



**HAL**  
open science

## Comportement thermique d'une spire utilisée comme dispositif d'excitation magnétique pour obtenir des dispositifs à lignes coplanaires accordables

B. Sauviac, Abakar Ibet Chaib, Baraka Mahamout Mahamat, Dagal Dari Yaya, Mariam Podda Abouna

### ► To cite this version:

B. Sauviac, Abakar Ibet Chaib, Baraka Mahamout Mahamat, Dagal Dari Yaya, Mariam Podda Abouna. Comportement thermique d'une spire utilisée comme dispositif d'excitation magnétique pour obtenir des dispositifs à lignes coplanaires accordables. 17èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Tours, GREMAN; CEA Le Ripault, Apr 2023, TOURS, France. hal-04059169

**HAL Id: hal-04059169**

**<https://hal.science/hal-04059169v1>**

Submitted on 5 Apr 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.

## Comportement thermique d'une spire utilisée comme dispositif d'excitation magnétique pour obtenir des dispositifs à lignes coplanaires accordables.

A. IBET CHAIB<sup>2</sup>, M. PODDA ABOUNA<sup>2</sup>, B. MAHAMOUT MAHAMAT<sup>2</sup>, D. DARI YAYA<sup>2</sup> and B. SAUVIAC<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Jean Monnet Saint-Etienne, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, SAINT-ETIENNE, France

<sup>2</sup> Institut National Supérieur des Sciences et Techniques d'Abéché, Tchad  
e-mail : walibet01@gmail.com

**Résumé** – Les premiers résultats de l'association d'une spire et d'une ligne coplanaire sur lequel est déposée une goutte magnétique de ferrite ont permis de montrer l'impact des dimensions de la ligne sur le champ rayonné par la spire. L'objectif de notre travail actuel est d'étudier le comportement thermique de la spire en tant que dispositif d'excitation magnétique. Dans ce travail, nous présentons l'influence des paramètres géométriques de la spire sur la température d'échauffement produite par le courant d'excitation.

### I. INTRODUCTION

Dans la littérature, de nombreux auteurs ont étudié la possibilité de rendre les dispositifs accordables en fréquence [1] dans le domaine des télécommunications. Les approches sont variées (MEMS [2], éléments actifs [3], film ferroélectrique [4]) mais l'utilisation de propriétés magnétiques pour obtenir l'accordabilité souhaitée reste la voie la moins étudiée, car les difficultés sont importantes, notamment pour l'implantation de la commande. Des travaux antérieurs [5] ont abordé cette question en réalisant des composants coplanaires méta-matériaux sur des couches d'YIG (Yttrium Iron Garnet). L'agilité a été démontrée, mais couplée à des pertes importantes dans les dispositifs. En remplaçant la couche de YIG par des gouttes de particules magnétiques localisées à des endroits stratégiques, les dispositifs présentent moins de pertes, moins de désadaptation d'impédance et conservent une accordabilité comparable [6]. L'utilisation de l'agilité magnétique devient donc une voie possible pour répondre à ces problématiques mais le verrou majeur reste celui de la commande magnétique qui est difficilement miniaturisable.

C'est une difficulté majeure comparée aux autres approches car la commande de pilotage demande souvent la présence d'aimants permanents, voire d'électro aimant extérieur. Pour progresser dans cette approche, l'idée est de travailler sur des éléments localisés agiles en fréquence intégrant la commande sur la base de l'interaction entre une spire et une ligne coplanaire, comme présenté dans [7].

La spire est utilisée comme générateur réglable du champ magnétique statique. La figure 1a présente l'ensemble de la structure d'étude où une ligne coplanaire est réalisée sur un substrat en alumine placé au-dessus d'une boucle circulaire (figure 1b) en cuivre elle aussi déposée sur un substrat en alumine.

L'aimantation magnétique nécessite généralement des courants importants qui vont générer un échauffement dans la spire ce qui tend à réduire les performances et peut

conduire à la destruction du circuit. Ainsi, une mauvaise gestion du flux de chaleur a un impact néfaste sur la fiabilité et le bon fonctionnement de système électronique. Il est donc impératif de mener des études afin connaître l'évolution de la température dans la spire.

Dans cet article, nous présentons les travaux menés sur l'influence de différents paramètres géométriques en fonction de courant d'excitation. L'objectif visé est d'optimiser le comportement de la température pour limiter le courant d'excitation à une valeur acceptable pour ne pas atteindre la température de fusion du cuivre ou de ne pas faire décoller le cuivre du substrat.

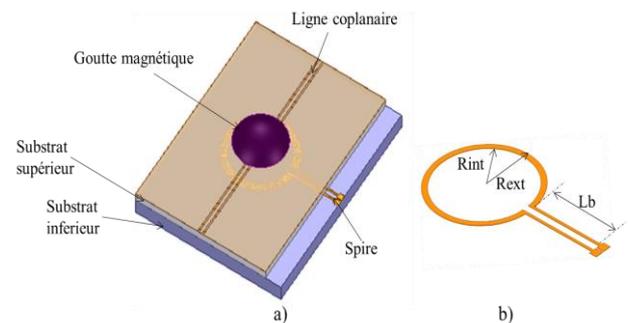


Figure 1. a) Dispositif d'étude (ligne coplanaire face avant ; spire face arrière). Une goutte magnétique est déposée en interaction avec la ligne coplanaire ; b) Spire placée sur le substrat inférieur (épaisseur de conducteur  $e_c = 5\mu\text{m}$ ,  $R_{int} = 0,9\text{mm}$ ,  $R_{ext} = 1\text{mm}$ ,  $L_b = 1,41\text{mm}$ ).

### II. EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS

L'objectif de cette partie est d'étudier le comportement thermique de la spirale en fonction du temps afin de pouvoir choisir les dimensions acceptables pouvant supporter un courant d'injection à la limite de notre étude.

Pour cela, une simulation de cette structure a été faite sous COMSOL. Les dimensions de la spire retenues sont : épaisseur des conducteurs  $e_c = 20\mu\text{m}$ , épaisseur du substrat  $e_{psub} = 500\mu\text{m}$ , largeur des conducteurs  $l_{cond} = 100\mu\text{m}$ . Le courant d'injection est de 1A.

La figure 2 présente une cartographie de la température à la surface de la structure. Sur cette figure les zones rouges représentent des températures supérieures à  $80^\circ\text{C}$ .

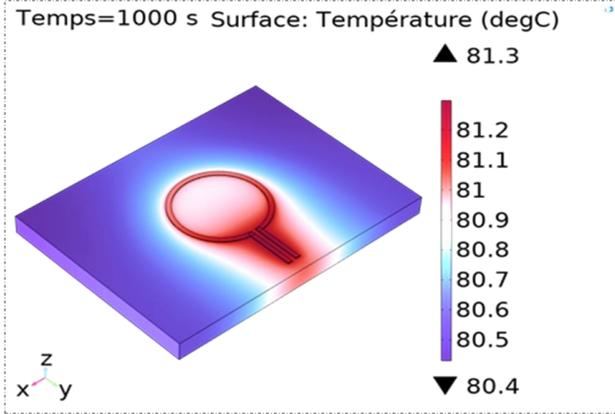


Figure 2 : Distribution de la température d'une spire réalisée sur un substrat en alumine alimentée par un courant de 1A.

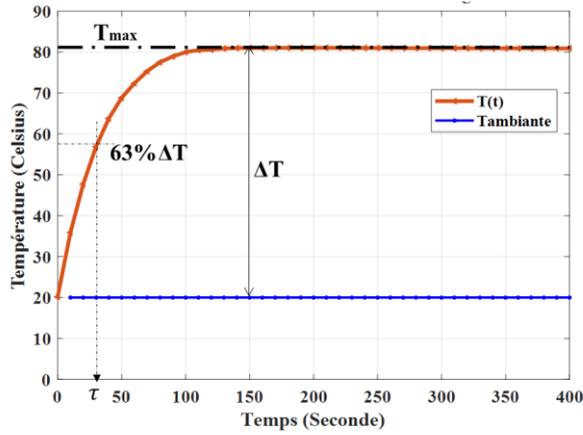


Figure 3 : Réponse de la température en fonction du temps. Épaisseur de métallisation  $e_c = 20\mu\text{m}$  et courant injecté  $I = 1\text{A}$ .

L'évolution de la température en fonction du temps pour un courant de 1A est donnée par la figure 3. Cette figure montre que la température augmente de façon très rapide en fonction du temps entre 0 à 120s et se stabilise au-delà de 120s à une valeur de 81°C comme le montre la cartographie sur la figure 2. Cette évolution se comporte donc comme une fonction de transfert du premier ordre.

La constante de temps caractérisant cette fonction est déterminée à 63% de la valeur de la variation de température.

#### A. Evaluation de pertes par effet Joule

Le courant circulant dans la structure pour un courant de 1A dégage une quantité de chaleur déterminée à partir des pertes par effet Joule ( $P_j$ ). Ces pertes sont déterminées par la relation suivante :

$$P_j = R_{DC} * I^2 \quad (1)$$

$$\text{avec } R = \frac{\rho L_s}{S} \quad \text{et} \quad S = L * e_c \quad (2)$$

Où :

$\rho$  est la résistivité des pistes ( $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ )

$L_s$  est la longueur de la spirale (8,8mm)

$L$  est la largeur de piste de la spirale ( $100\mu\text{m}$ )  
 $e_c$  est l'épaisseur de cuivre déposé ( $20\mu\text{m}$ )

Les pertes Joule pour différentes épaisseurs du cuivre ont été calculées et sont reportées dans le tableau 1.

TABLEAU 1 : PERTES JOULE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR DU CUIVRE POUR UN COURANT DE 1A

Épaisseur $e_c$ ( $\mu\text{m}$ )	5	10	20	30	40	50
Pertes Joule (mW)	300	150	75	50	37	30

#### B. Caractéristiques thermiques de la structure

La résistance thermique et la capacité thermique de la structure sont déterminées à partir des relations suivantes :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_j} \quad \text{et} \quad C_{th} = \rho * C_p * S * e_c \quad (3)$$

où

$R_{th}$  : Résistance thermique ( $^{\circ}\text{C}/\text{w}$ ) ;

$C_{th}$  : Capacité thermique ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ ) ;

$\rho$  : Masse volumique du matériau ( $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) ;

$C_p$  : Chaleur spécifique du matériau ( $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) ;

$S$  : Section ( $\text{m}^2$ ) ;

$e_c$  : Épaisseur (m).

L'utilisation des données de notre structure permet ainsi d'obtenir les caractéristiques thermiques. Pour le cas d'une épaisseur de métallisation de  $20 \mu\text{m}$  et un courant d'injection de 1A, on obtient les caractéristiques données dans le tableau 2.

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES THERMIQUES

Courant (A)	Puissance dissipée (mW)	Résistance thermique ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )	Capacité thermique ( $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ )
1	75	829	$3,48 \cdot 10^{-2}$

A l'aide des données précédentes, la température peut être déterminée analytiquement à partir de la formule suivante ([8] et [9])

$$T(t) = T_{amb} + P_j R_{th} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4)$$

Avec

$T_{amb}$  : Température ambiante ( $20^{\circ}\text{C}$ ) ;

$P_j$  : Pertes par effet joule (J) ;

$t$  : temps (s) ;

$\tau = R_{th} C_{th}$  : Constante de temps

Les résultats sont en conformité avec la température obtenue par simulation. On note en effet, sur la figure 4, un très bon accord entre ce modèle et les résultats de simulation précédents.

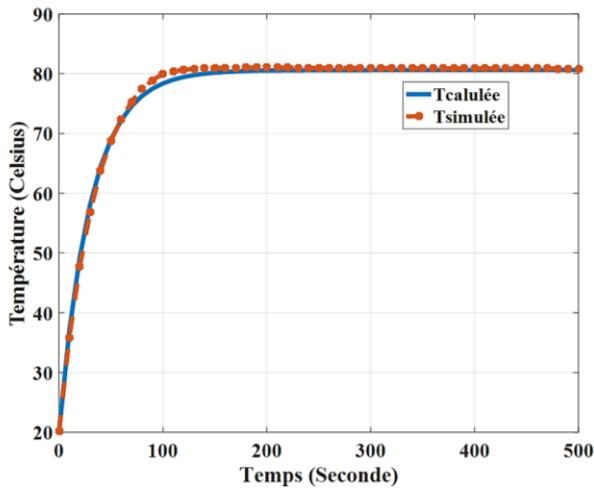


Figure 4 : Elévation de la température en fonction du temps : comparaison calcul analytique et simulation. Épaisseur de métallisation  $e_c = 20\mu\text{m}$  et courant injecté  $I = 1A$ .

### III. INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES

Dans le but d'étudier la variation de la température du cuivre en fonction du temps, des simulations ont été faites en régime transitoire. Les paramètres étudiés sont l'épaisseur du cuivre ( $e_c$ ) et ( $L$ ) la largeur des pistes du cuivre.

Ainsi, l'étude des paramètres géométriques de la spire a permis de montrer que l'augmentation de ces paramètres permet d'atténuer la température, ce qui permet donc de choisir les dimensions raisonnables pour la réalisation de cette spirale. Les résultats donnant l'influence de ces paramètres sur la température sont présentés sur les figures 5 et 6. Ces études paramétriques, montrent des variations cohérentes avec les attendus. Elles vont ensuite permettre de choisir le meilleur compromis entre encombrement et performances thermiques.

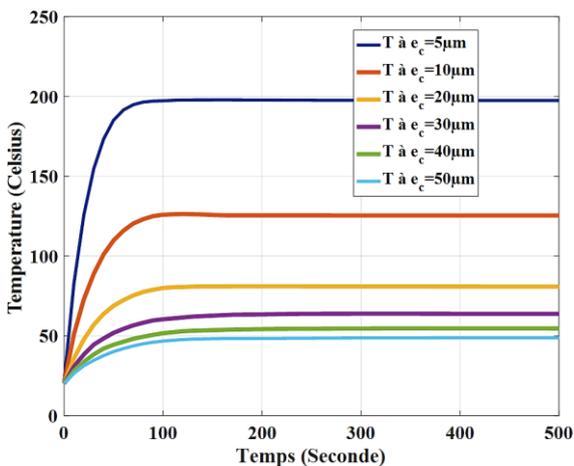


Figure 5 : Elévation de la température en fonction du temps pour différentes épaisseurs de métallisation ( $e_c$ ) pour une largeur de piste fixe  $L = 100\mu\text{m}$ . Le courant injecté est toujours fixé à  $I = 1A$ .

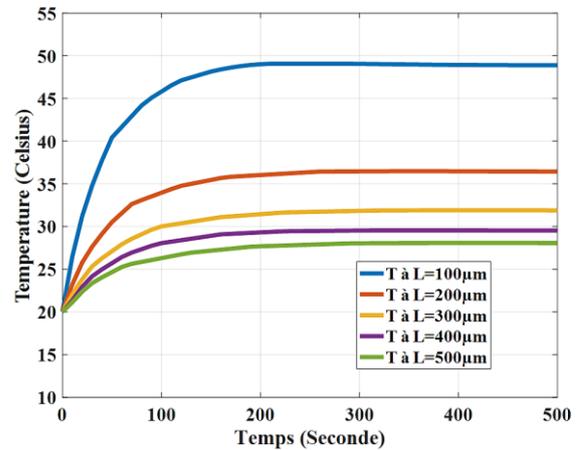


Figure 6 : Variation de la température en fonction du temps pour différentes largeur de piste fixe ( $L$ ). L'épaisseur de métallisation ( $e_c = 50\mu\text{m}$ ). Le courant injecté est toujours fixé à  $I = 1A$ .

### IV. EVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU COURANT D'EXCITATION

Dans cette partie nous étudions le comportement de la température en fonction du courant pour différentes épaisseurs. Pour chaque cas nous faisons varier le courant de 0 à 2A avec un pas 0,1A. L'évolution de la température en fonction du courant est présentée par la figure 7.

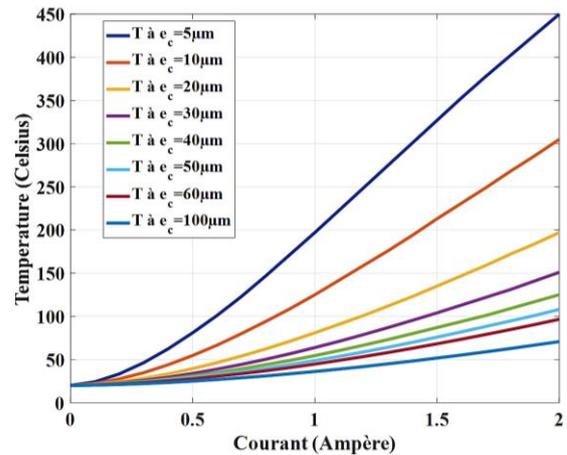


Figure 7 : Température maximale en fonction du courant pour différentes épaisseurs. La largeur de piste est fixée à  $L = 100\mu\text{m}$ .

Les résultats de cette étude montrent que la température maximale évolue de manière parabolique en fonction du temps. Cela peut s'expliquer par le fait que la température est fonction des pertes joules et que ces pertes sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

Cette étude permet de choisir la valeur limite du courant d'injection. Ainsi donc pour une épaisseur de  $100\mu\text{m}$  et une largeur de  $100\mu\text{m}$ , l'étude montre que la température restera au voisinage de  $70^\circ\text{C}$  pour un courant de 2A (figure 8). Nous pouvons donc tirer de ces différentes études la plage de courant d'injection convenable donnant une température raisonnable.

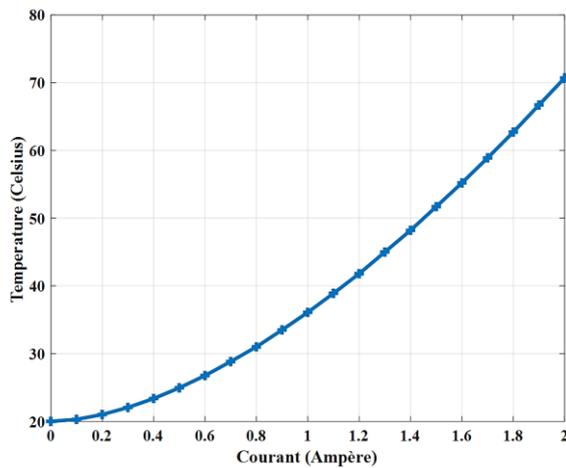


Figure 8 : Température maximale en fonction du courant injecté pour une largeur de piste de  $L = 100\mu\text{m}$  et une épaisseur de  $e_c = 100\mu\text{m}$ .

## V. DIMENSIONNEMENT DE LA SPIRE

La spire à utiliser pour le système d'aimantation est présentée sur la figure 9.

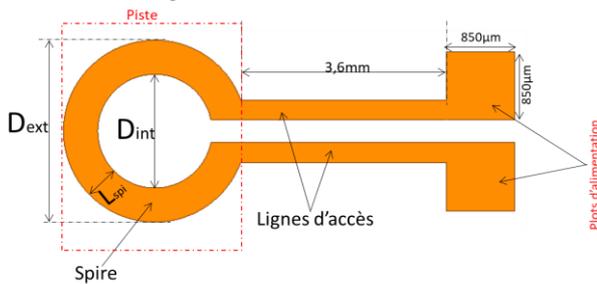


Figure 9 : Dispositif d'excitation à réaliser

Le diamètre de la spire a été choisi pour être en capacité de générer spatialement le champ magnétique souhaité [7]. La taille des plots d'alimentation dépend du système de connexion de la source de courant et les lignes d'accès ont une longueur permettant de placer le dispositif sous la ligne coplanaire (figure 1) toute en gardant les plots accessibles pour la source de courant.

Sur la base des études menées précédemment, nous pouvons donc clairement définir des dimensions minimales à ne pas dépasser pour éviter l'échauffement excessif lors de la mise en fonctionnement du dispositif.

Afin de permettre de passer plus facilement à la phase de prototypage, nous avons tracé la figure 10. Sur cette courbe, nous avons repéré les plages de dimensions possibles (couple épaisseur, largeur de piste) selon le niveau du courant d'alimentation souhaité. Les zones de couleurs représentent les plages de courant acceptables pour l'alimentation de la spire.

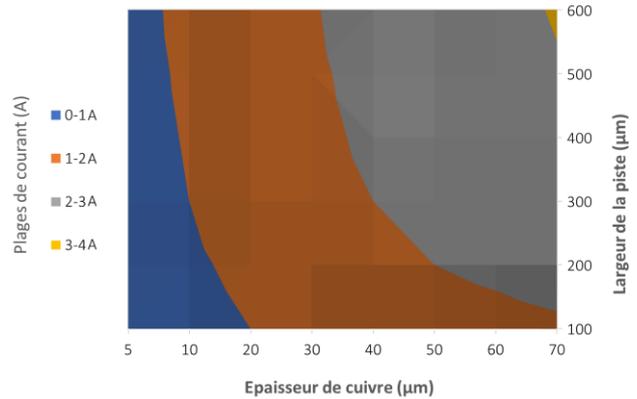


Figure 10 : Dimensions possibles des pistes pour conserver une température inférieure à  $70^\circ\text{C}$ , selon le courant d'injection souhaité.

## VI. CONCLUSION

Les travaux présentés montrent les résultats d'études sur le comportement thermique d'une commande intégrée en proximité d'une ligne coplanaire sur un substrat d'alumine. Les dimensions pour la réalisation de la spire doivent être choisies en fonction du comportement de la température afin de ne pas détériorer le dispositif. Le choix des dimensions des pistes d'accès va ainsi donner un courant maximum à ne pas dépasser, ce dernier influant ensuite directement sur le champ maximum d'aimantation accessible.

## VII. REFERENCES

- [1] B. Sauviac, "Metamaterials and Wave Control (Chapter 2 : MetaLines: Transmission Line Approach for the Design of Metamaterial Devices) ", editeurs : E. Lheurette , édition : Wiley-ISTE , pp. 43-66, 2013.
- [2] J. Perruisseau-Carrier, T. Lisecand A.K. Skrivervik, "Circuit model and design of silicon-integrated CRLH-TLS analogically controlled by MEMS", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 48: 2496-2499. 2006.
- [3] A. Vélez, J. Bonache, F. Martín, "Varactor-Loaded Complementary Split Ring Resonators (VLCSRR) and Their Application to Tunable Metamaterial Transmission Lines" *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE , vol.18, no.1, pp.28-30, Jan. 2008.
- [4] G. Houzet, X. Mélique, D. Lippens, L. Burgnies, G. Velu, and J.-C. Carru, "Microstrip Transmission Line Loaded by Split-Ring Resonators Tuned by Ferroelectric Thin Film", *Progress In Electromagnetics Research C*, Vol. 12, 225-236, 2010.
- [5] A. Zermene, B. Sauviac, B. Bayard, B. Payet-Gervy, J.J Rousseau and A. Benghalia , "Experimental verification of tunable property of a zeroth-order resonator on ferrite substrate ", *Microwave Optical and Technology Letters* , vol. 56, N° 12, pp. 2805-2809, december 2014.
- [6] B. Mahamout Mahamat, B. Sauviac, «Tunability of CRLH metamaterial components using magnetic sol-gel », *European Microwave Conference (EuMC)*, 2015, p. 1108-1111.
- [7] A. Ibet Chaib, B. Mahamout Mahamat, D.D Yaya and B. Sauviac, « Interaction entre une ligne coplanaire et le champ magnétique rayonné par une spire circulaire », *XIIèmes Journées Nationales Microondes*, 8-10 juin 2022 – Limoges.
- [8] J. Dorkel, «Semi-conducteurs de puissance problèmes thermiques», *Techniques de l'ingénieur* (2001).
- [9] P.R. Wilson, J.N. Ross, and A.D. Brown. "Simulation of magnetic component models in electric circuits including dynamic thermal effects." *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 17, no 1, p. 55-65, 2002