

Défis et Innovations en Thermique des Semi-Conducteurs WBG : Modélisation Dynamique et Validations Expérimentales

Mohammed Riadh BERRAMDANE^{1-2*}, Alexandre BATTISTON¹, Michele BARDI¹, Nicolas BLET², Benjamin REMY², Matthieu URBAIN²

¹ IFP Energies nouvelles, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil Malmaison, France
Institut Carnot IFPEN Transports Energie

²Laboratoire Energies et Mécanique Théorique et Appliquée – Université de Lorraine, Centre National de la Recherche Scientifique

2 Av. de la Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

*(auteur correspondant : mohammed-riadh.berramdane@ifpen.fr)

Résumé - Face aux défis de la gestion thermique dans les semi-conducteurs à large bande interdite (WBG), notre étude a d'abord consisté en une simulation FEM en régime permanent pour extraire un modèle thermique permettant d'évaluer le comportement du composant en régime dynamique. Pour améliorer cette prévision, nous avons ensuite estimé la température en utilisant la même simulation FEM, mais avec l'approche ARX. Cette méthode innovante a finalement été validée par des résultats expérimentaux, démontrant son efficacité dans la prédiction précise de la température.

Nomenclature

A_{eff}	surface effective, m^2	T	température, K
a	longueur, m	R_{th}	résistance thermique, $\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
b	largeur, m	C_{th}	capacité thermique spécifique, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
d	épaisseur, m	ρ	densité, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
λ	conductivité thermique, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	e	erreur

1. Introduction

Dans le secteur de l'électronique de puissance, l'avènement des semi-conducteurs à large bande interdite (WBG) a introduit des défis inédits, principalement en termes de gestion thermique. Ces composants, fonctionnant à des fréquences de commutation élevées et sous des courants intenses, génèrent des densités de pertes significatives (la quantité de puissance perdue par unité de volume), entraînant une augmentation critique de la température de jonction [1],[2]. Un aspect particulier de ces semi-conducteurs est leur épaisseur, mesurée en micromètres (μm), qui, combinée à l'épaisseur des cartes électroniques de puissance sur lesquelles ils sont montés, pose un défi considérable pour les simulations thermiques. De plus, l'accès aux données précises sur les propriétés physiques des matériaux est souvent difficile, ajoutant un niveau supplémentaire de complexité.

Pour relever ces défis, notre étude propose une méthode innovante basée sur la simulation en éléments finis (FEM) en régime permanent. Cette approche vise à élaborer un modèle nodal RC détaillé, capable de reproduire le comportement dynamique des semi-conducteurs WBG et de leur environnement sur la carte électronique. En outre, nous explorons l'utilisation de modèles autorégressifs à variables exogènes (ARX) pour une estimation encore plus précise, sans tenir compte des disparités d'épaisseur des composants et des propriétés physiques des matériaux.

2. Modèle Thermique Dynamique Basé sur une Simulation FEM en Régime Stationnaire

2.1. Problématique

Dans le domaine de l'électronique de puissance, une modélisation précise du comportement thermique des semi-conducteurs est essentielle pour optimiser leur performance et leur fiabilité. Parmi les modèles de réseau thermique RC utilisés, le modèle de Cauer est particulièrement pertinent (figure 1) [3]. Ce modèle se distingue par l'utilisation d'éléments R-C individuels pour représenter chaque couche de matériau. Un aspect clé de ce modèle est la possibilité de formuler mathématiquement la résistance thermique R_{th} (Eq. (1)) et la capacité thermique C_{th} (Eq. (2)) [3]. Cependant, la détermination de l'angle de diffusion θ , un paramètre crucial qui influence directement R_{th} et C_{th} , est complexe. L'hypothèse standard d'un angle de diffusion (un angle qui quantifie la manière dont la chaleur se répand à partir d'une source de chaleur dans un matériau (figure 2)) de 45 degrés largement utilisée dans l'état de l'art pour calculer la surface effective A_{eff} (Eq. (3)) qui réfère à la taille de la zone à travers laquelle la chaleur est dissipée dans le semi-conducteur [4], bien que pratique, n'est pas toujours adaptée, en particulier dans des configurations multicouches où les propriétés comme la conductivité thermique et l'épaisseur des couches varient. Une méthode plus précise est donc nécessaire pour capturer les variations réelles et assurer une modélisation fidèle de la dissipation thermique dans ces structures multicouches complexes.

$$R_{th} = \int_0^d \frac{1}{\lambda \cdot A_{eff}(\theta)} dz \quad (1)$$

$$C_{th} = \int_0^d c_t \cdot \rho \cdot A_{eff}(\theta) dz \quad (2)$$

$$A_{eff} = (a + 2 \cdot d \cdot \tan(\theta)) \cdot (b + 2 \cdot d \cdot \tan(\theta)) \quad (3)$$

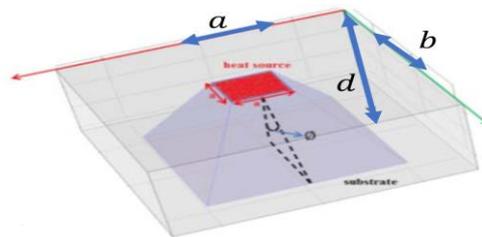
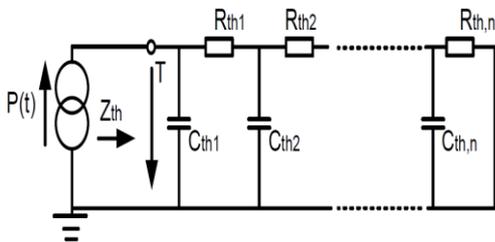


Figure 1 : Exemple de modèle de Cauer [5]. Figure 2 : Diffusion de la chaleur dans une couche [4].

2.2. Principe de la Méthode Proposée

L'objectif principal de notre méthode dans le cas présenté ici avec une seule puce (figure 3) est de déterminer précisément l'angle de diffusion, en se basant sur les valeurs de résistance thermique R_{th_FEM} (Eq. (4)) obtenues de la simulation FEM pour ensuite calculer la capacité thermique C_{th_FEM} (Eq. (2)). Cette approche est essentielle pour analyser le comportement thermique intrinsèque de la puce dans un contexte isolé. Nous commençons par extraire les variations de température à partir des simulations FEM de chaque couche, formant ainsi un vecteur de température en fonction de la distance (figure 3).

Le programme fonctionne par itérations, segmentant chaque couche en plusieurs surfaces pour calculer la température moyenne $T_{Moyenne_calculée}$ pour chacune. À partir de ces données, il calcule la résistance thermique R_{th_FEM} pour chaque surface, formant un vecteur de résistances thermiques. L'étape suivante consiste à calculer l'angle de diffusion géométrique

θ_{FEM} (Eq. (5)) associé à chaque résistance. La variation de θ_{FEM} en fonction de R_{th_FEM} est illustrée par la courbe rouge de la figure 4.

Nous identifions ensuite l'ensemble des angles analytiques θ (Eq. (1)), qui permet de retrouver les valeurs de résistance thermique calculées à partir de la simulation FEM (R_{th_FEM}) afin de tracer la courbe en bleu (figure 4). La valeur de l'angle sélectionné est calculée par minimisation de l'erreur entre les courbes FEM et analytiques et optimisée par augmentation du nombre d'itérations, pour une précision maximale.

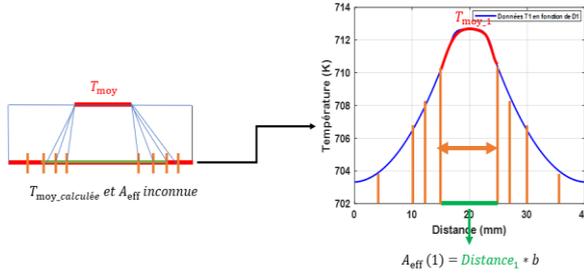


Figure 3 : schéma représentatif de la variation de la température en fonction de la distance

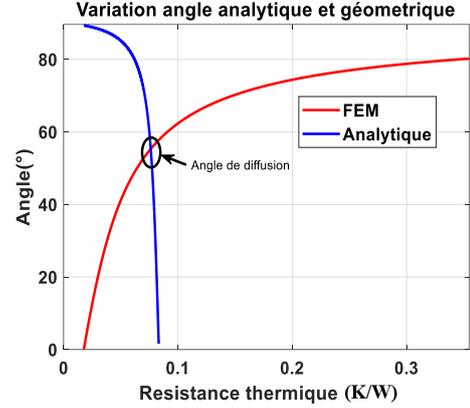


Figure 4 : Détection de l'angle de Diffusion

$$R_{th_FEM} = \frac{T_{moy} - T_{moy_calculée}}{p} \quad (4)$$

$$\theta_{FEM} = \tan^{-1} \left(\frac{Distance_{calculer} - a}{2 \cdot d} \right) \quad (5)$$

En présence de couplage thermique, où une puce adjacente affecte thermiquement la puce cible, l'approche de modélisation doit être ajustée. On suppose que l'angle de diffusion du côté non affecté par le couplage reste identique à celui obtenu sans couplage. L'angle du côté affecté par le couplage thermique est quant à lui modifié en raison de l'influence thermique mutuelle qui réduit cet angle de diffusion [6]. Les mêmes principes de la méthode établie précédemment sont appliqués, mais avec un seul angle variable (θ_{coupl}) et un angle fixe déterminé lors d'une simulation antérieure (θ_{self}), nous obtenons ainsi une nouvelle expression pour la surface effective en situation de couplage thermique (A_{eff_coupl}) (Eq. (6)).

$$A_{eff_coupl} = (a + z \cdot \tan(\theta_{self}) + z \cdot \tan(\theta_{coupl}))(b + z \cdot \tan(\theta_{self}) + z \cdot \tan(\theta_{coupl})) \quad (6)$$

2.3. Résultats de Simulation

Dans une simulation COMSOL 3D configurée pour émuler un environnement 2D, nous avons attribué une profondeur uniforme aux différentes couches et modélisé deux puces adjacentes espacées de 4 mm sur une carte électronique de puissance (figure 6), en utilisant les propriétés matérielles définies dans le tableau 1. Un système de refroidissement fixe la température de la semelle à 25 °C, et chaque puce dissipe une puissance de 50W dans un environnement à température ambiante de 25 °C. En appliquant notre méthode de modélisation, nous visons à tracer le modèle nodal RC de Caueur afin de déterminer l'évolution de la température de la couche supérieure des puces (T_j). Cette approche est comparée à une simulation COMSOL similaire, mais cette fois avec une analyse transitoire pour étudier les variations de température au cours du temps, et à un cas utilisant un angle de diffusion prédéfini de 45 degrés, pour évaluer la précision de notre méthode dans la prédiction de la température.

Couches	Épaisseur (μm)	Conductivité thermique ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$)	Capacité thermique volumique ($\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3\cdot\text{K}}$)
Sic	60	160	1.725789
Cuivre	35	380	3.4265
TIM	100	1.3	2
Aluminium	1600	210	2.45

Tableau 1 : Paramètres Pour Chaque Couche

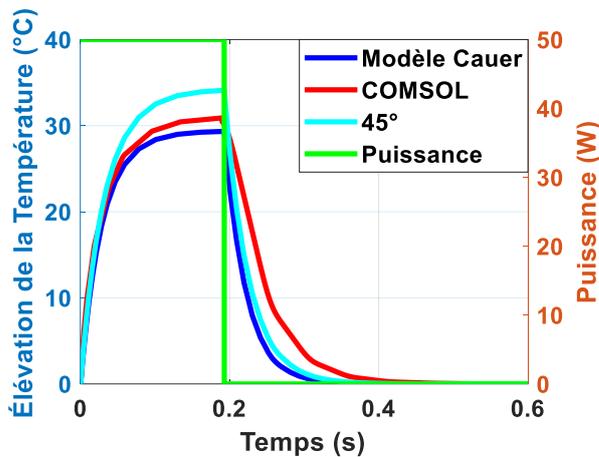


Figure 5 : Comparaison des profils de Température : Modèle thermique, COMSOL et 45°

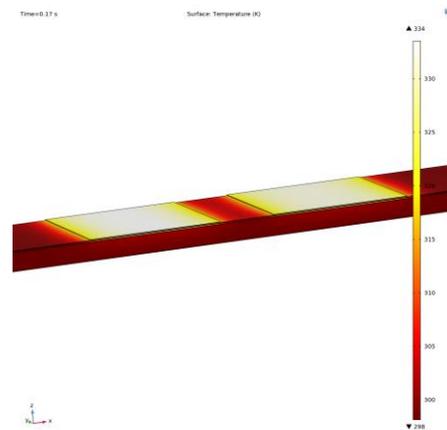


Figure 6 : Simulation Comsol

L'analyse des résultats de la figure 5 montre que la courbe générée par le modèle Cauer diffère légèrement de celle produite par COMSOL, particulièrement durant le régime transitoire, où nous observons une erreur acceptable lors de la montée de température mais qui s'accroît lors de la descente. Cette différence provient certainement d'une trop grande approximation des capacités thermiques du modèle Cauer. En termes de température maximale, notre modèle présente une erreur d'environ 5%. En comparaison, le modèle utilisant un angle de diffusion fixe à 45 degrés affiche une performance inférieure, avec une erreur estimée à 10% par rapport aux résultats COMSOL, soulignant l'importance d'une estimation précise de l'angle de diffusion. Bien que notre modèle de Cauer soit généralement fiable, ces divergences indiquent une marge pour des améliorations futures, surtout pour des applications exigeant une haute précision thermique. Il est à noter également que le modèle Cauer proposé devient complexe à construire dans un cas 3D. Il est nécessaire d'effectuer une simulation 2D dans chaque section pour extraire les angles de diffusion permettant de calculer la résistance thermique en 3D.

3. L'Approche ARX (AutoRegressive with eXogenous inputs model)

L'approche ARX est issue de la théorie du contrôle et de l'analyse des systèmes. Elle est conçue pour modéliser la relation dynamique entre les entrées u (variables exogènes) et les sorties y d'un système en rajoutant une perturbation extérieure souvent supposée être un bruit blanc e , en tenant compte des influences passées de la sortie et des entrées actuelles et passées. La formule générale d'un modèle ARX (Eq. (7)) peut être exprimée comme suit [7] :

$$y[k] = -\sum_{i=1}^{n_a} a_i y[k-i] + \sum_{i=1}^{n_b} b_i u[k-i-n_k+1] + e[k] \quad (7)$$

La variable $y[k]$ représente la valeur de la variable y à l'instant k . Δt , où Δt est un pas de temps constant. Les termes n_a , n_b , et n_k sont des entiers qui définissent respectivement l'ordre autorégressif, l'ordre exogène, et le délai d'entrée-sortie dans un modèle de système dynamique. Les paramètres a_i et b_i sont les coefficients autorégressifs et exogènes du modèle.

Dans le contexte de l'électronique de puissance, et plus précisément pour la modélisation thermique d'une puce électronique, nous pouvons conceptualiser le problème en termes de modélisation ARX, où l'excitation ou l'entrée u est représentée par la puissance P dissipée par la puce et la sortie y est la température T que nous cherchons à prédire.

$$T[k] = -\sum_{i=1}^{n_a} a_i T[k-i] + \sum_{i=1}^{n_b} b_i P[k-i-n_k+1] + e[k] \quad (8)$$

Pour déterminer les paramètres inconnus a_i et b_i du modèle ARX, nous pouvons reformuler l'équation du système sous une forme matricielle qui lie les vecteurs de température et de puissance en watts à travers une série de coefficients qui doivent être estimés.

$$\begin{matrix} \mathbf{T} & & \mathbf{\Phi} & & \mathbf{\Omega} & & \mathbf{e} \\ \begin{bmatrix} T[1] \\ T[2] \\ \vdots \\ T[N] \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} T[0] & \cdots & T[-n_a+1] & P[0-n_k] & \cdots & P[-n_k-n_b+1] \\ T[1] & \cdots & T[-n_a+2] & P[1-n_k] & \cdots & P[1-n_k-n_b+1] \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T[N-1] & \cdots & T[N-n_a] & P[N-1-n_k] & \cdots & P[N-n_k-n_b] \end{bmatrix} & \cdot & \begin{bmatrix} -a_1 \\ \vdots \\ -a_{n_a} \\ b_1 \\ \vdots \\ -b_{n_b} \end{bmatrix} & + & \begin{bmatrix} e[1] \\ e[2] \\ \vdots \\ e[N] \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$$

Dans notre contexte, la matrice de données, qui incorpore les variations de température et de puissance, peut être condensée dans une forme simplifiée Φ et Ω représente le vecteur des paramètres inconnus du système. Pour résoudre et trouver les valeurs optimales de Ω , nous employons la méthode des moindres carrés (Eq. (11)). Cette technique d'optimisation est bien établie pour minimiser l'erreur quadratique entre les données observées et celles prédites par notre modèle.

$$\mathbf{T} = \mathbf{\Phi} \cdot \mathbf{\Omega} + \mathbf{e} \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{\Omega}} = (\mathbf{\Phi}(\mathbf{T}, P)^T \mathbf{\Phi}(\mathbf{T}, P))^{-1} \mathbf{\Phi}(\mathbf{T}, P)^T \mathbf{T} \quad (11)$$

3.1. Implémentation du Modèle ARX pour la Prédiction Thermique des Semi-Conducteurs

Pour calibrer notre modèle ARX, nous soumettons le semi-conducteur à un profil de puissance menant à sa température maximale puis à son retour à l'équilibre thermique. Cette séquence sert d'entrée pour notre modèle $P_e[k]$, avec la réponse en température comme sortie $T_e[k]$. Une étape de validation suit, utilisant un nouveau profil de puissance $P_v[k]$, différent du premier, qui sollicite la puce sur plusieurs points de fonctionnement. Les prédictions de température de notre modèle $T_v[k]$ sont alors comparées aux températures attendues, permettant d'évaluer sa capacité à généraliser et à prédire précisément les températures. Il est à noter que d'autres variables, telle que la température de la semelle, peuvent également être intégrées si besoin en tant qu'entrées supplémentaires, offrant ainsi une modélisation plus précise.

Le processus de développement de notre modèle ARX commence par le traitement des données d'entraînement, où nous ajustons les données de température et de puissance en soustrayant la température ambiante pour nous concentrer sur la variation de température de la puce.

Nous définissons ensuite les intervalles des paramètres autorégressifs n_a et exogènes n_b , allant de 1 jusqu'aux valeurs maximales prédéfinies N_a et N_b , et le délai n_k variant de 0 à N_k . Pour chaque triplet possible de ces paramètres, nous calculons une solution Ω et sélectionnons le triplet qui offre le meilleur ajustement (fit) (Eq. (12)) entre la température prédite T_{ARX_e} et la température réelle observée $T_e[k]$. En tenant compte des bruits de mesure on utilise une méthode de régularisation via la décomposition en valeurs singulières SVD.

Après avoir choisi le modèle initial, nous entamons la phase de validation. Durant cette étape, nous appliquons le modèle sélectionné pour prédire la température T_{ARX_v} en fonction d'une nouvelle série de données d'entrée. Cela nous permet de vérifier si le modèle est capable de généraliser au-delà des données d'entraînement et d'éviter le surajustement en se basant uniquement sur le fit, qui pourrait amener à un bon ajustement sur les données d'entraînement mais une performance médiocre sur les données de validation. Si nous identifions un surajustement ou un mauvais ajustement durant la validation, nous revenons à l'étape de définition des paramètres, ajustant le nombre de ces derniers pour améliorer la généralisation du modèle (figure 7). Cette boucle itérative est guidée à la fois par la qualité de l'ajustement ou par le critère d'information d'Akaike (AIC), nous aidant à équilibrer la complexité du modèle et la précision de la prédiction.

$$\hat{f}_t = 100 \left(1 - \frac{|y - \hat{y}|}{|y - \text{mean}(y)|} \right) \quad (12)$$

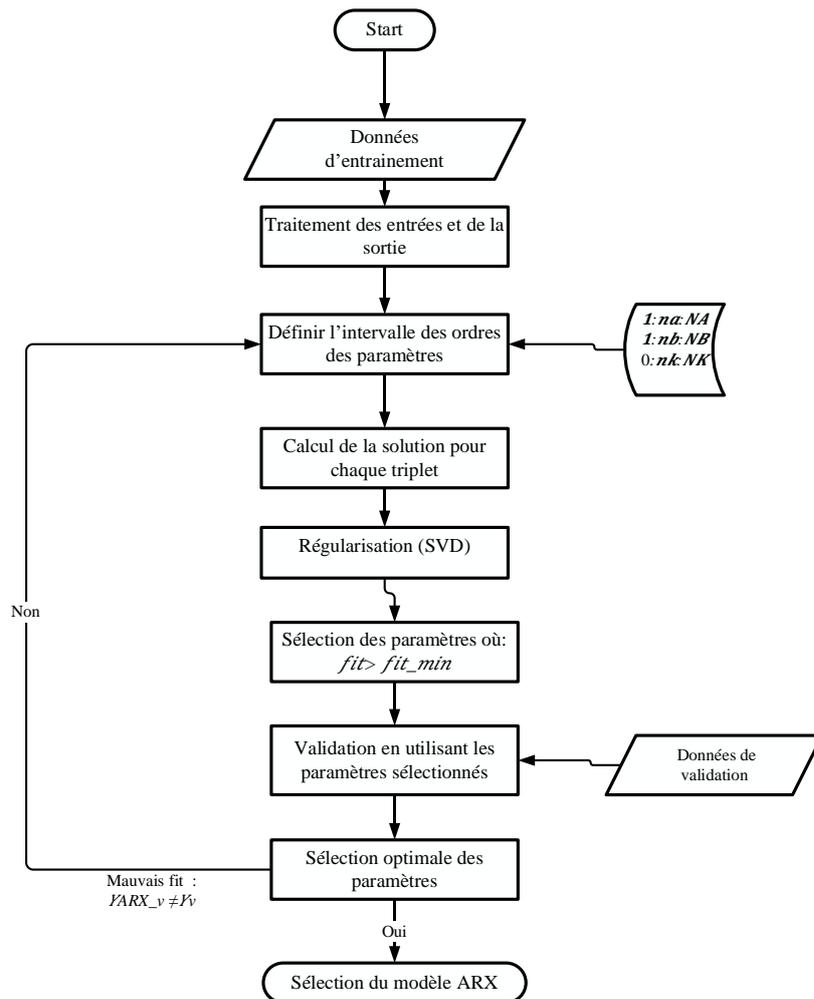


Figure 7 : Processus Itératif de Développement et de Validation du Modèle ARX

3.2. Intégration du Modèle ARX : Analyse Combinée des Simulations FEM et Validation Expérimentale

3.2.1. Simulation FEM pour la Validation du Modèle ARX

Pour la première phase d'application du modèle ARX, nous nous appuyons sur des simulations COMSOL préalablement réalisées. L'objectif est de mettre au point un modèle ARX qui prédit la température en fonction de la puissance de la puce. La puissance dissipée par la puce est utilisée en tant qu'entrée du modèle, et la sortie est définie par la température moyenne de la couche superficielle, simulant ainsi la température de jonction.

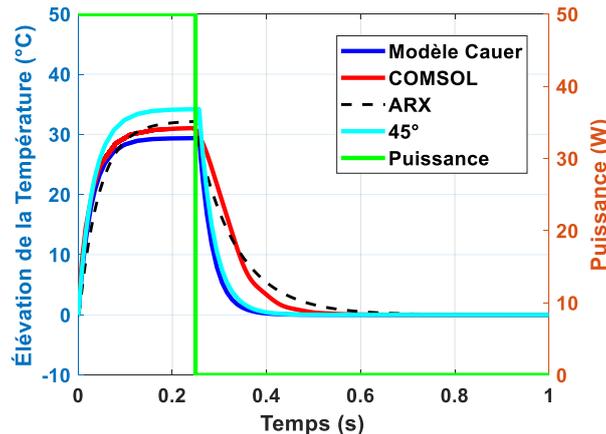


Figure 8 : Comparaison des profils de température : Modèle thermique, COMSOL et 45° et ARX

La comparaison avec les résultats précédents (figure 8) démontre l'efficacité supérieure de l'ARX à simuler les dynamiques thermiques par rapport aux modèles RC traditionnels (Ici on utilise l'identification aussi pour la validation), assurant des prédictions précises des températures pour les semi-conducteurs.

3.2.2. Phase Expérimentale : Validation du Modèle ARX en Conditions Réelles

Dans notre configuration expérimentale, nous utilisons deux cartes électroniques, chacune contenant quatre puces SiC UJ4SC075011B7S disposées en deux paires parallèles, formant ainsi un bras d'onduleur. Ces cartes sont connectées pour créer un pont en H, où la distance variable entre les puces sur les deux cartes nous permet d'explorer l'effet du couplage thermique. On s'attend à observer des variations de température en fonction de cette distance (figures 9/10).

L'élément clé de notre expérimentation est l'utilisation de capteurs de température à coefficient de température négatif (CTN) placés sur chaque carte proche de la puce SiC. Ces capteurs fournissent des données de température, essentielles pour l'utilisation du modèle ARX dans l'identification des caractéristiques thermiques des puces.

Pour simuler des conditions opérationnelles réalistes, nos composants SiC sont soumis à un courant maximal de 60A et commandés en PWM, avec une charge inductive dans une configuration de pont en H permettant l'inversion de la polarité (figure 11). Cette configuration utilise une source de tension continue de 20V et une fréquence de commutation de 15 kHz.

En plus de la configuration expérimentale décrite, nous appliquons deux profils distincts pour l'entraînement et la validation du modèle ARX. Ces profils, basés sur les mêmes principes expliqués précédemment, sont employés pour estimer la température mesurée par les capteurs CTN à partir des données de puissance appliquée aux puces.

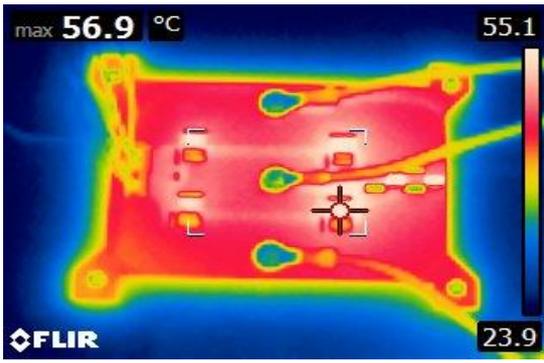


Figure 9 : Carte 1 avec puces éloignées.

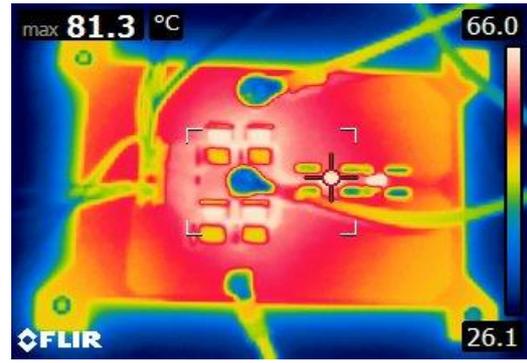


Figure 10 : Carte 2 avec puces proches

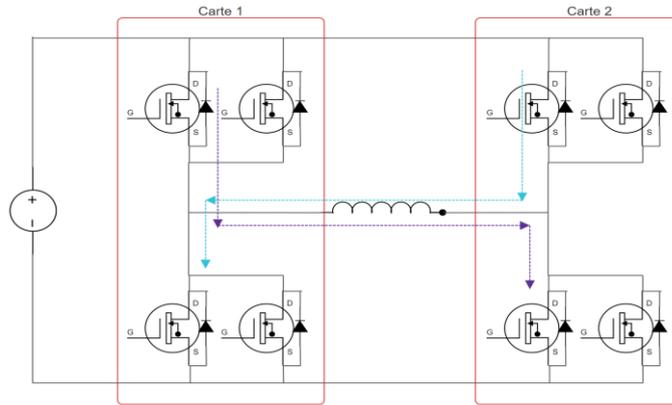


Figure 11 : Schéma électrique du pont en H.

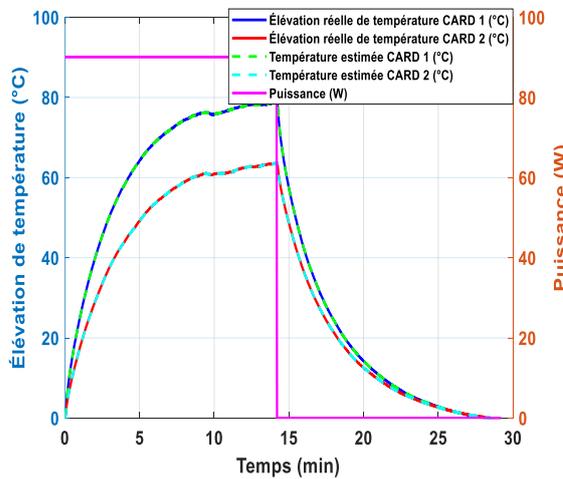


Figure 12 : Identification du modèle ARX.

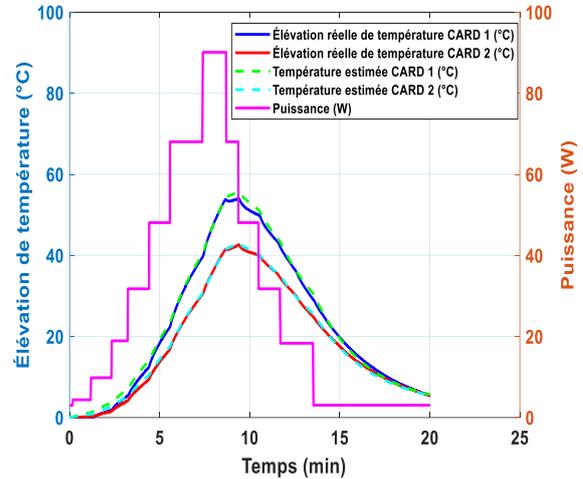


Figure 13 : Validation du modèle ARX.

D'après l'analyse des figures 9 et 10, il est clair que la carte avec des puces plus rapprochées présente un point chaud significativement plus élevé par rapport à l'autre carte, avec une différence de température d'environ 20°C. Les figures 12 et 13, qui illustrent la variation de la température en fonction du temps pour les deux capteurs CTN selon les profils de puissance utilisés durant les phases d'entraînement et de validation, confirment également cette augmentation de température.

L'application de l'identification du modèle ARX, en tenant compte des bruits de mesure et en recourant à une méthode de régularisation via la décomposition en valeurs singulières (SVD) pour la régularisation de la matrice Φ amène à des résultats prometteurs. Après la décomposition SVD, Φ est exprimée comme le produit de trois matrices : U , Σ et V^T , où U et V sont des matrices orthogonales contenant les vecteurs propres, et Σ est une matrice diagonale composée des valeurs singulières de Φ . Les valeurs singulières dans la matrice Φ sont classées par ordre décroissant, les valeurs singulières plus faibles tendent à correspondre au bruit. En ajustant ces dernières à zéro, on peut filtrer le bruit et affiner la matrice Φ .

Nous avons obtenu un ajustement presque parfait, proche de 100 %, pour la phase d'entraînement et d'environ 96 % pour la phase de validation. Ces résultats démontrent l'efficacité du modèle ARX pour estimer avec précision la température de jonction, sans avoir une connaissance approfondie des propriétés physiques et thermiques des matériaux, simplement à partir de mesures. Cette précision élevée souligne la pertinence du modèle ARX dans le contexte de l'électronique de puissance.

4. Conclusion

Cette étude a bien illustré l'efficacité du modèle ARX dans la modélisation de la température des semi-conducteurs WBG, en s'appuyant sur des simulations FEM et des expérimentations pratiques. L'utilisation de profils de puissance spécifiques pour l'entraînement et la validation renforce la précision du modèle, surtout dans le contexte expérimental. Les résultats démontrent que le modèle ARX, complété par une méthode de régularisation, offre des prédictions précises et fiables, surpassant dans notre cas les modèles thermiques RC traditionnels. Cette recherche contribue à la modélisation thermique en électronique de puissance, offrant une méthode viable pour estimer la température sans connaissance détaillée des propriétés matérielles.

Références

- [1] C. Qian et al., « Thermal Management on IGBT Power Electronic Devices and Modules », IEEE Access, vol. 6, p. 12868-12884, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793300.
- [2] P. Birbarah et al., « Water immersion cooling of high power density electronics », International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 147, p. 118918, févr. 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118918.
- [3] X. Yang, K. Heng, X. Dai, X. Wu, et G. Liu, « A Temperature-Dependent Cauer Model Simulation of IGBT Module With Analytical Thermal Impedance Characterization », IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no 3, p. 3055-3065, juin 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3128017.
- [4] Y. Xu et D. C. Hopkins, « Misconception of thermal spreading angle and misapplication to IGBT power modules », in 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, mars 2014, p. 545-551. doi: 10.1109/APEC.2014.6803362.
- [5] Wu, Rui & Wang, Huai & Pedersen, Kristian & Ma, Ke & Ghimire, Pramod & Iannuzzo, Francesco & Blaabjerg, F.. (2016). A Temperature-Dependent Thermal Model of IGBT Modules Suitable for Circuit-Level Simulations. IEEE Transactions on Industry Applications. 52. 10.1109/TIA.2016.2540614.
- [6] Yuan, W., He, Y., Li, B., Zhou, J., Ma, Z. and Li, C. (2020), Improved Cauer thermal network considering thermal coupling effects of multi-chip modules. IET Power Electronics.
- [7] T. Loussouarn, D. Maillet, B. Schick, B. Rémy, D. Dan, Indirect measurement of temperature inside a furnace, ARX model identification, Journal of Physics: Conf. Series 1047 (2018).