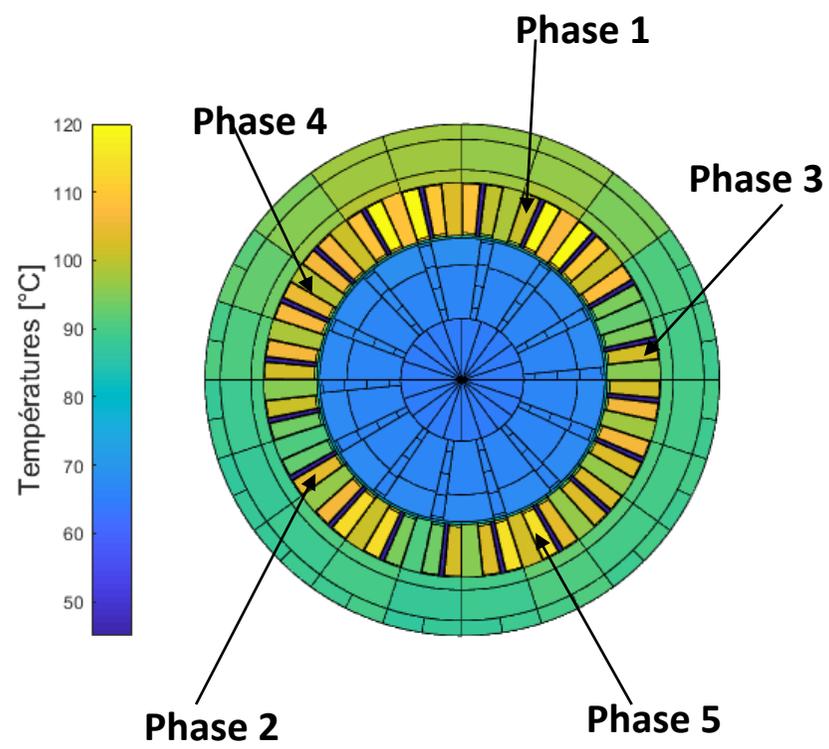


- Distribution de température non homogène suivant le niveau des pertes et l'échange avec l'extérieur
- Température maximale en positions 5a et 5b correspondant aux pertes joules maximales et emplacement le moins refroidi (partie haute de la machine)
- Température minimale en positions 1c et 1d correspondant aux pertes joules nulles et emplacement refroidi de la machine (ailettes extérieures)

■ Température (C) ■ Pertes Joules (W)



Comparaison Modélisation / Essais



Section Rotor/Stator

Température en °C

Phase	Experimental	Simulations	ΔT
1	119,73	105,5	14,23
2	109,35	110,2	0,85
3	106,35	105,4	0,95
4	108,65	108,1	0,55
5	128,01	117,4	10,6

Refroidissement du convertisseur

- ❑ Plusieurs technologies de refroidissement actifs et passifs ont été testées pour deux configurations : bloc de chauffe et composants GaN;
- ❑ Les résultats obtenus pour le bloc chauffant sont en cohérents avec ceux des GaN;
- ❑ Pour le dissipateur, la température de jonction atteint rapidement les limites d'intégrité (à 50 A le composant est détruit);
- ❑ La plaque à eau et l'immersion présentent les meilleures performances,
- ❑ Le MCP combiné avec des ailettes (un système totalement passif) est une solution prometteuse en régime transitoire.

Code SAME

- ❑ L'évolution des pertes en fonction de la température a été intégré dans le code SAME;
- ❑ Plusieurs modes dégradés ont été simulés. Les résultats numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux;