

Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du  
**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

**Délivré par :**  
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

**Discipline ou spécialité :**

Génie Electrique

---

**Présentée et soutenue par :**

Zhongda ZHANG

**le :** vendredi 13 juillet 2012

**Titre :**

Gestion thermique des composants d'électronique de puissance -  
Utilisation du diamant CVD

---

**Ecole doctorale :**

Génie Electrique, Electronique et Télécommunications (GEET)

**Unité de recherche :**

LAAS-CNRS

**Directeur(s) de Thèse :**

Henri SCHNEIDER, Maître de conférences, HDR, INP Toulouse

Patrick TOUNSI, Maître de conférences, INSA Toulouse

**Rapporteurs :**

Zoubir KHATIR, Directeur de recherche, IFSTTAR

Yvan AVENAS, Maître de conférences, Grenoble INP

**Membre(s) du jury :**

Zoubir KHATIR, Directeur de recherche, IFSTTAR - Rapporteur

Yvan AVENAS, Maître de conférences, Grenoble INP - Rapporteur

Jean-Marie DORKEL, Professeur émérite INSA, Toulouse/LAAS - Examineur

François FOREST, Professeur, Université Montpellier 2 - Examineur

Henri SCHNEIDER, Maître de conférences, HDR, INP Toulouse - Directeur de thèse

Patrick TOUNSI, Maître de conférences, INSA Toulouse - co-Directeur de thèse



## REMERCIEMENTS

Par l'intermédiaire de ces deux petites pages, je voudrais remercier les personnes qui, de près ou de loin, m'ont accompagné durant ces années de thèse.

Je remercie et Raja CHATILA, Jean-Louis SANCHEZ et Jean ARLAT, directeurs successifs du LAAS-CNRS, de m'avoir accueilli au sein du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS durant ces années de thèse. Je remercie également Marise BAFLEUR et Frédéric MORANCHO, responsables successifs du groupe ISGE (LAAS-CNRS).

Je souhaite adresser mes profonds remerciements à Henri SCHNEIDER et Patrick TOUNSI, qui ont dirigé cette thèse. Merci de m'avoir fait confiance, de m'avoir encadré comme vous l'avez fait, d'avoir su donner de votre temps lorsque c'était nécessaire et merci pour tout le reste. Mes remerciements vont aussi à vous pour les échanges scientifiques intéressants que nous avons pu avoir durant ces quelques années et pour l'aide apportée dans la rédaction de ce document.

Je voudrais remercier Jean-Marie DORKEL d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance de thèse. Merci à Zoubir KHATIR et Yvan AVENAS de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ces travaux de recherche. Je remercie également François FOREST d'avoir accepté d'examiner ces travaux.

Je souhaite remercier Gabriel CIVRAC, Sodjan KONE, et Hui DING avec lesquels j'ai pu travailler durant plusieurs années et sans lesquels cette étude ne serait pas aussi complète. Je remercie aussi Gaëtan TOULON, Moustafa ZERARKA, Peihua HUANG et Anqing WANG pour le coup de main qu'ils m'ont donné en fin de thèse. Je vous souhaite bon courage à tous pour la suite....

Ces travaux n'auraient pas pu être réalisés sans l'aide des membres de l'équipe TEAM. Je les remercie tous pour le travail qu'ils réalisent, en particulier David BOURRIER, René-David COLIN, Laurent MAZENQ, Bernard ROUSSET, Eric IMBERNON, Franck CARCENAC, Laurent BOUSCAYROL et ceux que j'aurais oubliés. Pour les mêmes raisons, je souhaite remercier les membres de l'équipe 2I.

Un grand merci à Samuel SAADA, Céline GESSET qui ont réalisé les dépôts MEPCVD de diamant, à Frédéric GESSINN pour les discussions que nous avons pu avoir sur

la couche de passivation en diamant CVD sur diode, ainsi qu'à Christophe CAPELLO qui a réalisé les diodes.

Ces années de travail ont été rendues plus agréables grâce à la présence de nombreux collègues du LAAS. Je remercie particulièrement mes collègues du bureau C205, à savoir (par ordre alphabétique) Aloña BERASATEGI AROSTEGI, Marcos Orellana BARCELO, Youssef EL BASRI pour les cafés philosophiques et apéros mémorables. Je souhaite aussi remercier mon deuxième bureau (par ordre d'apparition) Emmanuel MARCAULT, Gaëtan TOULON et Thi Ty Mai DINH pour la bonne humeur qu'ils ont su cultiver au sein du bureau G13. Je souhaite de plus remercier des doctorants du groupe ISGE et tous les autres. En espérant vous revoir tous bientôt.

Enfin, je souhaite remercier mes parents : mon père Yuanshan ZHANG et ma mère Youang GE pour m'avoir soutenu et encouragé toutes ces années d'étude, pendant la thèse et même avant. Pour vous, des millions des mots ne peuvent pas transmettre mon remerciement.

Ces remerciements étant rédigés dans l'urgence (pour changer...), il est possible (voire probable) que j'ai oublié de remercier un certain nombre de personnes (honte à moi). Je vous prie, par avance, de m'en excuser.

# Sommaire

<b>Sommaire.....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre I Principes et technologies de refroidissement en électronique puissance .....</b>	<b>15</b>
<i>I.1 Introduction .....</i>	<i>17</i>
<i>I.2 Principes de transfert de la chaleur.....</i>	<i>17</i>
I.2.1 Principaux mécanismes de transfert de chaleur dans les composants et assemblages électroniques.....	17
I.2.2 Conduction thermique .....	20
I.2.3 Convection.....	22
I.2.4 Rayonnement .....	23
I.2.5 Notion de résistance thermique.....	24
<i>I.3 Technologies de refroidissement et leurs performances .....</i>	<i>28</i>
I.3.1 Refroidissement à air.....	28
I.3.1.1 Convection naturelle par air .....	28
I.3.1.2 Convection forcée à air.....	29
I.3.2 Refroidissement par liquide caloporteur.....	29
I.3.2.1 Refroidissement par plaque à eau .....	30
I.3.2.2 Refroidissement par microcanaux.....	31
I.3.3 Refroidissement diphasique : Les caloducs .....	32
<i>I.4 Le diamant CVD .....</i>	<i>34</i>
I.4.1 Diamant CVD .....	35
I.4.1.1 Cristallographie du diamant .....	36
I.4.1.2 Croissance de diamant CVD .....	37
HPHT .....	37
MEPCVD .....	38
Substrat de croissance .....	39
<i>I.5 Conclusion .....</i>	<i>40</i>
<i>I.6 Bibliographie .....</i>	<i>41</i>
<b>Chapitre II Etude par simulation de nouvelles structures de refroidissement à base de diamant CVD .....</b>	<b>43</b>

<i>II.1 Introduction</i> .....	45
II.1.1 Simulateur COMSOL .....	45
II.1.2 Nécessité de simplification du modèle.....	46
II.1.3 Extraction des paramètres .....	48
II.1.3.1 Mesures des propriétés thermiques du diamant CVD.....	48
Conductivité thermique .....	49
II.1.3.2 Evaluation du coefficient d'échange thermique $h$ .....	51
Principe de la mesure :.....	52
Cas de la convection naturelle dans l'air .....	52
Cas du refroidissement par plaque à eau .....	54
Cas d'une lame d'eau.....	56
<i>II.2 Etude de différentes solutions de refroidissement à l'aide d'un substrat diamant</i> .....	58
II.2.1 Apport du diamant pour une solution standard.....	59
II.2.2 Suppression de la semelle .....	61
II.2.3 Structures optimisées.....	63
II.2.4 Ajouts de micropoteaux .....	68
Cas d'une lame d'eau avec micropoteaux .....	69
II.2.5 Refroidissement direct en double face.....	75
<i>II.3 Conclusion</i> .....	77
<i>II.4 Bibliographie</i> .....	78
<b>Chapitre III Réalisations technologiques</b> .....	<b>84</b>
<i>III.1 Introduction</i> .....	86
<i>III.2 Définition du système</i> .....	86
III.2.1 Géométrie du système .....	86
III.2.2 Choix du substrat diamant CVD.....	87
<i>III.3 Développement des procédés technologiques</i> .....	88
III.3.1 Couche d'accroche .....	89
III.3.1.1 Couche Ti/Métal .....	89
III.3.1.2 Couche Si/Al.....	89
III.3.1.3 Caractérisation de la tenue mécanique des couches d'accroche.....	89
III.3.2 Choix de la résine.....	91
III.3.3 Dépôt électrochimique.....	93
III.3.4 Processus de fabrication.....	94
<i>III.4 Caractérisations thermiques et performances</i> .....	96
III.4.1 Dispositif de test.....	96

III.4.2 Mesures.....	96
III.4.3 Evaluation de différentes structures de refroidissement d'une diode SiC.....	98
III.4.3.1 Première solution : substrat DBC en AlN .....	98
III.4.3.2 Deuxième solution : Substrat en diamant CVD.....	99
III.4.3.3 Troisième solution : Substrat diamant CVD avec micropoteaux en cuivre.....	100
III.4.3.4 Comparaison entre les différentes solutions proposées .....	102
<i>III.5 Conclusion .....</i>	<i>103</i>
<i>III.6 Bibliographie .....</i>	<i>104</i>
<b>Chapitre IV Le diamant CVD pour la passivation des composants .....</b>	<b>107</b>
<i>IV.1 Introduction.....</i>	<i>109</i>
IV.1.1 Passivation.....	109
IV.1.2 Apport d'une couche de passivation en diamant – Etude par simulation .....	111
<i>IV.2 Croissance d'une couche fine de diamant CVD sur puces silicium .....</i>	<i>114</i>
IV.2.1 Réalisation .....	116
IV.2.1.1 Croissance d'une couche homogène.....	117
IV.2.1.2 Ouverture contacts face avant .....	118
IV.2.1.3 Métallisation.....	123
IV.2.2 Caractérisation électrique des composants passivés.....	123
IV.2.3 Méthode de caractérisation de la couche de passivation.....	126
<i>IV.3 Conclusion .....</i>	<i>127</i>
<i>IV.4 Bibliographie .....</i>	<i>128</i>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>131</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>137</b>
<b>Publication Revues .....</b>	<b>141</b>
<b>Résumé .....</b>	<b>143</b>



# **Introduction générale**



La raréfaction des énergies fossiles et l'ensemble des problématiques environnementales (pollution, réduction des gaz à effet de serre) bouleversent le secteur de l'énergie. Le recours au vecteur électrique, qualifié parfois à tort de vecteur « propre », croît de façon exponentielle. Les domaines du transport, des énergies renouvelables, de la distribution électrique font de plus en plus appel à ce vecteur grâce à notamment aux nouvelles performances des convertisseurs d'énergie électrique. L'électronique de puissance, au cœur de ces convertisseurs, fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches et d'évolutions technologiques ou conceptuelles permanentes. Les performances en termes de densité de puissance sont ainsi grandement améliorées ce qui permet, pour un même volume du convertisseur, de traiter des puissances toujours plus importantes ou, pour une même puissance, de réduire sa taille et son poids. On retrouve ainsi ces convertisseurs allégés au sein des systèmes embarqués : voiture électrique ou hybride, traction ferroviaire, avion plus électrique.

Les pertes libérées sous forme de chaleur au sein de ces convertisseurs deviennent une préoccupation majeure pour les concepteurs. Cela est d'autant plus vrai que les surfaces d'échanges avec l'extérieur sont réduites et que la densité de pertes est le plus souvent augmentée. La gestion thermique devient ainsi l'élément dimensionnant du convertisseur. En effet, la taille et le poids d'un convertisseur sont en grande partie définies par les éléments passifs transformateurs filtres et par le système de refroidissement nécessaire pour évacuer les calories. La réduction du volume des éléments passifs passe par une montée en fréquence de fonctionnement mais cette augmentation de la fréquence entraîne un accroissement des pertes (pertes en commutation). Il existe ainsi pour chaque domaine de puissance et d'application un compromis étroitement lié à la gestion thermique du système.

Les propriétés physiques du diamant sont exceptionnelles et sa conductivité thermique de  $2000\text{W/m}\cdot\text{K}$  est cinq fois supérieure à la conductivité du cuivre à température ambiante. Il est ainsi le meilleur conducteur thermique solide connu à ce jour. Avec un champ de rupture théorique de  $20\text{ MV/cm}$  il est aussi un excellent isolant. C'est un des rares matériaux à présenter cette particularité d'être à la fois un excellent conducteur thermique et un bon isolant électrique. D'autres propriétés sont également intéressantes. Le diamant est inerte chimiquement ce qui pourrait servir à protéger les puces des agressions chimiques. Enfin, le coefficient de dilatation thermique est proche de celui du silicium ou du SiC ce qui garanti une meilleure tenue au cyclage thermique des assemblages.

A l'évocation de toutes ces propriétés, le diamant paraît être un matériau idéal pour l'environnement et la gestion thermique des composants d'électronique de puissance. C'est précisément l'objet des études que nous présentons dans ce mémoire. Le diamant, même synthétique restant cher, il faut démontrer un gain significatif pour justifier son utilisation.

L'obtention de ce matériau par dépôt chimique en phase gazeuse permet de réaliser des couches épaisses sur plusieurs  $\text{cm}^2$  et garantit une reproductibilité des caractéristiques indispensables à l'industrialisation. Ces techniques permettront l'obtention de substrats thermiques qui peuvent être métallisés pour se substituer à des substrats DBC (Direct Bonded Copper). Mais il est également possible de déposer de fines couches de diamant par des techniques CVD (Chemical Vapor Deposition) qui pourraient servir à passiver et à protéger des composants en silicium.

Le diamant CVD est aujourd'hui utilisé dans un grand nombre d'applications (mécaniques, optiques, microélectroniques,...). Nous avons étudié dans le cadre de cette thèse ses potentialités d'application au domaine particulier de l'électronique de puissance.

Le premier chapitre de ce mémoire présente la problématique du refroidissement des composants semi-conducteurs en électronique de puissance. Différentes solutions technologiques sont envisageables des plus performantes par micro canaux aux plus classiques par radiateur à air forcé. Aux températures de fonctionnement usuelles le rayonnement peut être négligé et l'on s'intéressera particulièrement aux échanges de chaleur par convection vers l'air ou vers tout autre fluide caloporteur et à l'écoulement de la chaleur par conduction à travers les différentes couches de l'assemblage. Nous présentons également dans ce chapitre dédié à l'état de l'art les différentes techniques de réalisation du diamant CVD et ses propriétés physiques.

Le deuxième chapitre est consacré à la mise en place d'une plateforme de simulation dédiée à nos études. Nous avons pour cela commencé par identifier les paramètres essentiels nécessaires à nos simulations. Nous avons mené une campagne de mesures pour vérifier la conductivité thermique annoncée pour différentes couches de diamant CVD. Nous avons ensuite identifié systématiquement les coefficients d'échange convectifs équivalents pour différentes solutions techniques. Ainsi nous pouvons nous appuyer sur cette plateforme pour concevoir des solutions de gestion thermique innovantes.

Les deux derniers chapitres sont dédiés aux réalisations technologiques et aux essais.

Le chapitre 3 présente nos différentes réalisations technologiques sur substrats en diamant CVD. Nous montrons tout d'abord que le fait de substituer un substrat Alumine ou d'AlN par un substrat diamant dans une structure classique n'apporte qu'un gain minime. Pour que l'utilisation du diamant apporte un gain significatif dans le refroidissement nous avons dû repenser tout le système de refroidissement. Ainsi nous démontrons l'intérêt de l'utilisation d'un substrat en diamant CVD pour une classe de structures de refroidissement spécifiques.

Le chapitre 4 présente nos études de passivation de puces en silicium par une fine couche de diamant déposée par CVD. L'avantage d'une telle solution est d'utiliser le diamant avec parcimonie au plus près de la zone active où la puissance est dissipée. Cela permet de réduire le coût et de rendre cette technologie accessible à des filières silicium classiques. Des simulations nous permettent de justifier l'intérêt d'une telle solution.

De nombreuses étapes technologiques, parfois complexes, ont nécessité un investissement en temps très important. Ces deux derniers chapitres, consacrés aux résultats les plus significatifs, résument en partie ce travail.



# **Chapitre I Principes et technologies de refroidissement en électronique puissance**



## **I.1 Introduction**

L'allègement des dispositifs électroniques et l'augmentation de la densité de puissance conduisent les concepteurs à améliorer sans cesse les performances des systèmes de refroidissement. Des matériaux ayant des conductibilités thermiques importantes sont recherchés pour réduire la résistance thermique de conduction dans les différentes couches de l'assemblage (support, boîtier, module...). En parallèle, pour améliorer l'échange thermique avec l'environnement, des solutions technologiques sont envisagées allant des classiques par radiateur à air forcé aux plus performantes par microcanaux et exploitation du changement de phase. Pour commencer, nous faisons un rappel des notions élémentaires nécessaires pour toute étude thermique. Le rayonnement pouvant être négligé, on s'intéressera particulièrement aux échanges de chaleur par convection vers l'air ou vers tout autre fluide caloporteur et à l'écoulement de la chaleur par conduction à travers les différentes couches de l'assemblage. Par ailleurs, comme l'utilisation du diamant est envisagée, nous présentons également les différentes techniques de réalisation du diamant CVD ainsi que ses propriétés physiques.

## **I.2 Principes de transfert de la chaleur**

### **I.2.1 Principaux mécanismes de transfert de chaleur dans les composants et assemblages électroniques**

Un système de refroidissement classique de modules IGBT par exemple est composé d'un assemblage de différentes couches de matériaux différents partant des puces semi-conductrices (IGBT, Diodes) montées sur un substrat qui doit être à la fois isolant électrique et bon conducteur thermique. Cet assemblage est présenté sur la figure I.1, le refroidissement de l'ensemble est en général assuré par un procédé d'échange thermique avec l'extérieur (radiateur, convection forcée, plaque à eau, microcanaux..).

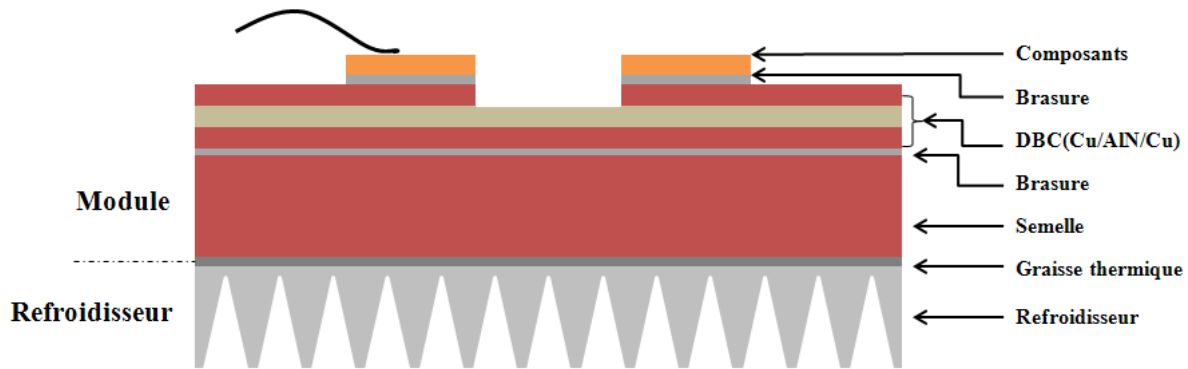


Figure I.1: Exemple d'un module de puissance avec un système refroidissement classique

Sur la figure I.1 on peut distinguer les différentes composantes de la structure du module de puissance. Les puces semi-conductrices sont brasées sur une couche DBC (Direct Bonded Copper Cu/AlN/Cu). Cette dernière est soudée sur une épaisse semelle en métal (généralement du cuivre) qui est directement en contact avec un puits de chaleur[2].

La chaleur est générée dans les zones actives des puces semi-conductrices par des dissipations de puissance sous forme de pertes.

Cette structure peut correspondre par exemple à une partie d'un hacheur dont l'interrupteur commandé (MOSFET) partage le même environnement thermique que la diode (voir figure I.2).

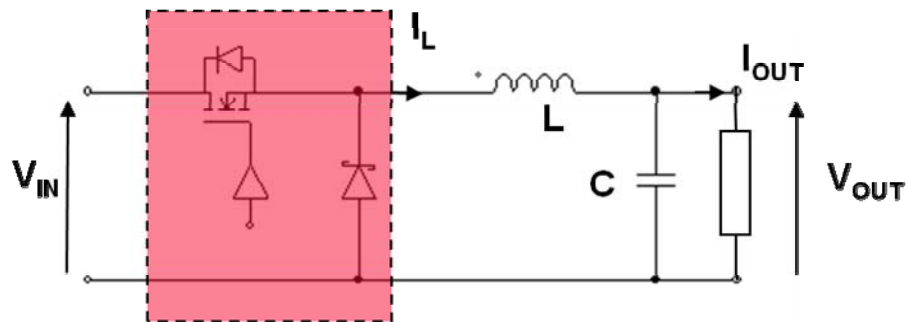


Figure I.2 : Exemple d'un schéma de convertisseur

Il y a deux types de pertes dans les interrupteurs de puissance : les pertes en conduction et les pertes en commutation. La figure I.3 montre les différentes énergies dissipées par le composant actif (MOSFET, IGBT...) sur un cycle complet de commutation.

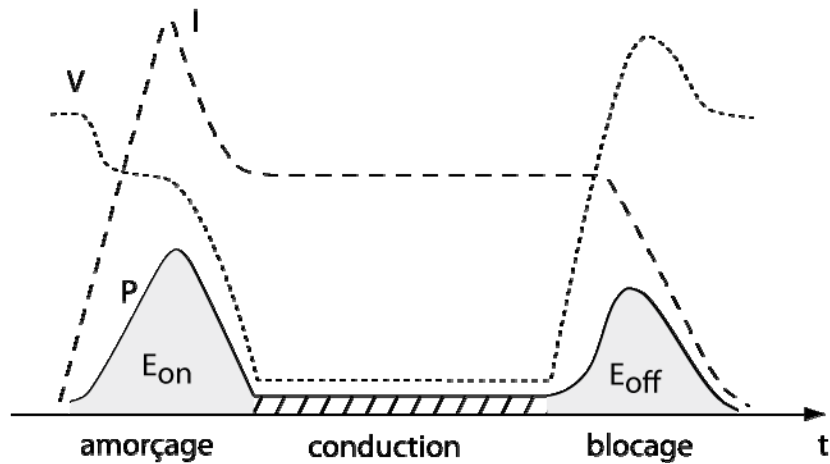


Figure I.3 : Puissance dissipée dans un composant de puissance en commutation

L'expression de la puissance dissipée par le composant s'exprime sous la forme :

$$P_{pertes} = V_d \cdot I_{moy} + R_{on} \cdot I_{eff}^2 + f \cdot (E_{on} + E_{off}) \quad \text{Équation I.1}$$

Où  $V_d$  est la tension de seuil dans le cas d'un composant bipolaire.

$R_{ON}$  est sa résistance à l'état passant du composant.

$f$  est la fréquence de fonctionnement.

$E_{on}$  est l'énergie dissipée lors de la mise en conduction.

$E_{off}$  est l'énergie dissipée lors du passage à l'état bloqué.

On néglige généralement les pertes pendant le temps de blocage aux températures de fonctionnement normal.

La part des pertes en commutation par rapport aux pertes en conduction augmente avec la fréquence de fonctionnement. Pour un fonctionnement à haute fréquence, on privilégie les composants unipolaires, de manière à minimiser les pertes en commutation. Au contraire, pour un fonctionnement en basse fréquence, on préfère utiliser des composants bipolaires qui ont des pertes en conduction relativement faibles.

Les échanges de chaleur entre la puce et le milieu ambiant peuvent suivre les phénomènes physiques suivants :

- Conduction : A l'intérieur des volumes des matériaux qui composent les structures.
- Convection : Echange de chaleur avec le milieu ambiant avec déplacement de fluide.

-Rayonnement : Intervient à haute température et particulièrement dans le monde du spatial.

## I.2.2 Conduction thermique

Si dans un matériau homogène isotrope existe un gradient de température, il y a un transfert d'énergie calorifique sous forme de conduction thermique. Dans un corps solide une dissipation de puissance locale sous forme de chaleur conduit à augmenter l'énergie de vibration des atomes du réseau dans le volume dissipant, l'énergie de vibration des atomes concernés transmet cette énergie de proche en proche au travers des forces de liaison interatomiques ou des électrons de conduction. De façon macroscopique, le phénomène de conduction thermique en régime permanent suit l'équation suivante [7-10] :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_i \quad \text{Équation I.2}$$

Où  $\rho$  est la masse volumique en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

$C_p$  est la capacité calorifique en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

$k$  est la conductivité thermique en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

$T$  est la température exprimée en K (ou en °C).

$Q_i$  est la puissance volumique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) générée dans le corps

La loi de Fourier (équation I.3) [8, 9] postule que dans un corps homogène où il y a dissipation de puissance sous forme de chaleur, le flux de chaleur est proportionnel au gradient de température [9] :

$$\vec{q}_0 = -k \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad \text{Équation I.3}$$

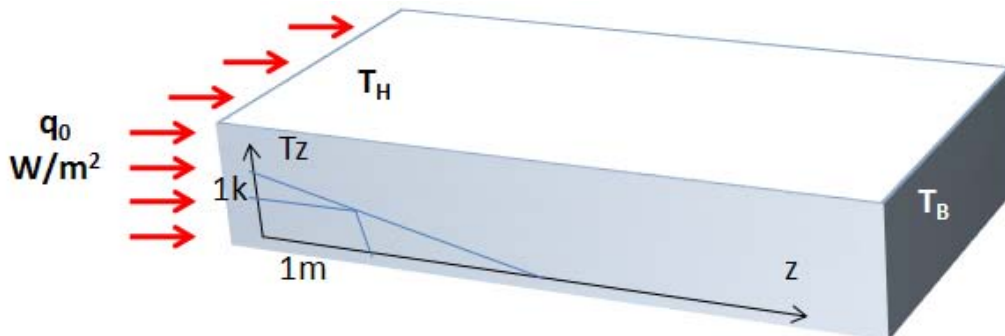
$\vec{q}_0$  est le flux de chaleur local exprimé en  $\text{W}/\text{m}^2$ .

$k$  est la conductivité thermique exprimée en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

$\overrightarrow{\text{grad}}(T)$  est le gradient de température local en K (ou en °C).

Si l'on considère le cas particulier d'une diffusion 1D avec des valeurs particulières :

On arrive à une élévation de 1K (ou 1°C) après une diffusion de la chaleur par conduction sur une distance de 1m dans un matériau homogène en régime permanent (voir figure I.4).



**Figure I.4 : Illustration de la loi de Fourier sur un cas particulier**

Pour analyser le régime transitoire, il est plus simple de considérer dans un premier temps le cas 1D. Les hypothèses de l'équation de la chaleur : Flux de chaleur unidimensionnel appliqué en surface sur l'une des limites de l'élément de volume en question, dissipation locale volumique de puissance possible. Le bilan des puissances dans l'élément  $dz$  situé à la côte  $z$  donne :

Puissance entrante + Dissipation locale = Puissance sortante + Part de la chaleur stockée.

Ce qui se traduit par :

$$p(z, t)S + Q_i(z, t)Sdz = p(z + dz, t)S + \rho C_V \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) Sdz \quad \text{Équation I.4}$$

Où:

1. Puissance entrante :  $p(z, t) \cdot S$ .
2. Dissipation locale volumique :  $G(z, t)Sdz$ .
3. Puissance sortante :  $p(z+dz, t)S$ .
4. Part de la chaleur stockée :  $\rho C_V \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) Sdz$ .

Avec :

$T(z, t)$  : température locale exprimée en K ou °C.

$Q_i(z, t)$  : densité volumique de puissance dissipée en  $\text{W}/\text{m}^3$ .

$C_V$  est chaleur spécifique par unité de volume en  $\text{J}/\text{m}^3$ .

$S$  est section du barreau en  $\text{m}^2$ .

$z$  est variable d'espace en m.

$t$  est temps en s.

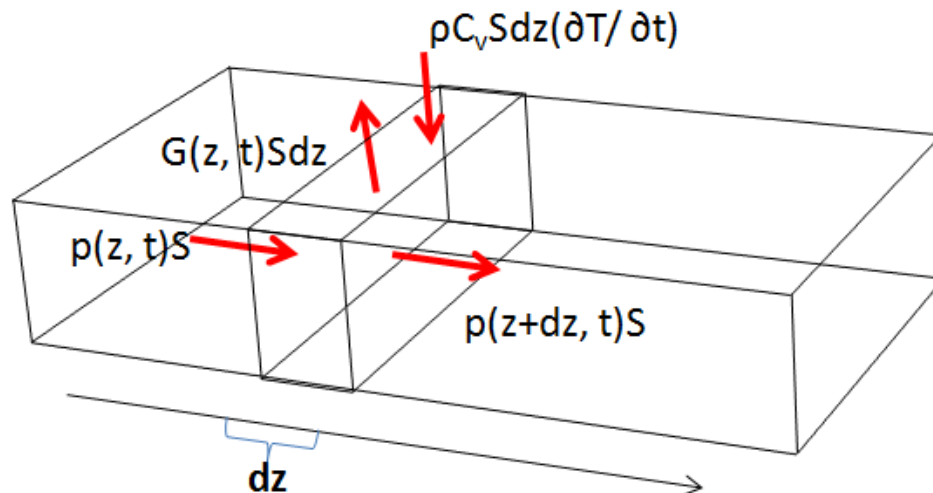


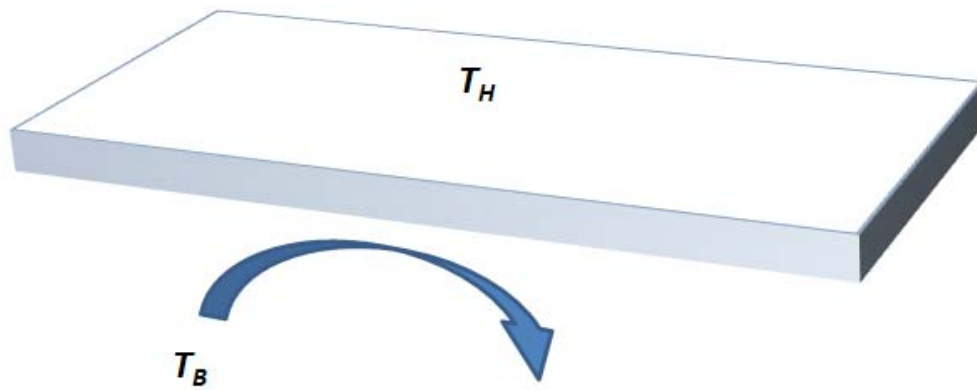
Figure I.5 : Bilan de puissance thermique à l'instant  $t$  dans un élément de volume

De manière plus compacte, l'équation s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G(z, t) = \rho C_V \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Équation I.5}$$

### I.2.3 Convection

La convection est un mode d'échange de chaleur qui s'accompagne d'un transfert de masse dans un milieu fluide. Lorsqu'un solide est en contact avec un fluide de température différente il se met en place un transfert d'énergie par mouvement des molécules dans le fluide que l'on nomme phénomène de convection.



**Figure I.6 : Illustration d'échange convectif entre un milieu fluide et une surface**

On peut remarquer que le flux de chaleur qui intervient entre une surface chaude et le milieu ambiant (fluide) est proportionnel à l'écart de température présente entre ces deux milieux. Pour cette raison on introduit un coefficient de proportionnalité  $h$ , appelé coefficient d'échange thermique par convection (ou coefficient de convection). On remarquera que ce flux est aussi proportionnel à la surface mise en contact avec le fluide.

D'où l'équation de convection suivante :

$$Q = h \cdot S(T_H - T_B) \quad \text{Équation I.6}$$

$Q$  est flux de chaleur en W.

$h$  est coefficient de convection en  $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

$S$  la surface d'échange entre le solide et le fluide en  $\text{m}^2$

## I.2.4 Rayonnement

Le rayonnement thermique est l'un des moyens de transfert de chaleur, en effet tout objet ayant une température au-dessus du zéro absolu émet un rayonnement thermique. Plus la température du corps est élevée plus celui-ci envoie des rayons infrarouges d'ondes plus courtes. On définit par la loi de Stefan (Équation I.7) l'énergie transmise par rayonnement dans le vide lorsqu'un corps est à une température  $T_H$  et le milieu qui peut être lointain est à une température  $T_B$ .

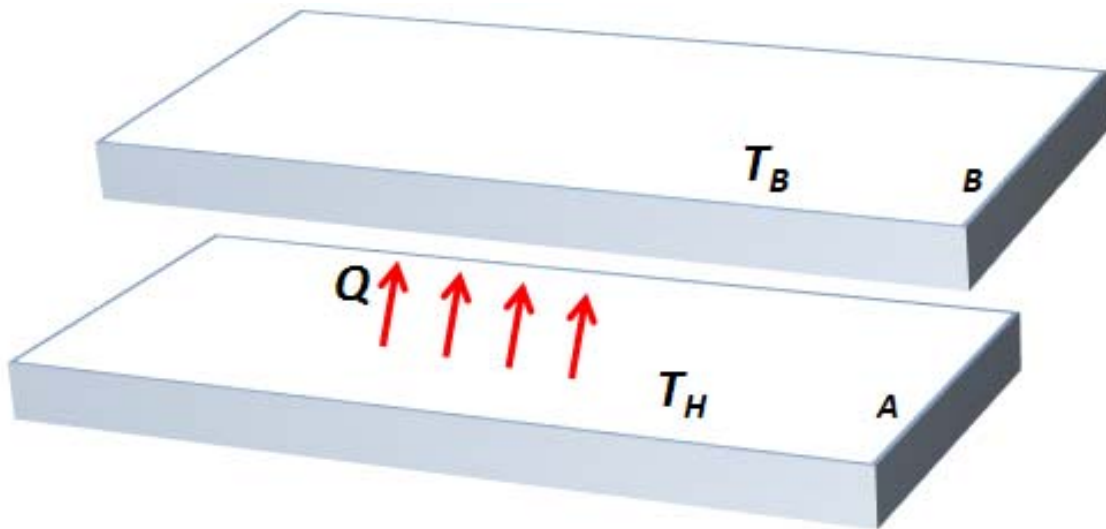
$$Q = \varepsilon_{12} \sigma_s S (T_H^4 - T_B^4) \quad \text{Équation I.7}$$

$Q$  est flux de chaleur en W.

$\varepsilon_{12}$  est l'émissivité équivalente de l'ensemble paroi A- paroi B.

$\sigma_s$  est la constante de Stéfán en  $W/K^4 \cdot m^2$

Les hypothèses de cette équation sont : le rayonnement consiste en un échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent comme montre la figure I.7.



**Figure I.7: Principe du rayonnement thermique**

Nous n'aurons pas à considérer ce phénomène dans notre étude, le transfert par conduction et convection étant largement prédominant dans les applications visées. Le transfert par rayonnement est en général négligé dans les systèmes dont on souhaite traiter la gestion thermique [11, 12].

## I.2.5 Notion de résistance thermique

La résistance thermique ( $R_{th}$ ) quantifie le degré de difficulté opposé par le matériau à l'écoulement d'un flux de chaleur entre deux isothermes ( $T_H$  et  $T_B$ ). Rappelons la loi de Fourier (équation I.3) appliquée à une dimension.

$$q_0 = -k \frac{dT}{dz} \quad \text{Équation I.8}$$

Où  $q_0$  est densité de flux de chaleur en  $W/m^2$ . Si l'on considère un flux de chaleur uniforme, on peut dire :

$$q_0 = Q/S \quad \text{Équation I.9}$$

Si l'on prend  $\Delta T = T_H - T_B$ . Et comme le milieu est homogène l'élément  $dz$  est étendu à l'épaisseur  $e$ . D'où :

$$\Delta T = \frac{1}{k} \cdot \frac{e}{S} Q \quad \text{Équation I.10}$$

$Q$  est puissance dissipée en W,  $\Delta T$  est l'échauffement en K.  $e$  est longueur du barreau en m,  $S$  est section du barreau en  $m^2$ .

En considérant l'analogie électrique – thermique, on peut voir la Tableau I.1.

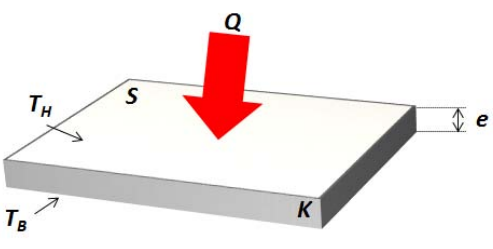
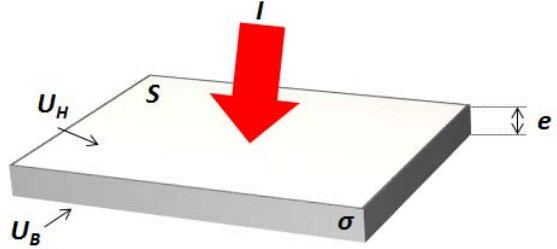
symbole	Thermiques	unité	symbole	Electriques	unité
$T$	Température	K	$U$	Tension	V
$q_0$	Densité de puissance	W/m <sup>2</sup>	$J$	Densité de courant	A/m <sup>2</sup>
$Q$	Puissance calorifique	W	$I$	Courant	A
$k$	Conductivité thermique	W/(K·m)	$\sigma$	Conductivité électrique	A/(V·m) =1/(Ω·m)
$R_{th}$	Résistance thermique	K/W	$R$	Résistance électrique	Ω
$R_{th} = \frac{e}{k \cdot S}$			$R = \frac{e}{\sigma \cdot S}$		
					

Tableau I.1: L'équivalence entre grandeurs thermiques et électriques

On peut alors définir la résistance thermique suit :

$$R_{th} = \frac{e}{k \cdot S} \quad \text{Équation I.11}$$

La notion de résistance thermique est parfaitement rigoureuse pour une structure unidimensionnelle. On peut également définir une résistance thermique de convection. Dans les systèmes électroniques qui nous concernent on peut introduire ces deux types de résistances thermiques (voir figure I.8).

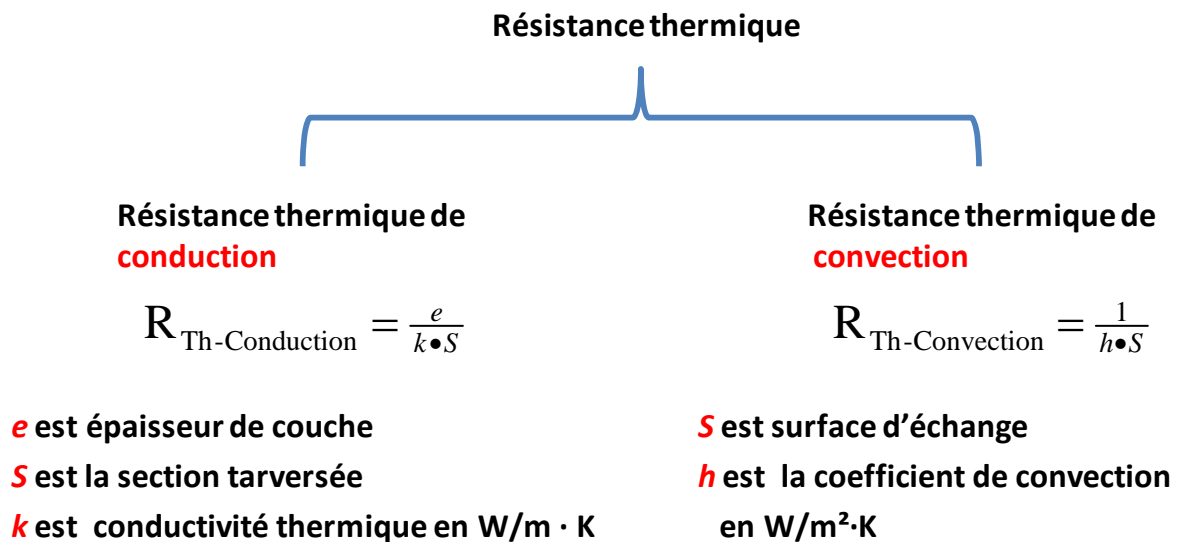


Figure I.8 : Prise en compte des deux types de résistances thermiques

Pour prendre en considération les systèmes réels, le flux thermique étant rarement de caractère unidimensionnel, on est amené à définir un équivalent en termes de résistance thermique tout en prenant en compte les effets 3D. Celle-ci devra résulter d'un calcul de diffusion thermique 3D, en se focalisant sur le point dont l'élévation de température est maximale, pour une dissipation de puissance P. Si l'on se contente d'être renseigné sur la valeur maximale  $T_j$  de la répartition de température  $T(x, y, z)$  (voir figure I.9), on s'aperçoit que le rapport  $(\Delta T_{max}/P)$  reste constant lorsque la puissance varie (en admettant que le point chaud ne se déplace pas). On peut alors définir la résistance thermique comme:

$$R_{th} = \frac{\Delta T_{max}}{P}; \quad \Delta T_{max} = T_j - T_a \quad \text{Équation I.12}$$

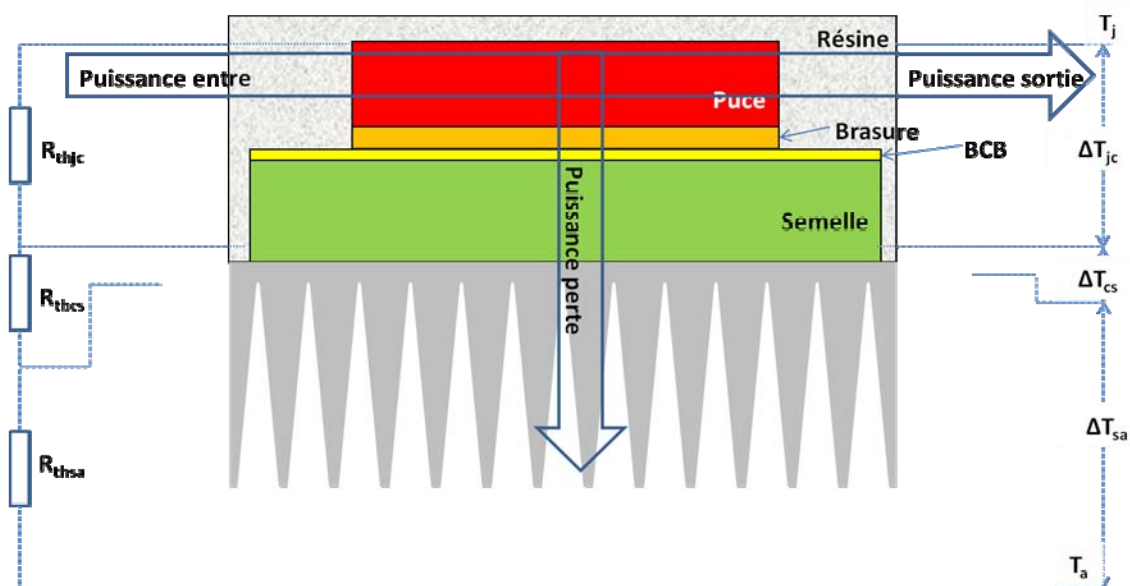


Figure I.9 : Décomposition du chemin thermique en plusieurs résistances thermiques

$$T_j - T_a = \Delta T_{jc} + \Delta T_{cs} + \Delta T_{sa} \quad \text{Équation I.13}$$

$$R_{th} = \frac{T_j - T_a}{P} = R_{thjc} + R_{thcs} + R_{thsa} \quad \text{Équation I.14}$$

Où  $R_{thjc}$  est la résistance thermique entre la jonction et le boîtier.  $R_{thcs}$  est la résistance thermique entre le boîtier et le refroidisseur.  $R_{thsa}$  est la résistance thermique du refroidisseur.  $T_j$  est la température de jonction,  $\Delta T_{jc}$  est l'écart de température entre la jonction et le boîtier,  $\Delta T_{cs}$  est l'écart de température entre le boîtier et le refroidisseur,  $\Delta T_{sa}$  est l'écart de température entre le refroidisseur et le milieu ambiant,  $T_a$  est la température ambiante.

Dans ce travail de thèse, nous nous efforcerons de réduire les différentes composantes de la résistance thermique des jonctions au refroidisseur, en agissant à la fois sur le choix des matériaux et sur les techniques de refroidissement.

## I.3 Technologies de refroidissement et leurs performances

Dans tous les systèmes de refroidissement, la chaleur doit d'abord traverser par conduction thermique les épaisseurs des différentes couches de l'assemblage avant d'arriver au liquide de refroidissement. Un soin particulier doit donc être porté au choix des matériaux constituant ces couches et qui composent les différentes interfaces (brasures...). Mais cela ne suffit pas si l'on n'arrive pas à évacuer correctement la chaleur qui arrive à la dernière couche en contact avec l'ambient. C'est pour cette raison que des dispositifs d'échange thermique avec l'ambient ont été développés et perfectionnés.

### I.3.1 Refroidissement à air

La technologie de refroidissement par air est l'une des plus communes et largement utilisée. On utilise l'air comme fluide caloporteur qui vient en contact avec des radiateurs sous forme pulsée (convection forcée) ou naturelle (convection naturelle).

#### I.3.1.1 Convection naturelle par air

Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur (voir figure I.10) dimensionné suivant la surface de refroidissement, celui-ci étant toujours choisi pour ses propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium).



Figure I.10 : Système de refroidissement à air passif

La chaleur émise par le composant s'épanouit dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant. L'ajout du dissipateur de chaleur peut donc grandement améliorer l'efficacité du refroidissement.

### **I.3.1.2 Convection forcée à air**

Pour améliorer le transfert thermique vers le milieu ambiant, on peut utiliser un ventilateur qui augmente le débit d'air à travers la surface d'échange. Le bloc formé par le dissipateur et le ventilateur est souvent appelé ventirad (Ventilateur-Radiateur voir figure I.11).



**Figure I.11 : Exemples de systèmes de refroidissement à air pulsé**

La technologie de refroidissement à air présente plusieurs avantages : la sécurité du fait qu'aucun liquide n'est nécessaire (pas de risque de corrosion), le coût est limité et la durée de vie est satisfaisante. Toutefois, le consensus actuel sur la méthode traditionnelle de refroidissement par air à haute puissance atteindra vite ses limites. L'utilisation de ventilateurs standards qui engendre un niveau de bruit nuisible assure un coefficient de transfert de chaleur maximum de  $150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , soit environ  $1 \text{ W/cm}^2$  pour une différence de température de  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  entre la source chaude et le milieu ambiant.

### **I.3.2 Refroidissement par liquide caloporteur**

Le refroidissement par liquide (souvent de l'eau additionnée) est une autre méthode d'évacuation de la chaleur vers le milieu ambiant. Le principal mécanisme de refroidissement par liquide est le transfert de chaleur par convection tout comme pour l'air. Le refroidissement par liquide est couramment utilisé pour le refroidissement des moteurs à combustion interne

et dans les grandes installations industrielles comme les centrales à vapeur, les générateurs hydroélectriques, les raffineries de pétrole et usines chimiques. D'autres utilisations incluent le refroidissement à huile lubrifiante dans les pompes, de même on peut trouver à l'intérieur des ordinateurs haut de gamme un refroidissement incluant un liquide.

Les avantages d'utiliser un liquide de refroidissement par rapport à l'air sont liés à la possibilité de tirer profit de plus grandes valeurs de chaleur spécifique, de densité et de conductivité thermique, le coefficient d'échange convectif est ainsi beaucoup plus élevé.

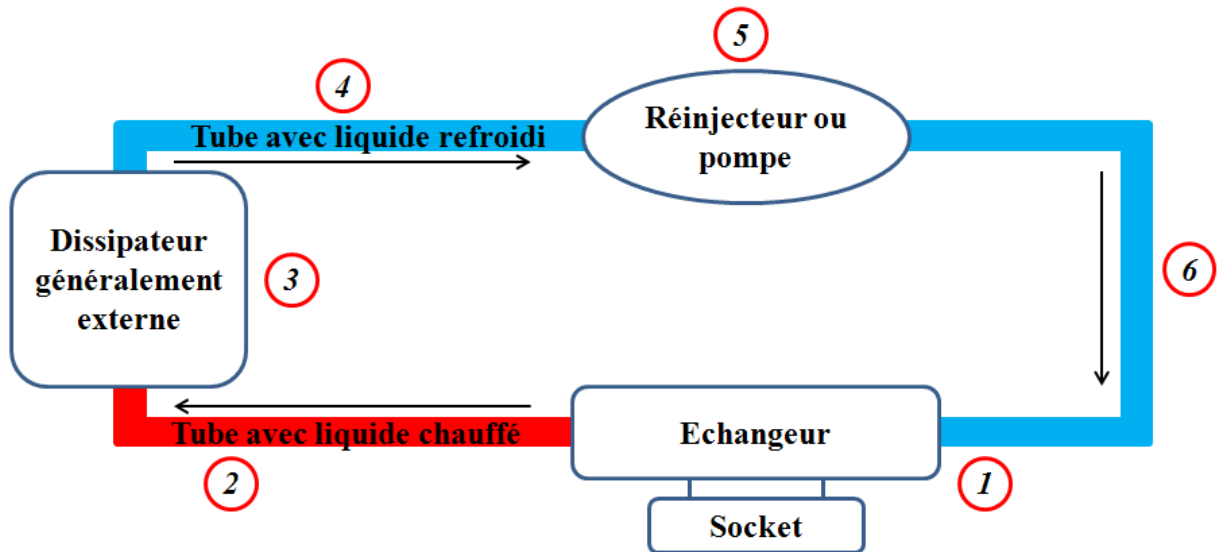
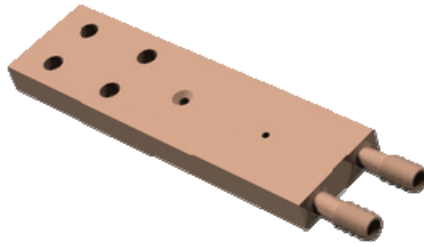


Figure I.12 : Schéma simplifié de refroidissement par liquide

Ce système (voir figure I.12) est plus efficace qu'un refroidissement à air et permet d'extraire la chaleur au plus près de la puce et de la dissiper de façon déportée dans un radiateur qui peut être large et performant.

### I.3.2.1 Refroidissement par plaque à eau

Une technologie robuste consiste à utiliser une cavité assez proche de la source de chaleur dans laquelle le liquide circule de manière turbulente. Comme le liquide utilisé est souvent à base d'eau, cette technologie se nomme plaque à eau (voir figure I.13).



**Figure I.13 : Structure de plaque à eau [13].**

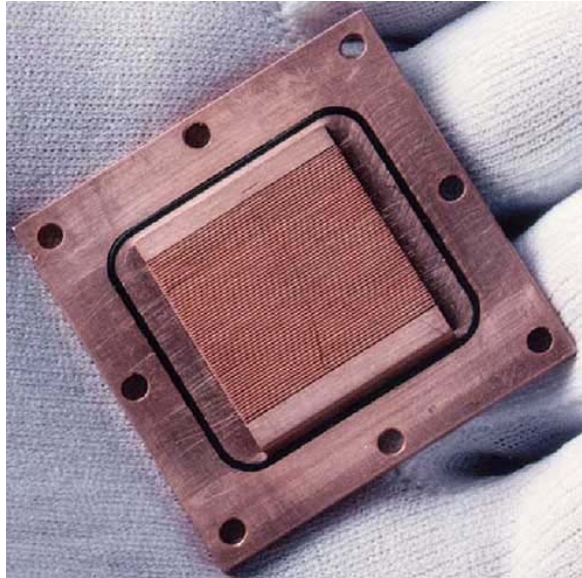
Une pompe est nécessaire pour contraindre le passage d'un fluide entre deux plaques après son passage dans un canal étroit afin de créer de la turbulence.

Les avantages de l'utilisation d'une plaque à eau :

1. Efficacité du transfert de chaleur: avec un échangeur de chaleur à plaque, le transfert de chaleur est élevé (les valeurs du coefficient de transfert de chaleur sont 3 à 5 fois plus élevées que celles d'un tubulaire simple)[14].
2. Fonctionnement régulé : par le biais d'un contrôle précis de la température de sortie, le débit peut être régulé de façon à optimiser l'efficacité du refroidisseur

### **I.3.2.2 Refroidissement par microcanaux**

Le développement rapide du domaine de la microélectronique suit la loi de Moore[15]. Avec l'intégration croissante de transistors à haute vitesse dans les appareils électroniques, la densité de dissipation thermique visée devrait atteindre  $500 \text{ W/cm}^2$  pour les applications futures [16-18]. Les microcanaux qui sont des dispositifs très performants d'échange de chaleur sont venus suppléer les systèmes traditionnels. Les systèmes embarqués liés à l'aérospatiale par exemple, ainsi qu'à l'électronique médicale font largement appel aux échangeurs de chaleur à microcanaux [19].



**Figure I.14 : Mini-échangeur avec Microcanaux de 0.2mm de largeur**

Par rapport aux échangeurs de chaleur conventionnels, les échangeurs de chaleur à microcanaux n'offrent pas seulement un bon coefficient de transfert thermique, mais offre également une excellente robustesse notamment devant la pression du liquide.

Les principaux avantages :

1. Les microcanaux agissent comme plusieurs micro-plaque-ailettes. Ils augmentent la surface d'échange. la résistance thermique de convection est donc réduite.
2. Pour utiliser les microcanaux, la semelle est supprimée, donc la résistance thermique de conduction est réduite.
3. En faisant appel à la technologie des microcanaux on peut réduire la taille de système de refroidissement.

### **I.3.3 Refroidissement diphasique : Les caloducs**

Il est bien connu que le passage de la matière d'un état liquide à un état gazeux ou solide s'accompagne d'un échange de chaleur avec l'environnement. Le passage de l'état solide vers l'état liquide puis gazeux est endothermique, les passages inverses sont exothermiques.

Les matériaux à changement de phase (plutôt pour solide liquide) sont utilisés dans le processus de refroidissement par évaporation d'un liquide ou d'un solide (sublimation) à

basse température, ce processus de fusion ou de sublimation thermique absorbe la chaleur de l'objet à refroidir à température à peu près constante. Cette chaleur est ensuite restituée plus loin (dans le condenseur) à l'environnement, faisant condenser le gaz formé. Les températures de changement de phase peuvent être modifiées en agissant sur la pression de l'enceinte dans laquelle est enfermé le matériau diphasique. Ce cycle s'auto-entretient assurant ainsi un bon transfert thermique.

Les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur qui combinent à la fois les propriétés de bonne conductivité thermique et de transition de phase pour gérer efficacement le transfert de chaleur entre deux interfaces.

Le principe du caloduc a été découvert en 1930, mais aucun usage industriel n'avait été trouvé. En 1963, au laboratoire de Los Alamos, grâce aux travaux du physicien nucléaire George M. Grover, une application de ce principe fut mise au point : le premier caloduc était alors né.

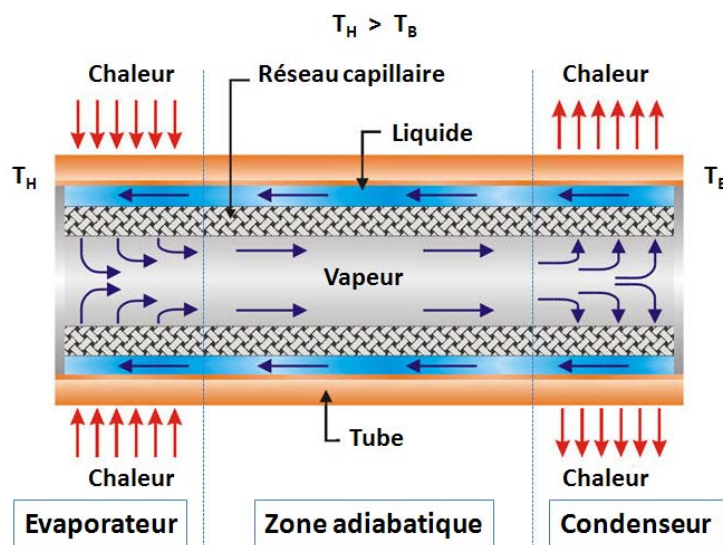


Figure I.15 : Schéma de caloduc classique.

La figure I.15 monte un schéma de caloduc classique. Le caloduc est un mince tube à deux parois métalliques fermées. Un liquide est injecté à l'intérieur. Plusieurs types de liquide peuvent servir de fluide caloporteur, ce qui inclut le potassium, le sodium, l'indium, le césium, le lithium, le bismuth, le mercure, l'eau, l'alcool de bois, l'acétone, les réfrigérants (fréons) l'azote, l'oxygène et d'autres sels inorganiques [20].

Dans ce caloduc classique, il y a trois grandes zones : Evaporateur, zone adiabatique, condenseur. L'échange thermique suit cinq étapes principales :

1. Dans l'évaporateur, la chaleur extraite de la source traverse la paroi du tube et fait chauffer le liquide enfermé.
2. Dans l'évaporateur, le liquide est vaporisé. Un gaz se forme.
3. Comme la température d'évaporateur ( $T_H$ ) est plus grande que celle du condenseur ( $T_B$ ), la pression dans l'évaporateur est plus grande que celle du condenseur. La vapeur s'écoule donc vers condenseur en traversant la zone adiabatique.
4. Quand la vapeur atteint la zone du condenseur, celle-ci se liquéfie.
5. Le liquide retourne par capillarité à l'évaporateur pour subir une nouvelle évaporation.

Les principaux avantages du caloduc sont:

1. Haute conductivité thermique. Le principe du caloduc repose sur la transition de phase du fluide qui absorbe et libère de façon cyclique de l'énergie sous forme de chaleur latente. Ce phénomène traduit en conductivité thermique équivalente peut atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celles du cuivre.
2. Le caloduc peut être utilisé pour diffuser la chaleur et augmenter ainsi la surface d'échange avec l'environnement
3. Le caloduc ne nécessite pas un grand écart de température (entre évaporateur et concentrateur) pour l'extraction de la chaleur.
4. Sa durée de vie est élevée : Il s'agit d'un tube fermé, sans besoin d'ajouter du fluide, il n'y a pas de pièces mobiles, ce qui le rend fiable et silencieux.

## I.4 Le diamant CVD

Mise à part le cristal semiconducteur, dont le choix est essentiellement guidé par les propriétés électriques et fonctionnelles, les couches qui forment l'assemblage (support, boîtier et refroidissement) sont choisies pour leurs propriétés thermiques, et souvent pour réaliser une isolation électrique. L'agencement de l'ensemble des couches doit aussi prendre en compte les coefficients de dilatation pour assurer une tenue mécanique et éviter des vieillissements prématurés.

Matériel	Conductivité thermique	CTE (Thermal expansion)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24-28 W/ (m·K)	7.3 ppm/K
BeO	250-300 W/ (m·K)	6.3 ppm/K
AlN	120-285 W/ (m·K)	3.3 ppm/K
Diamant CVD	1000-2000 W/ (m·K)	1.5 ppm/K
Si	163 W/ (m·K)	2.6 ppm/K

**Tableau I.2 : Conductivité thermique et le coefficient de dilatation de quelques matériaux (Isolant électrique)**

Le tableau I.2 donne la conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique des matériaux le plus souvent utilisés dans le domaine des composants de puissance. On peut noter que le diamant présente des propriétés physico-chimiques exceptionnelles particulièrement adaptées à la gestion thermique des composants semi-conducteurs de l'électronique de puissance. C'est le meilleur conducteur thermique, le meilleur isolant électrique et de plus son coefficient de dilatation thermique est le plus proche de celui du silicium. Cette dernière propriété est favorable à la tenue mécanique de l'assemblage.

### I.4.1 Diamant CVD

Le diamant présente des propriétés physico-chimiques exceptionnelles. C'est théoriquement le meilleur isolant connu à ce jour ( $\rho=10^{14}\Omega \cdot \text{cm}$   $E_c=10\text{MV/cm}$ ) et il présente une conductivité thermique exceptionnelle de 2000W/m·K (5 fois la conductivité thermique du cuivre à température ambiante) [21].

Ce matériau est aujourd'hui réalisé de manière synthétique par dépôt chimique en phase vapeur CVD. Cela permet d'obtenir des substrats de surfaces importantes avec une bonne reproductibilité des caractéristiques.

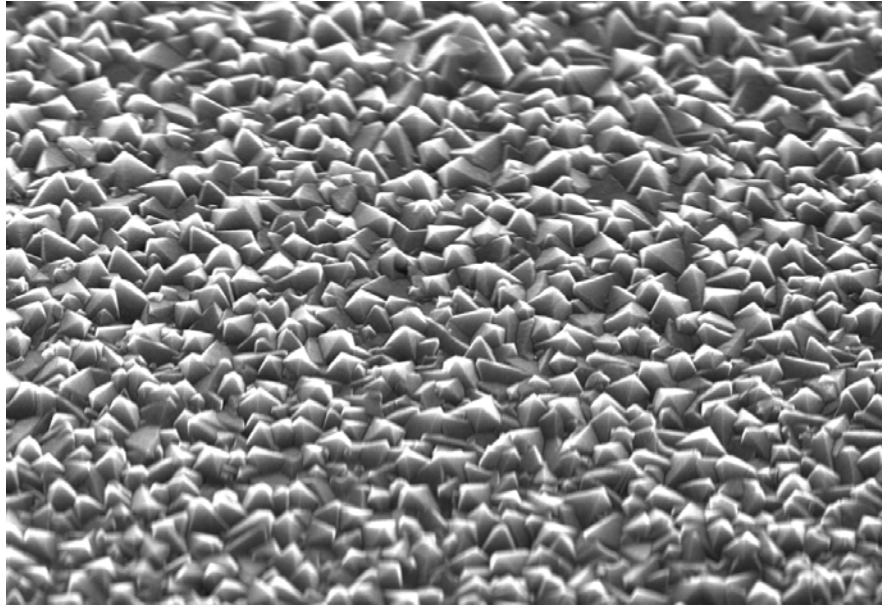


Figure I.16 : Diamant CVD sur Silicium

### I.4.1.1 Cristallographie du diamant

Le Diamant est un minéral composé d'atomes de carbone. Pendant le processus de cristallisation du diamant, chaque atome de carbone se lie par liaisons covalentes avec quatre autres atomes de carbones. De sorte que chaque atome de carbone participe à une structure atomique très stable à symétrie tétraédrique. La structure résultante forme un bloc compact de densité  $3.52 \text{ g/cm}^3$ , cette structure est la plus solide de toutes celles connues.

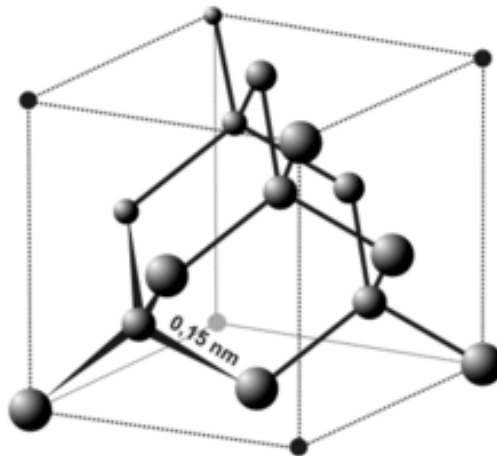


Figure I.17 : Structure cristalline du diamant

Dans les métaux, la chaleur est transmise par les électrons libres. Pour les cristaux, tels que le diamant, les électrons sont solidement liés aux atomes de carbone, et à la température ambiante il n'y a pratiquement pas d'électron libre. Par conséquent, la conduction thermique dans ce cristal est essentiellement liée aux vibrations du réseau cristallin des atomes de carbone. La structure propre au diamant avec une forte densité d'atome et des liaisons covalentes entre les atomes bien plus importantes que pour les autres cristaux confère à ce matériau une conductivité thermique bien plus élevée que celle des autres matériaux[28].

### I.4.1.2 Croissance de diamant CVD

Le diamant à l'état naturel est un matériau rare et cher à extraire. Pour abaisser le coût, le diamant synthétique est requis. Les techniques de croissance HPHT (Haute Pression Haute Température) et MEPCVD (Micro-Wave Enhanced Plasma Chemical Vapour Deposition) sont adaptés à cette demande.

#### HPHT

La première trace documentée d'une synthèse de diamant fabriqué sous HPHT remonte à 1953 et résulte des travaux d'un groupe suédois. Ceux-ci ont ensuite été repris et brevetés officiellement en 1955 par la société américaine General Electric. Le principe de la fabrication du diamant synthétique sous HPHT repose sur la conversion du graphite en diamant pour des conditions similaires à celles naturellement existantes lors de sa production dans le sol [29].

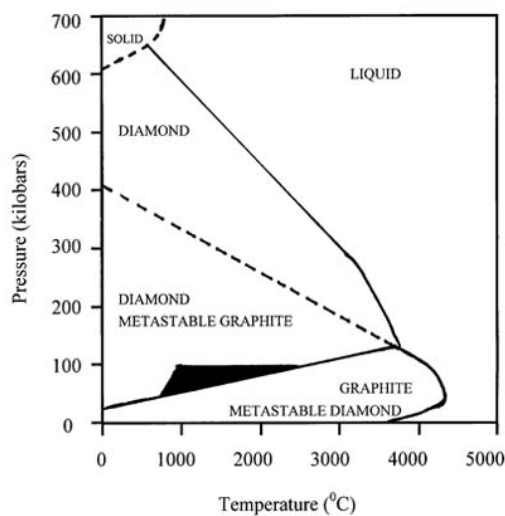


Figure I.18 : Diagramme thermodynamique du carbone

Le diagramme thermodynamique du carbone (figure I.18) présente les états stables de la structure en carbone : diamant, graphite et liquide de carbone en fonction de la pression et de la température. L'avantage de la technique HPHT est la croissance du diamant ultra-pur contenant moins de 1 ppb d'atomes d'azote incorporés. Pour la technique HPHT, les conditions de travail sont 8 à 10 GPa de pression et 1000 à 3000°C de température [30].

## **MEPCVD**

Les diamants obtenus par la technologie de HPHT ont des dimensions trop petites pour satisfaire tous les besoins. La technique MEPCVD y remédie en faisant généralement appel au mélange d'un composé carboné et d'hydrogène. Le composé carboné, la plupart du temps du méthane, fournit le carbone nécessaire à la croissance du diamant, tandis que l'hydrogène grave préférentiellement les phases de carbone non diamant, de sorte à obtenir un cristal pur.

Les molécules de gaz sont dissociées par le plasma micro-onde. La fréquence vaut généralement 2,45 GHz, la température du substrat est fixée entre 800 °C et 1100 °C. La pression peut varier de 10 torrs (1333 Pa) à 100 torrs (13333 Pa). Dans ces conditions, la forme stable du carbone est le graphite. La proportion de carbone diamant déposée par rapport au carbone non diamant est donc très faible. L'hydrogène, présent en grande concentration dans le bâti de croissance (> 95 %), permet une gravure fortement sélective des phases graphitiques. Outre la température et la pression, de nombreux paramètres tels que les concentrations partielles des différentes espèces, la densité du plasma, l'orientation cristalline du substrat et sa préparation préalable, ont un impact sur la cinétique de dépôt des films et sur leur qualité. La figure I.19 présente le schéma ainsi que la photographie d'un réacteur MEPCVD.

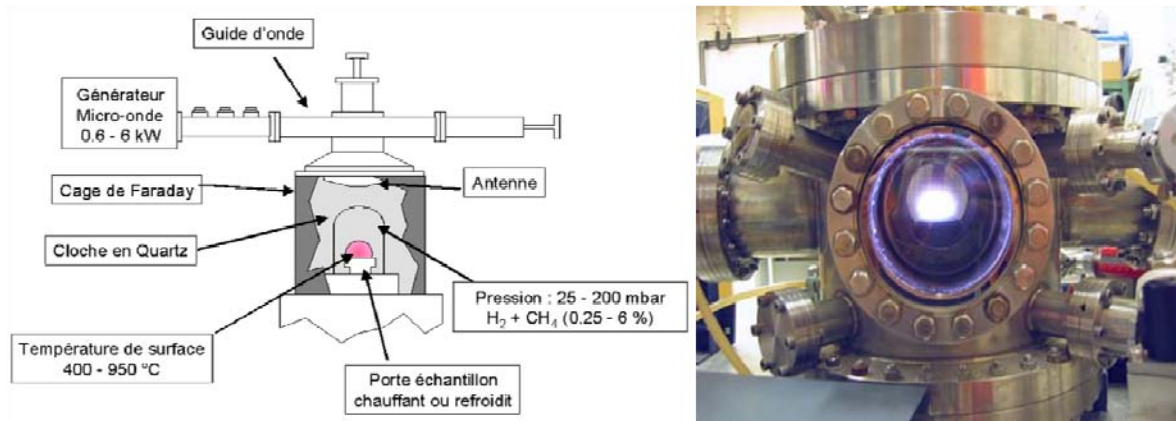


Figure I.19 : Structure d'un réacteur MEPCVD[30]

## Substrat de croissance

### 1. Homoépitaxie

L'homoépitaxie consiste à réaliser la croissance CVD sur un substrat monocristallin de diamant. Le substrat peut être un diamant naturel ou un diamant obtenu par HPHT. Cela permet d'obtenir les meilleures qualités électroniques de diamant CVD. Toutefois, les substrats de diamant disponibles à l'heure actuelle ont des surfaces allant environ de  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  à  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ . La taille des films de diamant monocristallins est donc limitée par la taille des substrats disponibles.

### 2. Hétéroépitaxie

Il est possible de condenser du carbone sous forme de diamant sur une grande variété de substrats supportant les températures de dépôt tels que les matériaux réfractaires Molybdène, Tungstène, Titane. Le silicium est le matériau le plus largement utilisé car son coefficient d'expansion thermique est proche de celui du diamant et évite le stress thermomécanique de la couche. Pourtant, le dépôt sur substrat non diamant n'a pour le moment donné lieu qu'à l'obtention de diamant polycristallin, du fait du désaccord de maille entre le diamant et le substrat utilisé. L'hétéroépitaxie est donc principalement utilisée pour déposer des films de grande taille, pour lesquels les paramètres de transport électrique ne sont pas essentiels. La taille des grains obtenus varie fortement selon les conditions de dépôt, le substrat utilisé et l'épaisseur du film. Les surfaces de dépôt peuvent atteindre et dépasser  $100 \text{ cm}^2$  pour des épaisseurs de 1mm.

## I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé de manière synthétique les principaux outils théoriques pour appréhender la gestion thermique. Nous nous sommes limités aux principales notions que nous avons utilisées dans nos travaux. La correspondance entre grandeurs thermiques et grandeurs électriques en est un exemple, puisque plus loin nous utiliserons largement la notion de résistance thermique. Le rayonnement thermique étant négligé volontairement dans notre étude n'a pas été approfondi. Nous avons ensuite passé en revue les différentes techniques de refroidissement avancées dédiées à l'électronique en général et pour l'électronique de puissance en particulier.

Les propriétés du diamant ont ensuite été mises en avant en comparaison avec les autres matériaux utilisés pour la gestion thermique en électronique. Et nous avons terminé par la présentation des techniques de croissance du diamant CVD que nous avons effectivement utilisé dans nos travaux.

## I.6 Bibliographie

1. Bejan, A., *Heat transfer* 1993: John Wiley & Sons, Inc.
2. Sergent, J.E. and A. Krum, *Thermal Management Handbook: For Electronic Assemblies* 1998: McGraw-Hill.
3. Dr. Martin März, P.N.I.T.A., Munich, *Thermal Modeling of Power-electronic Systems*.
4. Nebel, C.E., *Thin-film diamond I* 2003: Elsevier.
5. Horng, R.H., et al., *Thermal Management Design from Chip to Package for High Power InGaN/Sapphire LED Applications*. *Electrochemical and Solid State Letters*, 2009. **12**(6): p. H222-H225.
6. Graebner, J.E., et al., *Thermal conductivity of thin diamond films grown from d.c. discharge*. *Diamond and Related Materials*, 1996. **5**(6–8): p. 693-698.
7. Bianchi, A.M., Y. Fautrelle, and J. Etay, *Transferts thermiques* 2004: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
8. Fourier, J., *Théorie analytique de la chaleur* 1989: Jacques Gabay.
9. Iacona, E., J. Taine, and J.P. Petit, *Transferts thermiques: Introduction aux transferts d'énergie*, ed. e. édition 2008: Dunod.
10. Pitts, D.R. and L.E. Sissom, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer* 1998: McGraw-Hill.
11. TAWK, M., *Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique*, 2006.
12. Frank Fan, W. *Electronics packaging simplified radiation heat transfer analysis method*. in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004. ITherm '04. The Ninth Intersociety Conference on*. 2004.
13. Arcel, *Plaques à eau et Caloducs*. Arcel Electronique de puissance, 2012.
14. Funke. *Echangeurs à plaques*. in *Funke*. 2012. <http://www.funke.de/>.
15. Moore, G.E., *Cramming More Components onto Integrated Circuits*. *Solid-State Circuits Newsletter, IEEE*, April 19, 1965. **38**: p. 33-35.
16. Kandlikar, S.G. and A.V. Bapat, *Evaluation of Jet Impingement, Spray and Microchannel Chip Cooling Options for High Heat Flux Removal*. *Heat Transfer Engineering*, 2007. **28**(11): p. 911-923.
17. Silverman, I.Y., A. L.Reznik, S. N.Arenshtam, A.Kijet, D.Nagler, A., *High heat-flux accelerator targets: Cooling with liquid metal jet impingement*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006. **49**(17–18): p. 2782-2792.
18. Stephen A. Solovitz, M.E.L.D.S., Advanced Technology Leader, Ener, *Microchannels Take Heatsinks to the Next Level*, November 2006, *Power Electronic Technology: Power Electronic Technology* November 2006. p. 14-20.

19. Wang, B.X. and X.F. Peng, *Experimental investigation on liquid forced-convection heat transfer through microchannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994. **37, Supplement 1(0)**: p. 73-82.
20. Ivanova, M., *Conception et réalisation de fonctions thermiques intégrées dans le substrat de composants électroniques de puissance: apport de la gestion des flux thermiques par des mini et micro caloducs*, 2005.
21. Civrac, G., *Vers la réalisation de composants haute tension, forte puissance surdiamant CVD. Développement des technologies associées*, 2009.
22. Potocky, S., et al., *Growth of nanocrystalline diamond films deposited by microwave plasma CVD system at low substrate temperatures*. physica status solidi (a), 2006. **203(12)**: p. 3011-3015.
23. Baba, K.A., Yumi Shohata, Nobuaki *Thermal conductivity of diamond films*. Journal of Applied Physics, May 1991. **69**: p. 7313 - 7315
24. Robin E. Hamilton, P.G.K., John Ostop, Martin L. Baker, Gregory A. Arlow, John C. Golombek, Thomas J Fagan, Jr., *Microchannel cooling of high power semiconductor devices*.
25. Barrat, S., et al., *Image analysis to characterize CVD diamond deposits*. Revue De Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques, 2000. **97(2)**: p. 277-282.
26. Barrat, S., et al., *Synthesis of highly oriented CVD diamond films by ultra short bias enhanced nucleation step*. Diamond and Related Materials, 2001. **10(9-10)**: p. 1637-1642.
27. Scorsone, E., et al., *Enhanced control of diamond nanoparticle seeding using a polymer matrix*. Journal of Applied Physics, 2009. **106(1)**.
28. Pan, L.S. and D.R. Kania, *Diamond: Electronic Properties and Applications*1995: Kluwer Academic.
29. Russo, C.T., *Etude et réalisation de jonctions p/n en diamant*2006.
30. Tranchant, N., *Synthèse et caractérisation de diamants monocristallins pour applications de détecteur de rayonnements*2008.
31. Avenas, Y., *Etude et réalisation de caloducs plats miniatures pour l'intégration en électronique de puissance*, 2002.
32. Minges, M.L. and A.I.H. Committee, *Electronic Materials Handbook: Packaging*1989: Asm International.
33. Harper, C.A., *Electronic packaging and interconnection handbook*2000: McGraw-Hill.
34. Tong, X.C., *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*2010: Springer.
35. Tummala, R.R., E.J. Rymaszewski, and A.G. Klopfenstein, *Microelectronics Packaging Handbook: Semiconductor packaging*1997: Chapman & Hall.
36. Puttlitz, K.J. and P. Totta, *Area Array Interconnection Handbook*2001: Kluwer Academic Publishers.

**Chapitre II Etude par simulation de  
nouvelles structures de refroidissement à  
base de diamant CVD**



## II.1 Introduction

La simulation numérique est devenue un outil incontournable pour l'étude de la gestion thermique des systèmes électroniques. Nous avons utilisé le simulateur COMSOL qui dispose d'un solveur d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Ce logiciel peut ainsi être utilisé pour résoudre quelques problèmes de physique. Nous avons pour notre part utilisé la résolution de problèmes thermiques et électrothermiques. Nous présentons ici les études préliminaires que nous avons menées pour définir les paramètres nécessaires à la simulation de solutions à base de substrats en diamant. Nous disposons ainsi aujourd'hui d'une plateforme de simulation fiable pour développer nos études.

### II.1.1 Simulateur COMSOL

Dans nos études, nous utilisons le simulateur COMSOL, outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux. Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques. Le module de « Heat transfert » est un module optionnel qui étend les possibilités de COMSOL avec des interfaces utilisateur personnalisées et des fonctionnalités optimisées pour l'analyse de la transmission de la chaleur. Ils ont été mis au point pour un large public, notamment pour les chercheurs, les développeurs, les enseignants et les étudiants. Le transfert de chaleur est impliqué dans presque tous les types de processus physiques et il peut être le facteur limitant pour nombre d'entre eux. Son étude est souvent d'une importance vitale et nécessite des outils puissants d'analyse. En outre, la transmission de la chaleur apparaît souvent couplée à d'autres phénomènes physiques, ce qui peut être traité dans COMSOL [7].

Le module thermique supporte tous les mécanismes fondamentaux de transfert de chaleur : conduction, convection, rayonnement. Nous avons le plus souvent négligé le rayonnement, les équations thermiques résolues par le simulateur sont alors :

$$\nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \quad \text{Équation II.1}$$

$$-n \cdot (-k\nabla T) = q_0 + h \cdot (T_{inf} - T) \quad \text{Équation II.2}$$

$k$  (W/m·K) représente la conductivité thermique en fonction du matériel.

$T$  (°C) représente la température en fonction des équations.

$Q$  (W/m<sup>3</sup>) représente la source de chaleur.

$q_0$  (W/m<sup>2</sup>) représente le flux de chaleur entrant.

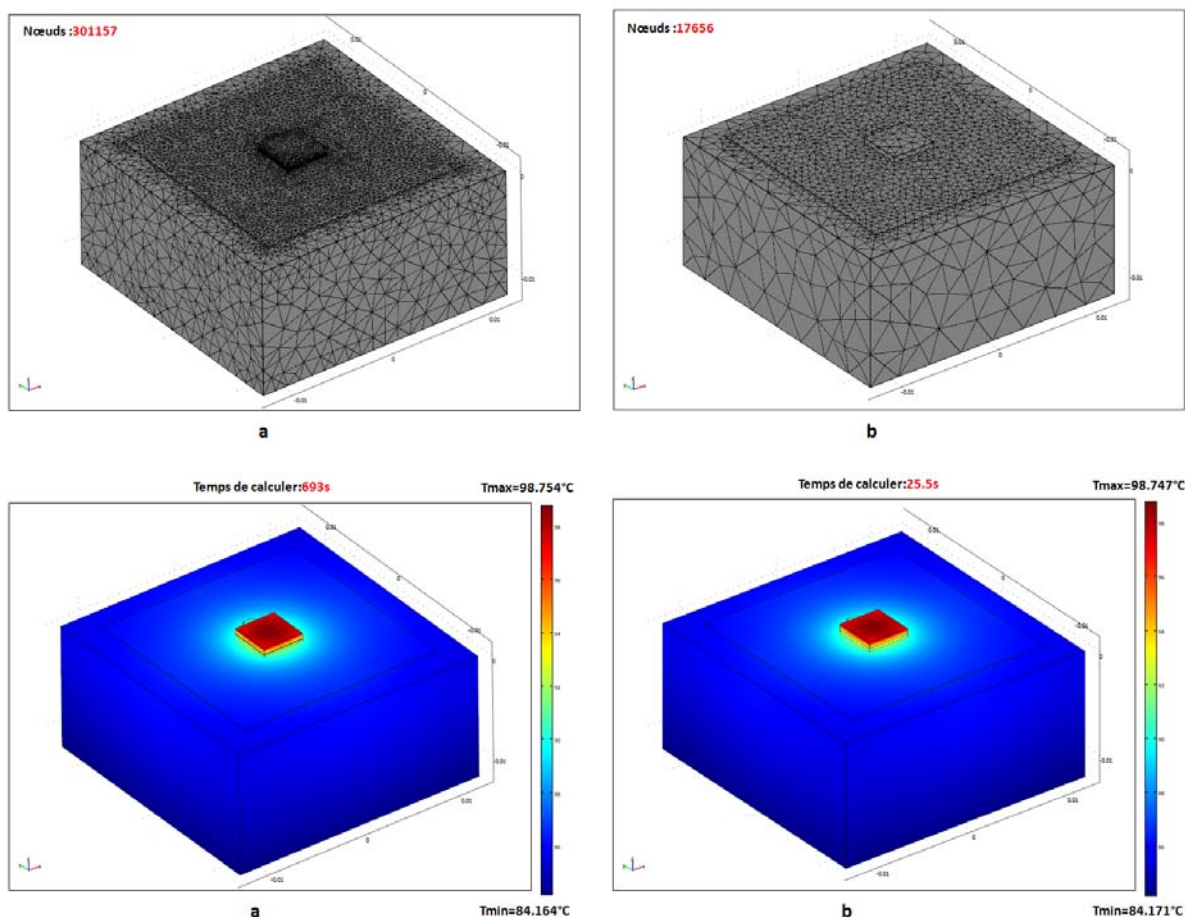
$h$  (W/m<sup>2</sup>·k) représente le coefficient d'échange convectif.

$T_{inf}$  (°C) représente la température initiale.

## II.1.2 Nécessité de simplification du modèle

La définition du maillage est très importante pour garantir la validité des résultats de calcul. Le maillage doit être suffisamment fin pour représenter correctement la réalité. Pour cela, on commence par un maillage très fin, et l'on relâche ce maillage jusqu'à ce que celui-ci ait un effet sur les résultats, à ce stade on a atteint le maillage juste suffisant pour la résolution spatiale escomptée. Les modules d'électronique de puissance que nous avons étudiés sont constitués d'un grand nombre de couches de dimensions diverses. Le maillage automatique pour ce type de structure n'est pas adapté car il effectue un resserrement sur les couches fines qui peut être extrapolé sur les couches plus massives, ou relâche le maillage de façon brutale ce qui aboutit à des résultats aberrants. Nous avons donc préféré réaliser directement un maillage manuel couche par couche. Ce maillage est adapté au problème à résoudre. Pour un point statique nous pourrions augmenter le nombre de mailles si l'on souhaite avoir une meilleure résolution. Pour le calcul d'une réponse dynamique qui nécessite un grand nombre de points de calcul, et afin de ne pas alourdir celui-ci, la résolution spatiale ne peut pas être

trop augmentée. Par ailleurs, lorsque la réponse dynamique est calculée sur un intervalle de temps pour lequel le flux thermique n'a pas traversé toutes les couches, nous pouvons réduire le modèle 3D en remplaçant les couches non concernées par une condition aux limites, ce qui réduit le temps de calcul.



**Figure II.1 : Comparaison de l'effet selon la différence de nombre de nœuds**

La figure II.1: Comparaison de l'effet selon la différence de nombre de nœuds montre les résultats d'une optimisation du maillage. Sur l'illustration (a) il y a 331157 nœuds. Après optimisation du maillage, l'illustration (b) montre qu'il reste 17656 de nœuds sur la même structure. Nous obtenons le même résultat de simulation avec cette procédure d'optimisation, mais nous gagnons plus de temps de calcul. Cette optimisation est très utile pour les structures complexes.

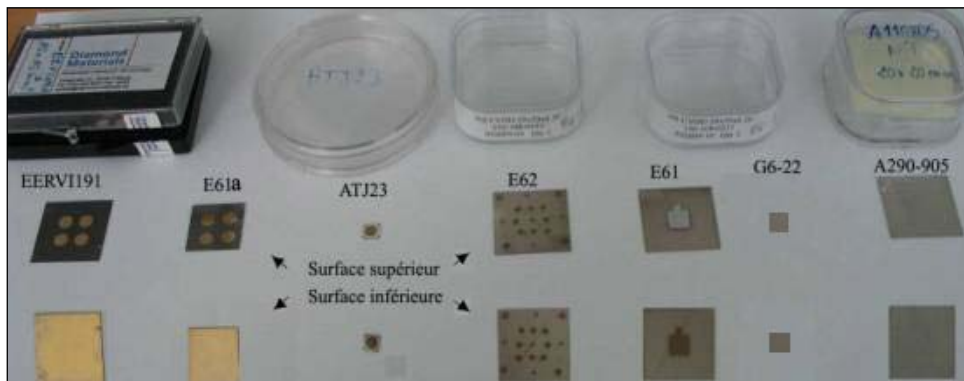
## II.1.3 Extraction des paramètres

La bibliothèque associée à COMSOL contient la plupart des propriétés physiques et chimiques d'un grand nombre de matériaux. Il est alors facile d'utiliser ces paramètres pour connaître la conduction thermique dans ces matériaux. Le diamant CVD peut présenter des paramètres différents en fonction de la qualité de la croissance. Nous avons alors mené une campagne de mesure pour connaître plus précisément les propriétés des différentes couches dont nous disposons.

Nous avons choisi de représenter les phénomènes d'échanges convectifs par le coefficient d'échange convectif  $h$  ( $W/m^2 \cdot K$ ). Ce paramètre  $h$  dépend fortement des conditions aux limites et est très difficile à identifier d'une façon générale. Nous avons alors réalisé différents modules de test pour définir ce coefficient dans les conditions de nos études.

### II.1.3.1 Mesures des propriétés thermiques du diamant CVD

Les substrats de diamant utilisés pour la gestion thermique sont disponibles sous forme de couches polycristallines réalisées par croissance CVD comme décrit au chapitre I. Nous avons évalué différentes couches de sources universitaires ou industrielles (voir tableau II.1).



	ERVII191	E61	ATJ23 Monocristallin	G6-22	A290-905
Provenance	Franhauffer	Element Six	LIMHP	LIMHP	CEA
Épaisseur	266 $\mu$ m	215 $\mu$ m	215 $\mu$ m	175 $\mu$ m	300 $\mu$ m
Dimension (mm)	20*20	20*20	5*5	5*5	20*20

Tableau II.1 : Présentation des substrats

## Conductivité thermique

La conductivité thermique des différentes couches de diamant a été mesurée au Laboratoire d'Optique Physique de L'ESPCI (Ecole Supérieure de Physique et Chimie Industrielle) par la technique dite du mirage. Cette technique permet de mesurer des conductivités élevées avec précision sans contact ni mise en œuvre particulière.

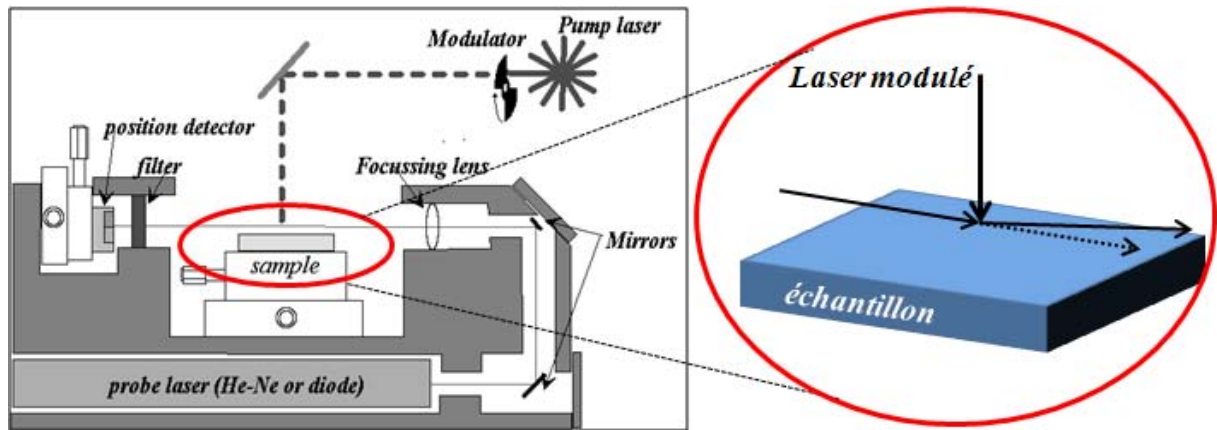


Figure II.2: Principe de mesure par la méthode du mirage

Le principe de cette mesure est illustré figure II.2. L'échantillon est chauffé en un point  $x$  par un laser modulé à une pulsation. L'expression de la température en un point distant d'un rayon  $R$  du point d'impact s'écrit (cas d'un matériau homogène) :

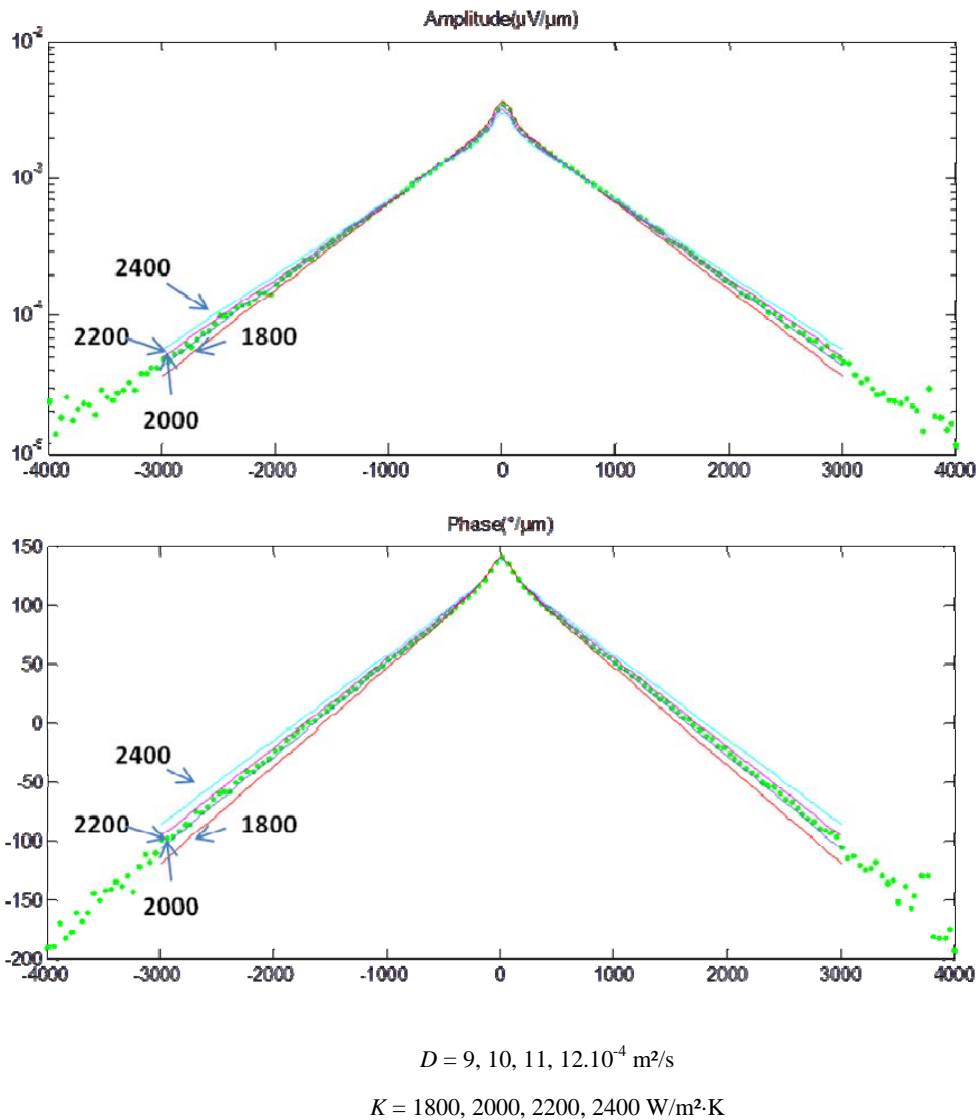
$$T(R, t) = T_0 / R \exp(-R / \mu) \exp(j(\omega t - R / \mu)) \quad \text{Équation II.3}$$

Avec  $\mu$  la longueur de diffusion  $\mu = \sqrt{(k/2\pi f \rho C)} = \sqrt{(D/2\pi f)}$ ,  $D$  la diffusivité thermique  $D = k/\rho C_p$ ,  $k$  la conductivité thermique,  $\rho$  la densité volumique,  $C_p$  la chaleur spécifique du matériau et  $f = \omega/2\pi$  la fréquence de modulation du laser de chauffe.

En supposant que  $\rho$  et  $C_p$  sont constantes (hypothèse couramment admise) nous pouvons remarquer que l'amplitude de la température décroît exponentiellement en fonction de la conductivité thermique. De même le déphasage entre l'onde thermique et le laser de chauffe dépend linéairement de  $k$ .

Ce rayon crée une onde thermique autour du point d'impact qui peut être détectée par déviation d'un laser qui frôle la surface et se déplace en Z. Cette déviation est mesurée en amplitude et en phase par rapport à l'onde de chauffe.

L'identification de la conductivité est réalisée graphiquement en ajustant au mieux le paramètre k (donc  $D$ ) dans le modèle pour faire correspondre les courbes mesurées et théoriques.



**Figure II.3: Exemple de mesures Echantillon ERVI avec 274  $\mu\text{m}$  d'épaisseur [50]**

Nous voyons que cet échantillon (E61) présente une diffusivité entre  $10 \cdot 10^{-4}$  et  $11 \cdot 10^{-4}$   $\text{m}^2/\text{s}$ , soit une conductivité k comprise entre 2000 et 2200  $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ .

Si nous reprenons ces essais pour les différents échantillons nous pouvons affirmer que la conductivité thermique du diamant CVD est au moins égale à 2000 W/m<sup>2</sup>·K.

Ainsi, d'une façon générale, la conductivité thermique est un paramètre bien maîtrisé tant sur les couches polycristallines que sur les couches monocristallines. En effet, les joints de grain n'influent que très peu sur la conductivité thermique lorsque les films sont épais et il est ainsi possible d'obtenir de façon reproductible des conductivités thermiques supérieures à 2000 W/ m<sup>2</sup>·K.

### II.1.3.2 Evaluation du coefficient d'échange thermique $h$

Le coefficient  $h$  dépend des propriétés thermo-physiques du fluide, de la convection naturelle ou forcée de l'écoulement, de la différence de température entre la paroi et le film et de bien d'autres paramètres qui rendent sa détermination théorique délicate.

Voici quelques ordres de grandeurs des valeurs que peut prendre le coefficient de convection  $h$  dans différentes conditions:

Type de transfert	Fluide	$h$ (W/m <sup>2</sup> ·K)
Convection naturelle	Gaz	5-30
	Eau	100-1000
Convection Forcée	Gaz	10-300
	Eau	300-12000
	Huile	50-1700
	Métal liquide	6000-110000
Changement de phase (eau)	Ebullition	3000-60000
	Condensation	5000-110000

Tableau II.2 Ordres de grandeur du coefficient d'échange convectif  $h$

Pour nos études nous avons choisi d'identifier  $h$  dans des conditions proches de celles de nos essais en admettant que  $h$  varie peu dans notre domaine de variation de température. L'identification est obtenue sur des dispositifs de test simples en comparant la simulation et la mesure par une caméra infrarouge.  $h$ , seul paramètre inconnu dans la simulation sera déterminé par itérations successives.

Nous avons ainsi déterminé  $h$  dans différentes conditions représentatives de nos essais : une convection naturelle dans l'air, un refroidissement par plaque à eau, un refroidissement par lame d'eau.

### Principe de la mesure :

La figure II.4 montre le dispositif expérimental qui nous a permis de faire les caractérisations thermiques. Il se compose d'un élément essentiel qu'est la caméra infrarouge qui nous permet d'accéder à des cartes de températures (statiques ou transitoires) à la surface présentée à l'objectif de la caméra.

Afin d'augmenter l'émissivité des puces dont on souhaite mesurer la température, nous avons dû faire appel à une peinture noire ayant une émissivité proche de 1. Afin d'identifier la vraie émissivité résultante du recouvrement de la puce avec la peinture, nous avons réalisé un calibrage en mettant la puce à température connue. Ainsi nous avons pu déterminer la valeur réelle de l'émissivité aux points qui nous intéressent.

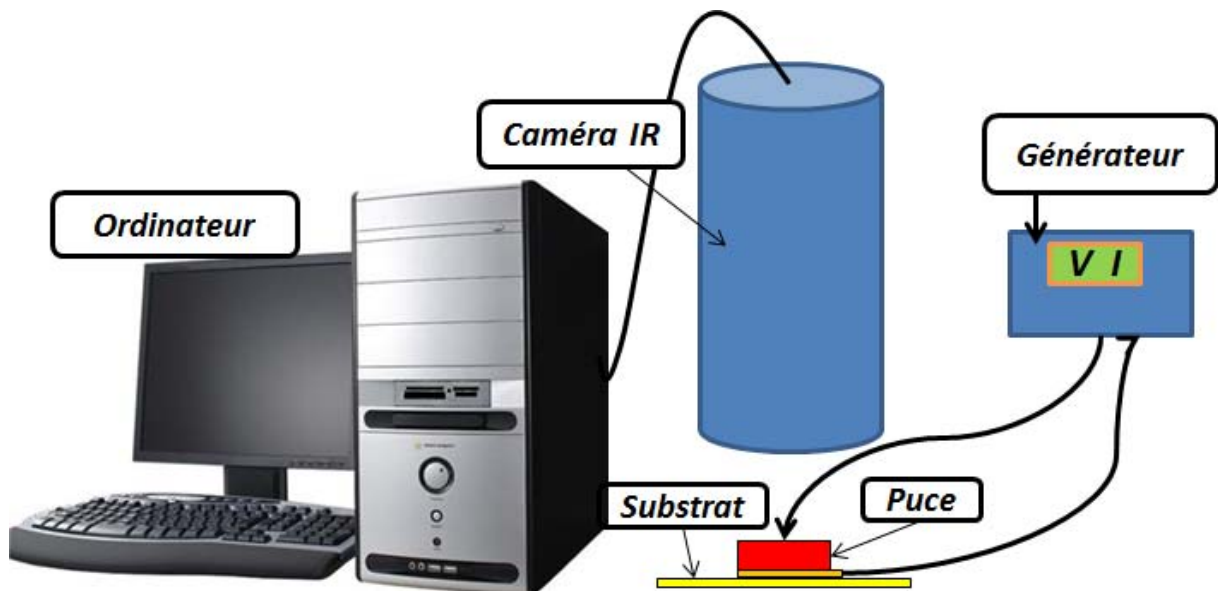
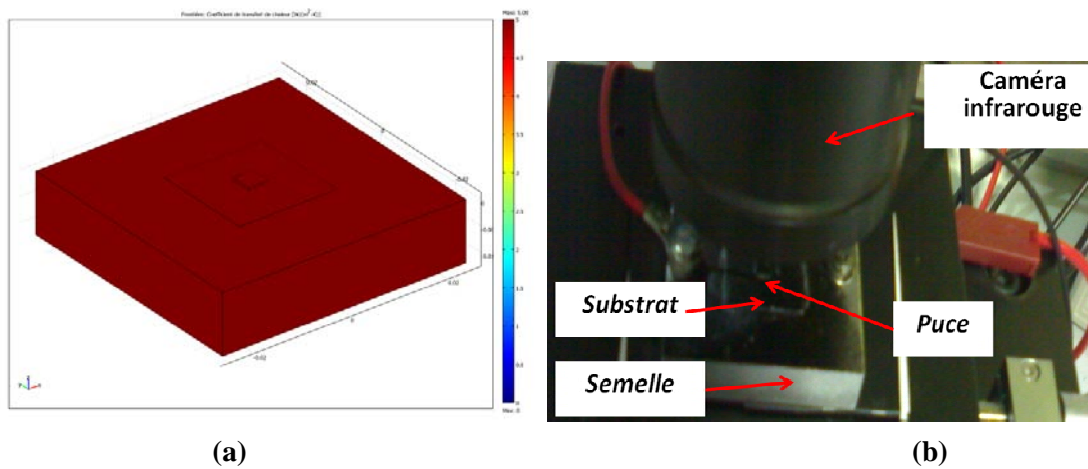


Figure II.4 : Principales des mesures thermographiques

### Cas de la convection naturelle dans l'air

Pour mesurer  $h$  en convection naturelle dans l'air nous avons simulé la structure présentée figure II.5.



**Figure II.5 : Simulation et test pour déduire  $h$  dans l'air**  
**(a) Simulation thermique 3D, ajustement du coefficient  $h$  pour obtenir la même température max de la puce par la mesure (b) Cartographie thermique du dispositif**

Une puce de silicium faiblement dopée fait office de résistance chauffante (11 ohms), elle est brasée sur un substrat en diamant CVD lui-même reporté avec de la graisse thermique sur une semelle. La semelle est posée sur une structure isolante, il ne peut y avoir que de l'échange convectif par les faces supérieures. Nous travaillons à des températures suffisamment faibles pour pouvoir négliger le rayonnement. La figure II.6 présente la comparaison entre nos mesures et la simulation pour le point de température maximale du composant. La densité de puissance est exprimée comme la puissance totale dissipée dans le composant divisée par la surface de la puce de silicium. Ces essais permettent de déduire  $h$  dans le domaine de température qui nous intéresse.

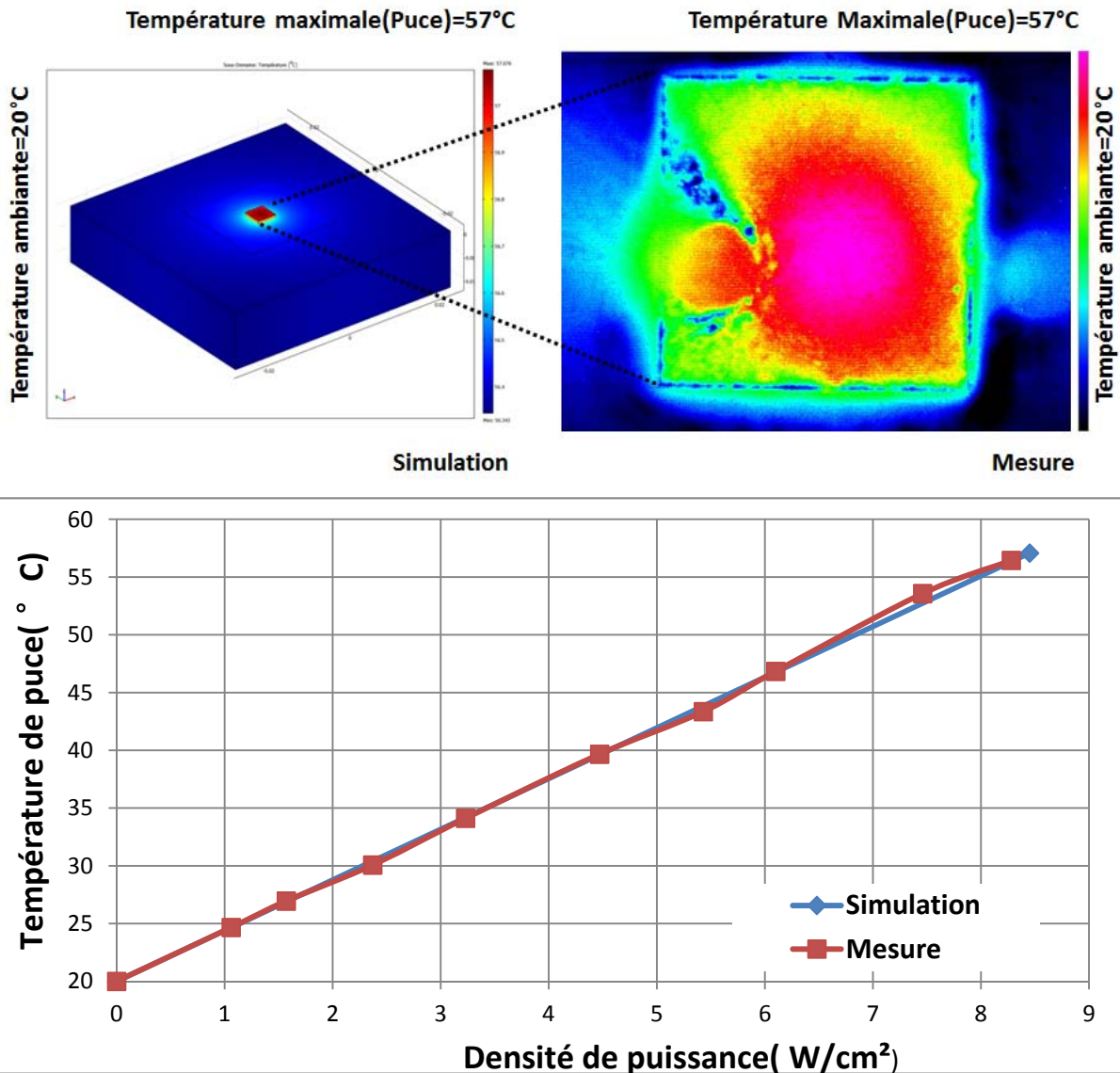


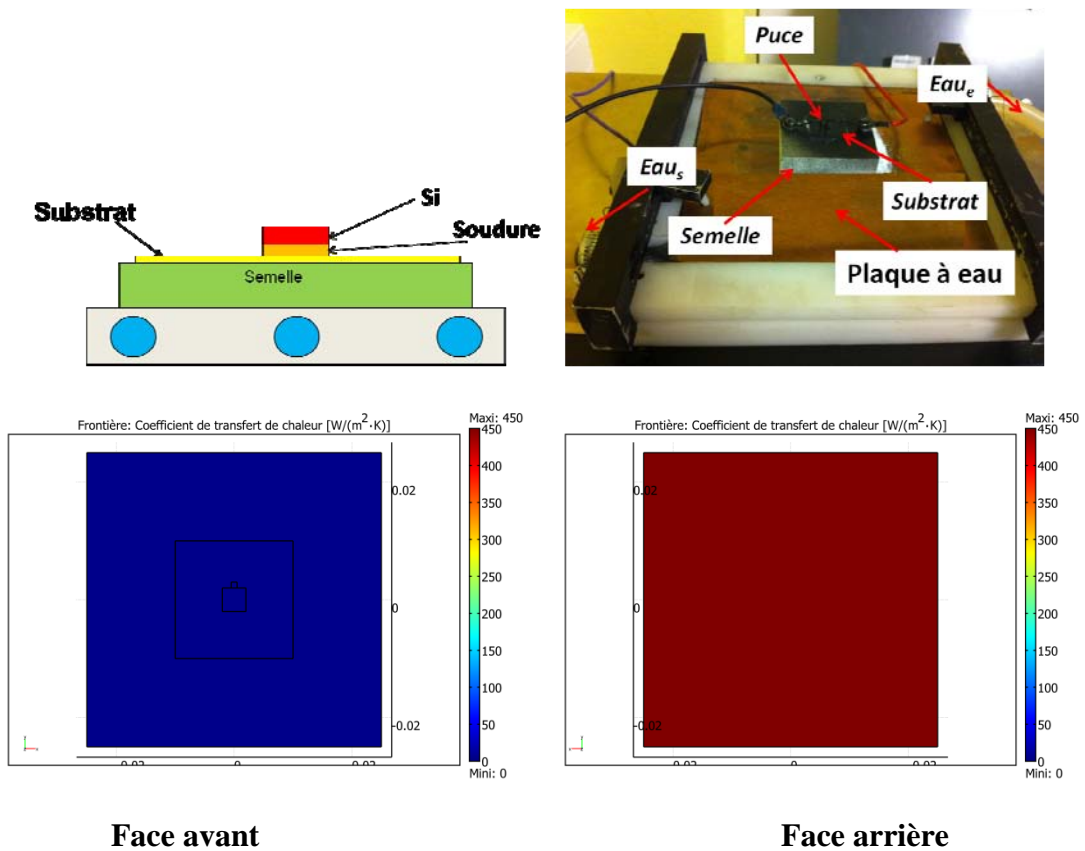
Figure II.6 : Simulation et mesure pour  $h_1=5\text{W/cm}^2\cdot\text{K}$ . En haut simulation numérique et mesure IR pour une densité de puissance de  $8.5\text{W/cm}^2$

Nous retrouvons un coefficient  $h$  classiquement autour de  $5\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  [9]. Si nous utilisons cette valeur pour nos simulations nous trouvons le résultat de la figure II.6. Ce qui valide notre hypothèse. Nous appelons ce paramètre:  $h_1$ .

### Cas du refroidissement par plaque à eau

Pour exprimer l'échange convectif dans le cas d'une plaque à eau, nous avons simulé et testé la structure qui est présentée ci-dessous (figure II.7). Cette fois-ci la face arrière de la semelle est refroidie par une plaque à eau. Il existe toujours un échange convectif dans l'air

que nous venons de déterminer plus cette fois-ci un échange bien plus important par la face arrière.



**Figure II.7 : Principe et test pour déduire  $h$  pour une plaque à eau. Pour simplifier le modèle nous ne simulons pas la plaque à eau et considérons un coefficient d'échange équivalent  $h_2$  à l'interface substrat/plaque à eau**

Il nous reste à déterminer le coefficient  $h$  équivalent à notre plaque à eau ramenée sous la surface de la semelle. En ajustant les paramètres dans notre simulation nous trouvons  $h_2=450\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ .

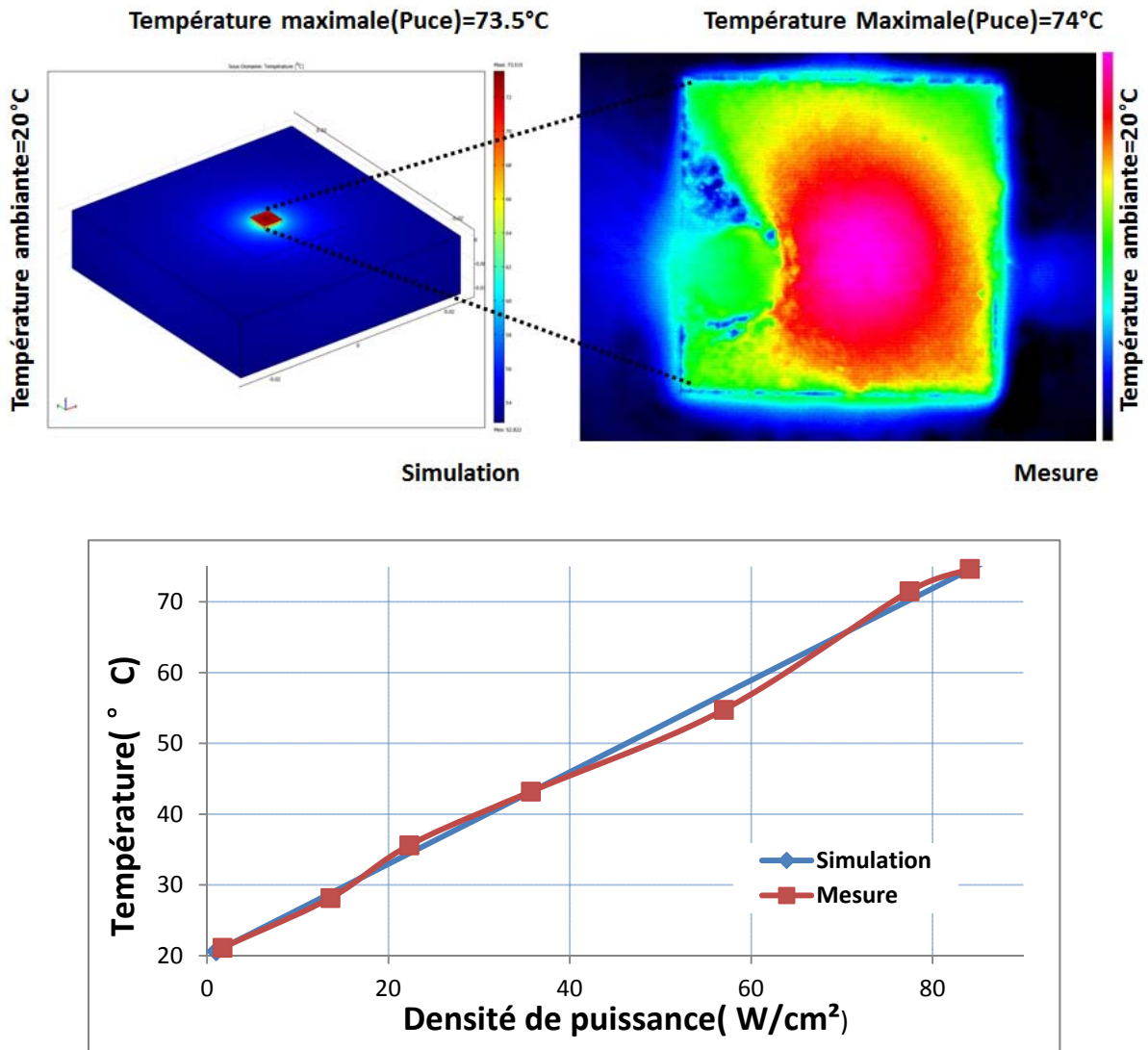
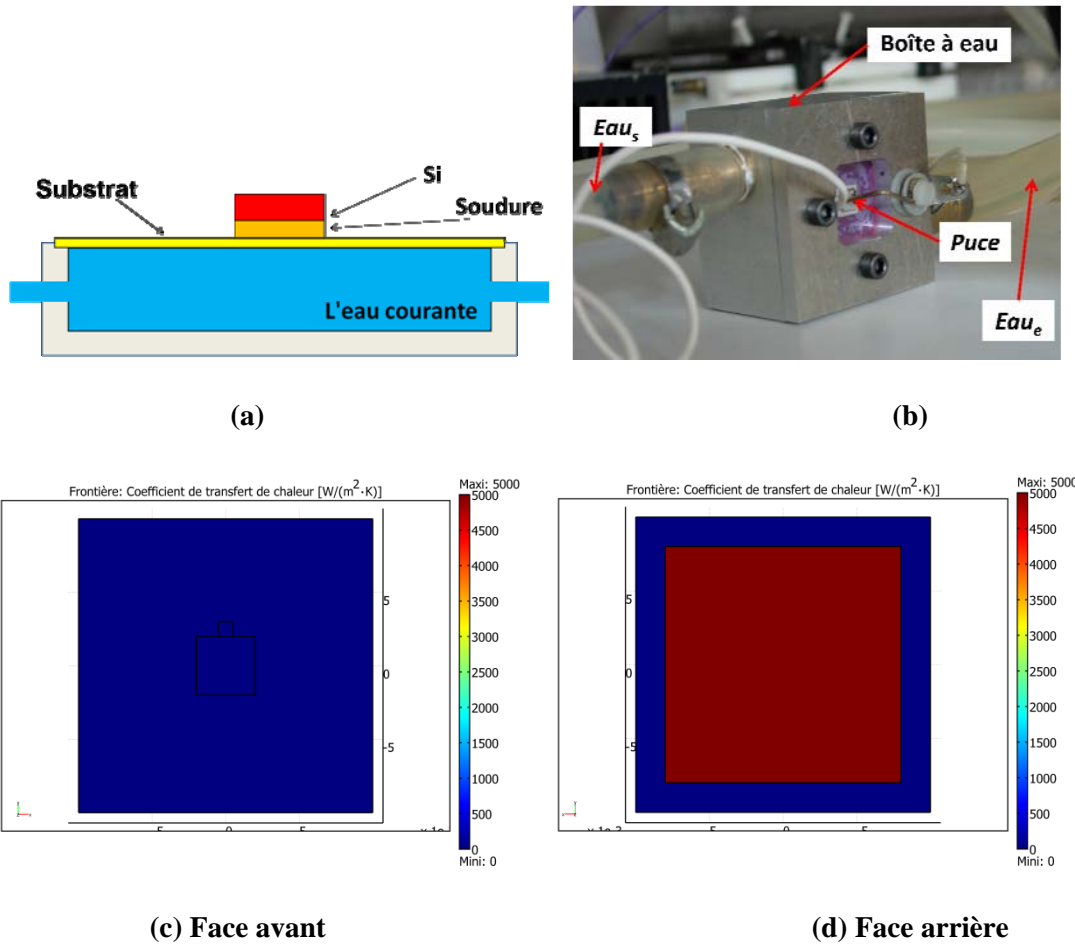


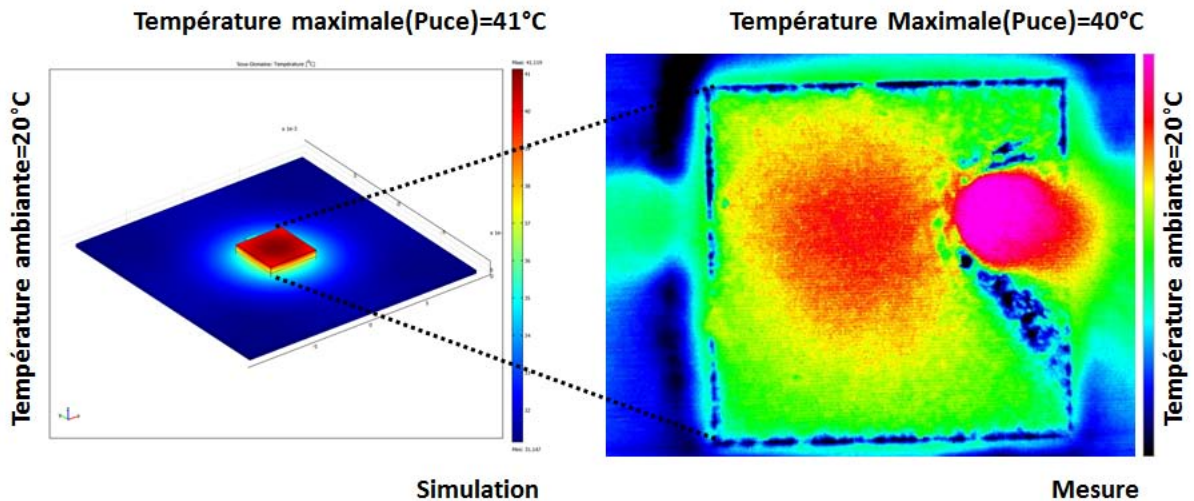
Figure II.8 Simulation et mesure pour  $h_2=450 \text{ W/cm}^2\cdot\text{K}$ . En haut simulation et mesure pour une densité de puissance de  $85 \text{ W/cm}^2$ . En bas, pour une puissance variable

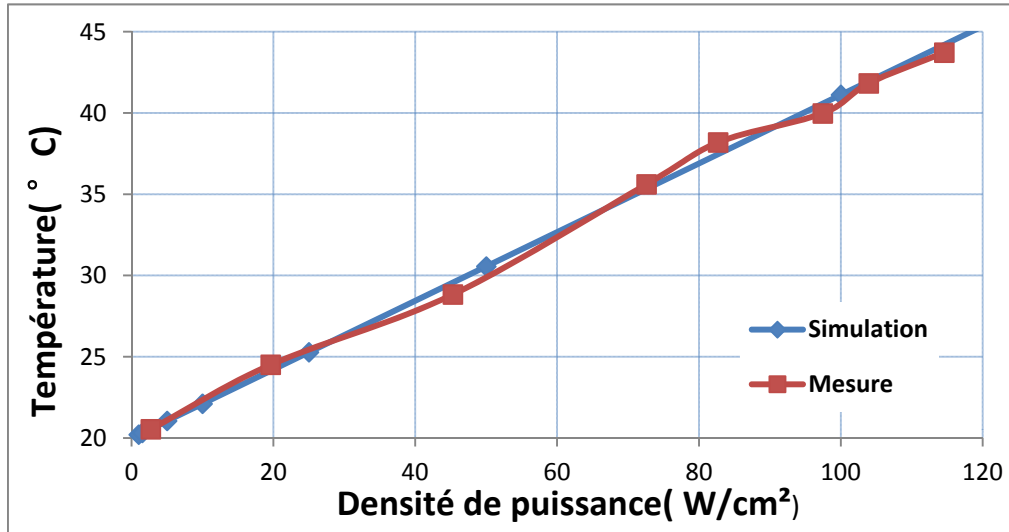
### Cas d'une lame d'eau

Comme nous le verrons au chapitre III nous avons développé un système de refroidissement direct du substrat. Pour pouvoir mener à bien nos simulations il nous fallait connaître le coefficient  $h$  dans ce cas particulier. Pour cela nous avons développé un dispositif de mesure spécifique présenté figure II.9. Le substrat diamant est directement refroidi par la circulation de l'eau à l'intérieur de la boîte à eau [11].



**Figure II.9: Description du dispositif de mesure de l'échange convectif par lame d'eau**  
 (a),(b) : Description et mise en œuvre de la boîte à eau. (c) Coefficient  $h$  sur la face supérieure. (d) Coefficient  $h$  sur la face inférieure en contact avec l'eau





**Figure II.10** Mesure infrarouge et comparaison avec la simulation pour  $h_3=5000$  W/cm<sup>2</sup>.K. En haut simulation et mesure IR pour une densité de puissance de 100W/cm<sup>2</sup>. En bas, pour une puissance variable

La figure II.10 présente les résultats des simulations et mesures avec une eau à 20°C et une vitesse de circulation est 1500 cm<sup>3</sup>/min. En comparant le résultat de mesures infrarouges à la simulation 3D, on déduit un coefficient d'échange thermique  $h_3=5000$  W/m<sup>2</sup>.K pour la surface en contact avec l'eau.

Nous avons ainsi identifié le paramètre  $h$  dans les différentes configurations qui nous intéressent, nous pouvons maintenant mener des études par simulation pour comparer les performances thermiques de différents dispositifs de refroidissement.

## II.2 Etude de différentes solutions de refroidissement à l'aide d'un substrat diamant

L'objectif ici est de définir et de quantifier l'apport de substrats en diamant en fonction des dispositifs étudiés. Il faut en effet un gain thermique important pour justifier l'utilisation du diamant qui reste un matériau coûteux.

Pour toutes les simulations qui suivent, et sauf mention contraire, les substrats diamant ou AlN font  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  et  $250 \mu\text{m}$  d'épaisseur sur lesquels est reportée une puce chauffante de  $4 \times 4 \text{ mm}^2$ . La température ambiante air ou eau est de  $20^\circ\text{C}$ .

Pour alléger le document les modèles de simulations sont fournis en annexes, seuls les principaux résultats et les schémas de principe sont présentés ci-dessous.

## II.2.1 Apport du diamant pour une solution standard

Nous allons commencer par simuler un système de refroidissement classique de modules IGBT dans lequel on remplace le traditionnel substrat isolant Alumine ou AlN par un substrat en diamant CVD. La vue en coupe pour un IGBT est présentée figure II.11.

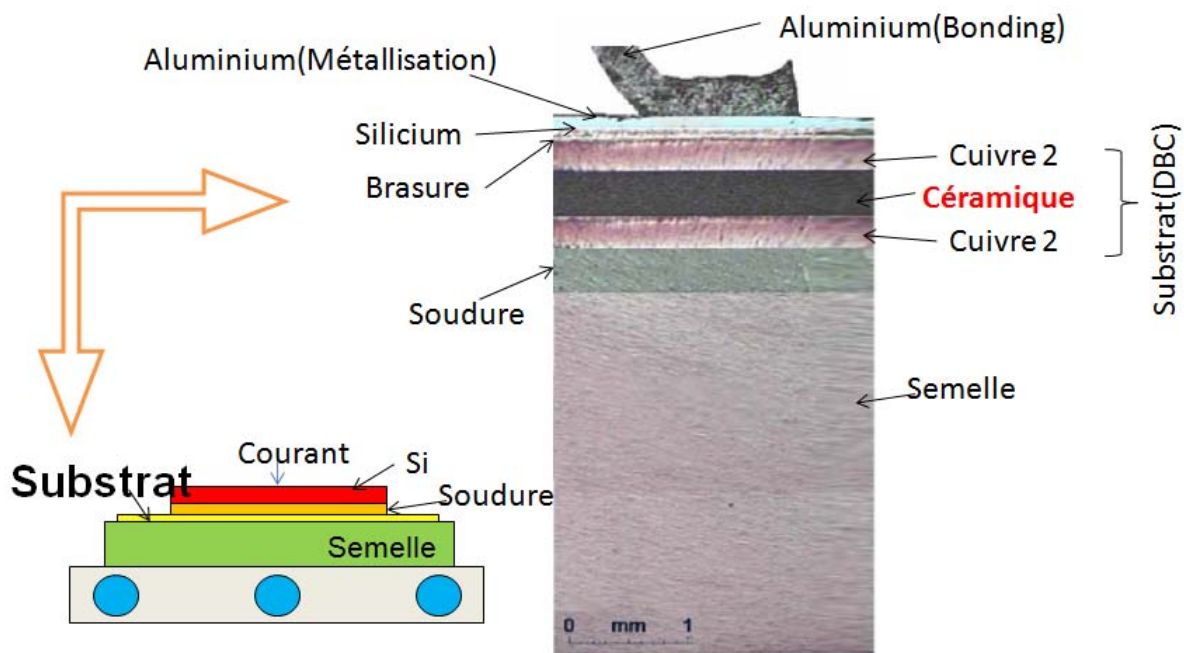
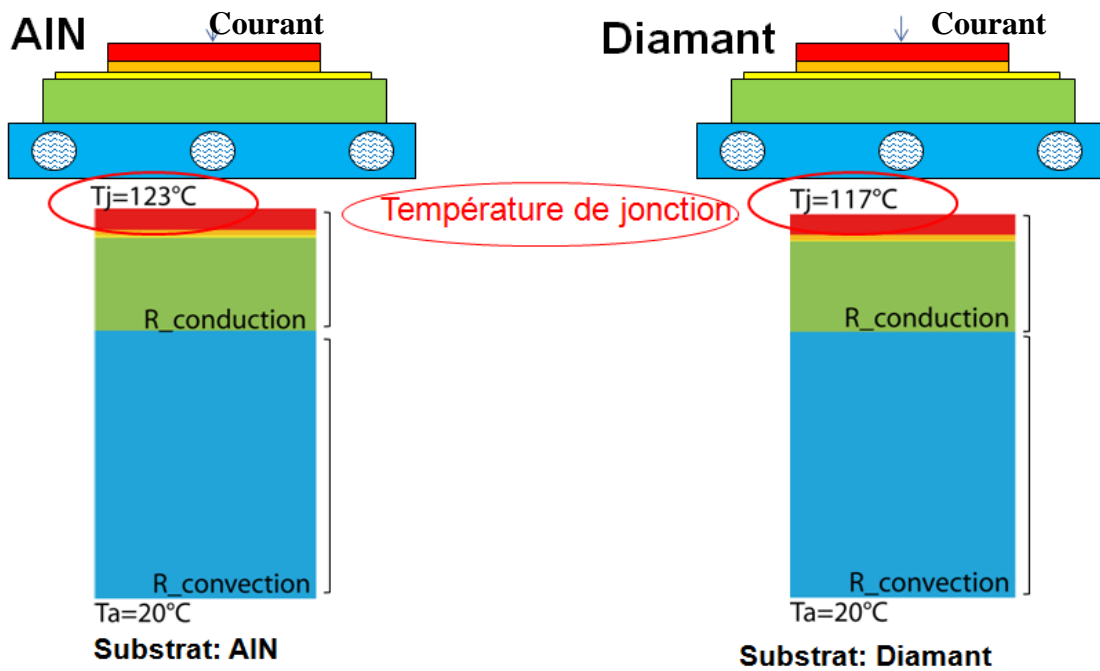


Figure II.11: Vue en coupe d'un module IGBT

L'assemblage simulé est présenté figure II.12 (Pour plus de détails, voir Annexe N°1). Il n'y a pas de convection dans l'air puisque le composant est en général noyé dans un gel diélectrique. Nous négligeons également la radiation. Nous avons seulement retenu le coefficient d'échange  $h_2 = 450 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  entre la face arrière de la semelle et la plaque à eau.



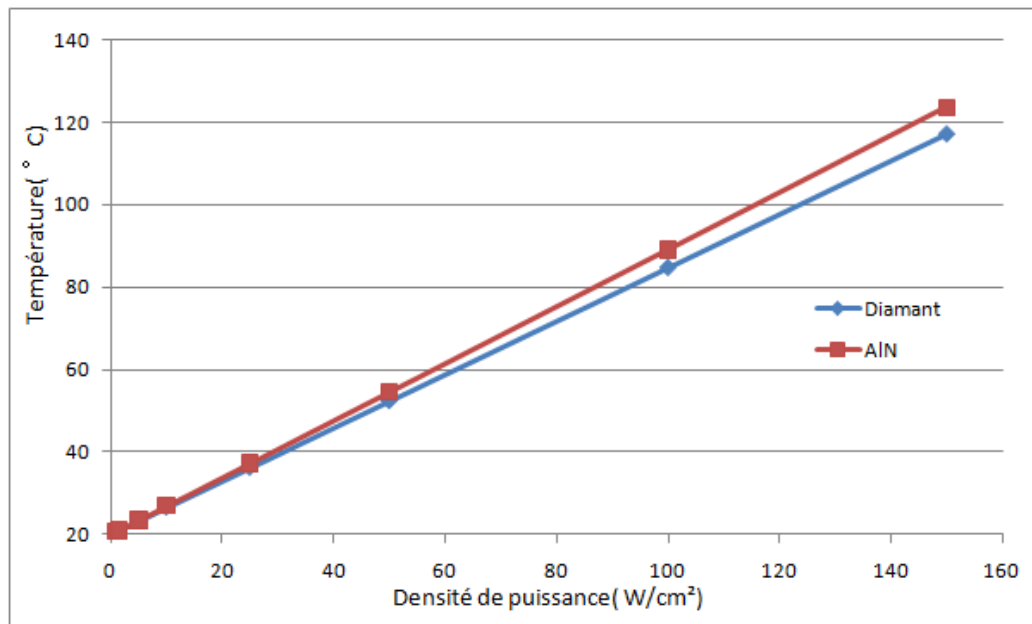
**Figure II.12: Comparaison des deux types de substrat (AlN, diamant CVD) – Représentation des résistances thermiques équivalentes**

Nous avons évalué la résistance thermique des couches à partir de la relation suivante

$$R_{th} = \left| \frac{T_H - T_B}{Q} \right| \quad \text{Équation II.4}$$

Les surfaces n'étant pas isothermes, nous prenons  $T_H$  et  $T_B$  les températures maximum des deux faces d'un matériau traversé par un flux de chaleur  $Q$ .

La figure II.12 représente l'échauffement d'une puce en fonction de la puissance dissipée.



**Figure II.13: Comparaison des performances de refroidissement de deux types de substrat (AlN, diamant CVD) dans le cas d'une structure classique**

On peut voir ici qu'il y a très peu de différence entre les deux solutions, seulement 6°C au point maximal ce qui n'est pas suffisant pour justifier l'emploi du diamant dans une telle structure.

En effet, comme nous pouvons le voir figure II.12, la résistance thermique de convection est très supérieure à la résistance thermique de conduction et remplacer le substrat AlN ou Alumine par un substrat en diamant n'apporte pas un gain significatif. Cette première simulation montre que l'on peut beaucoup gagner sur la résistance thermique de convection et sur la résistance thermique de la semelle du composant.

## II.2.2 Suppression de la semelle

Il pourrait être tentant de supprimer la semelle pour réduire la résistance thermique de conduction mais, comme le montre la figure II.14.a (Pour plus de détails, voir Annexe N°2), la température sans la semelle est finalement plus élevée qu'en présence de celle-ci. En effet cette semelle joue le rôle de diffuseur qui permet d'augmenter la surface d'échange avec le fluide et ainsi de diminuer la résistance thermique de convection toujours prépondérante.

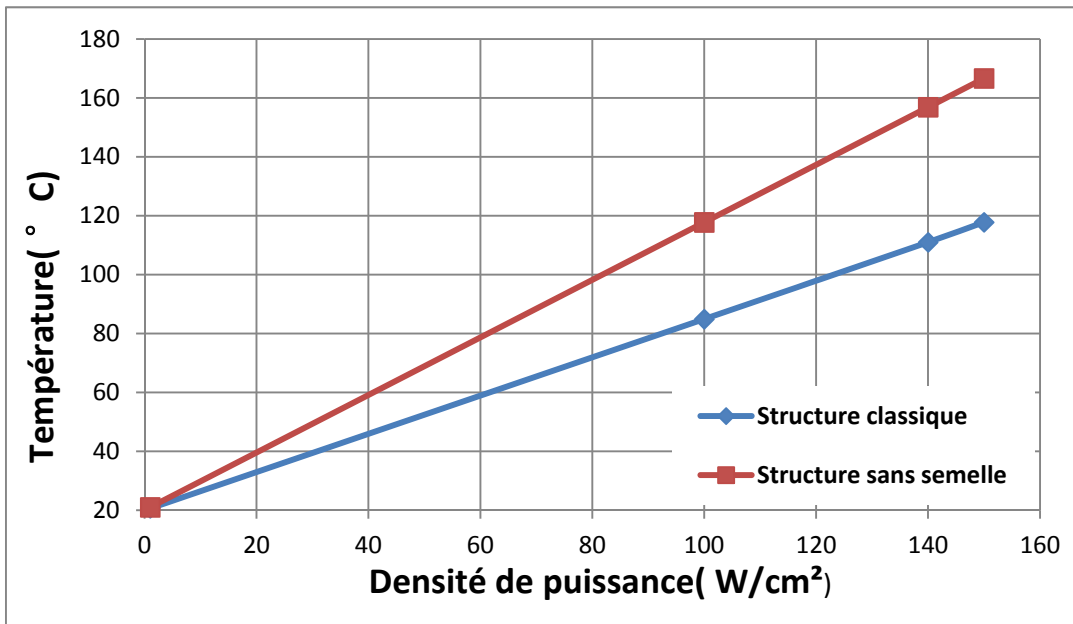
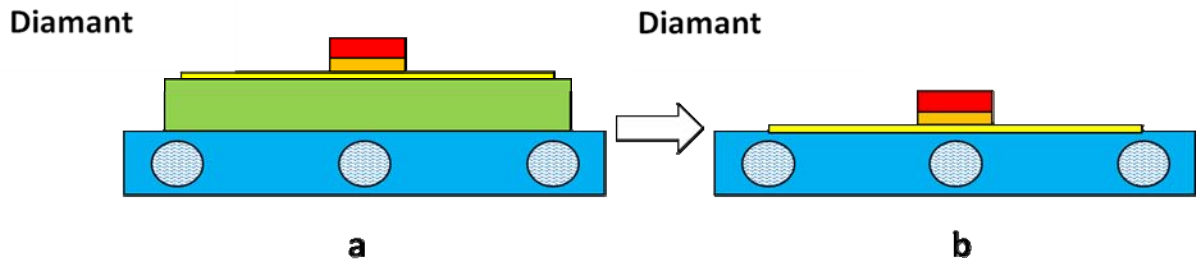


Figure II.14 : Comparaison des deux structures (classique, sans semelle) avec substrat diamant

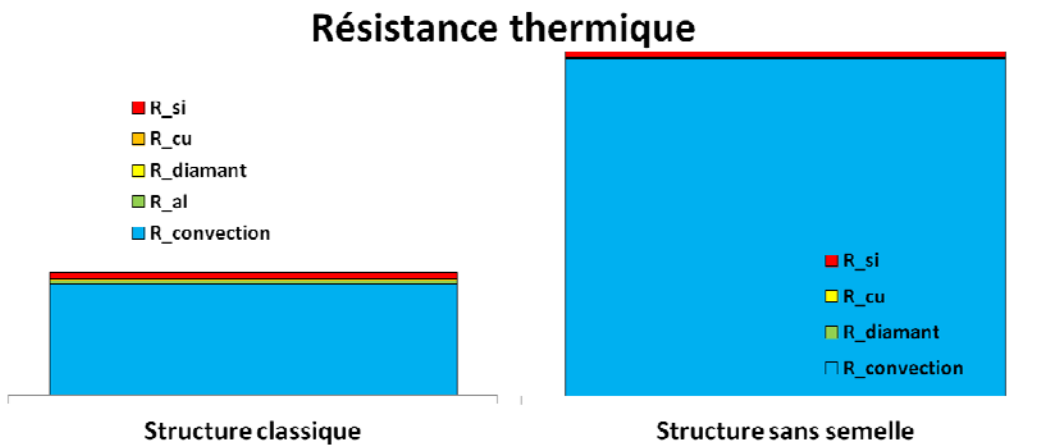


Figure II.15 Représentation relative des résistances thermiques de convection et de conduction

Ce résultat classique montre la nécessité d'une simulation complète du système pour valider l'apport d'une nouvelle solution.

## II.2.3 Structures optimisées

Comme nous avons pu le voir dans les simulations précédentes, pour que l'apport d'un substrat diamant soit significatif il faut que la résistance thermique de conduction soit prépondérante. Autrement dit il faut tout d'abord réduire la résistance thermique de convection. C'est ce que nous faisons avec notre système « boîte à eau » qui permet de refroidir directement le substrat ou la semelle du composant comme le montre la figure II.16 (Pour plus de détails, voir Annexe N°3).

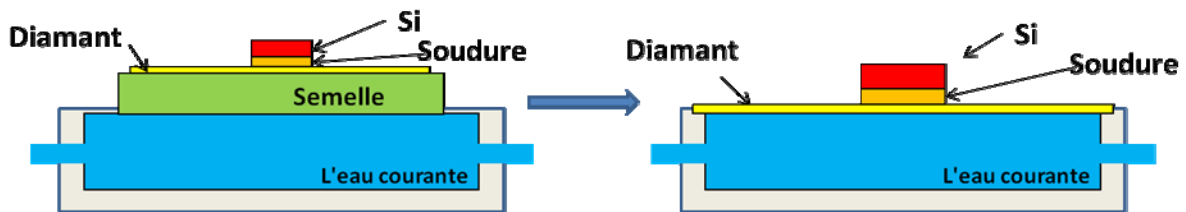
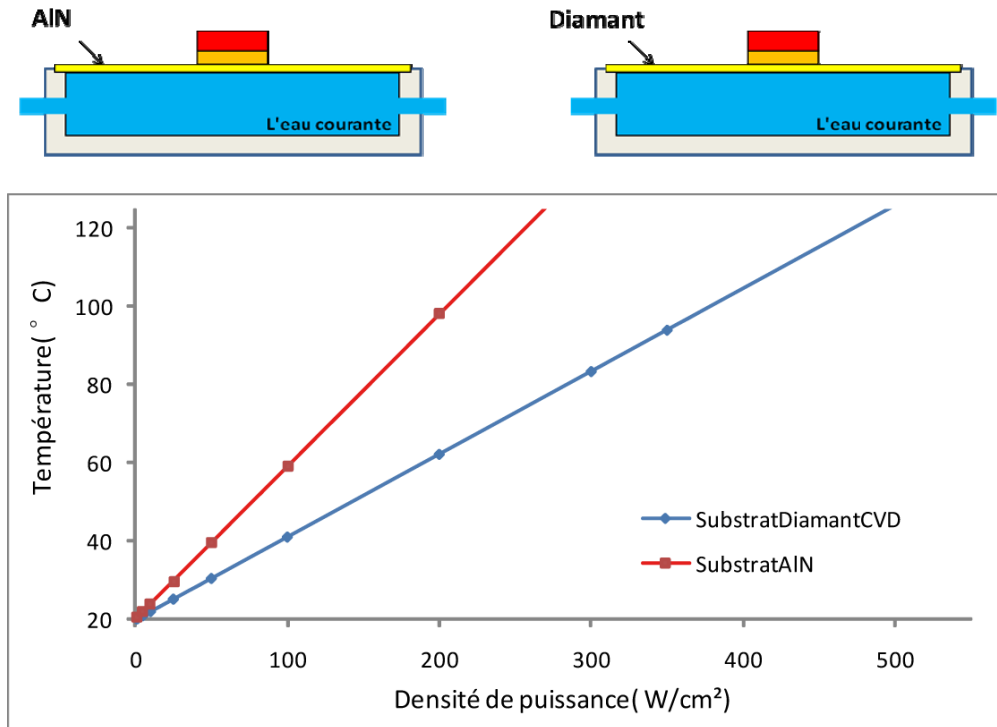


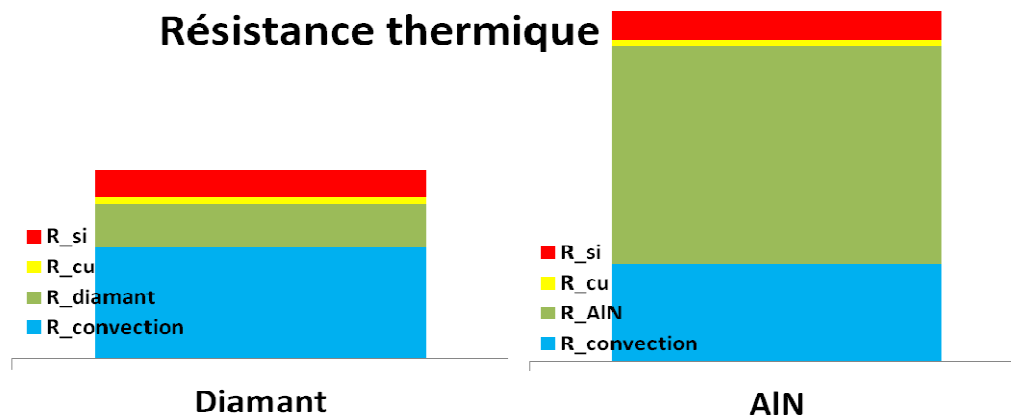
Figure II.16 Structure optimisée

Nous augmentons ainsi considérablement le coefficient d'échange par convection ce qui permet de diminuer fortement la résistance associée. Dans une telle configuration un substrat en diamant apporterait un gain réel comme le montre nos simulations figure II.17. La puissance que nous pouvons dissiper pour un  $\Delta T$  de 80 °C est quasiment le double avec un substrat diamant.



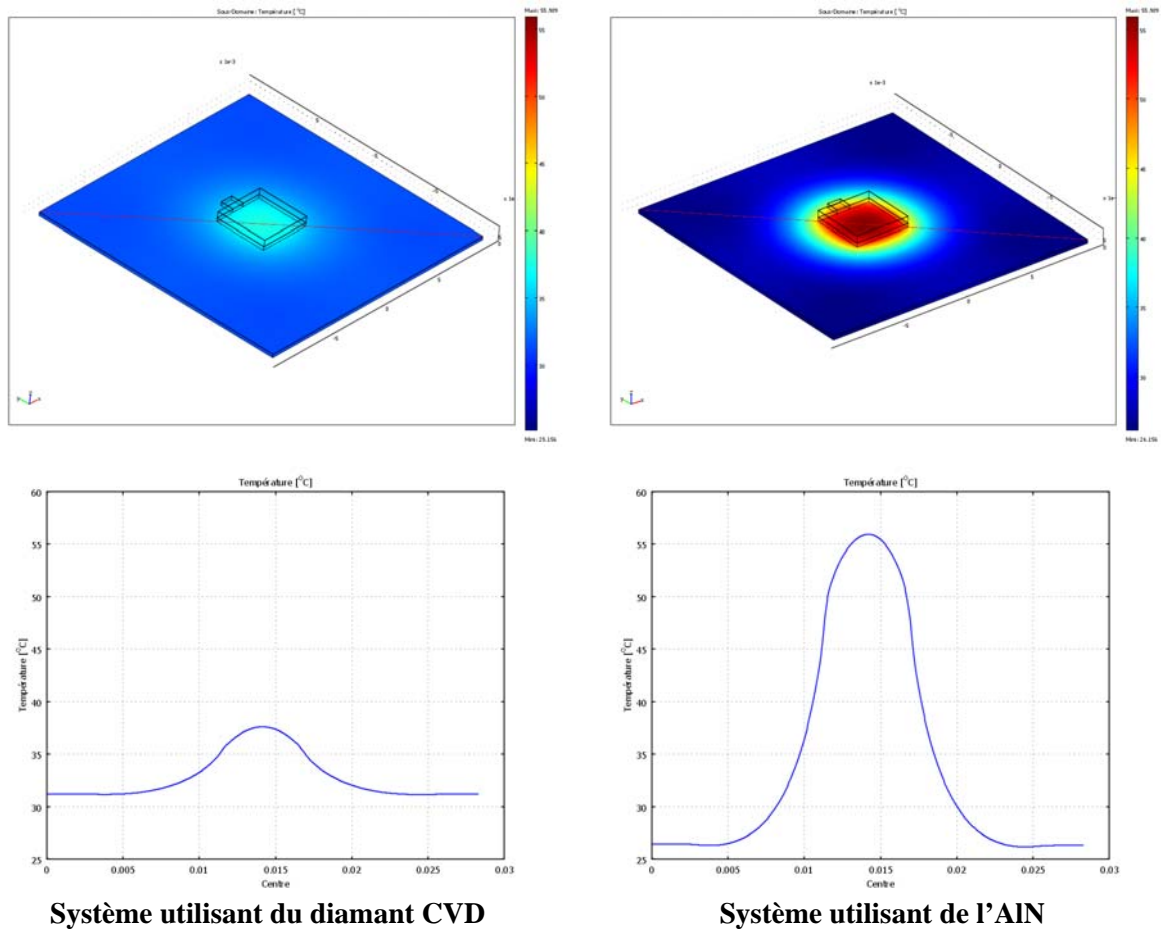
**Figure II.17 : Comparaison des deux types de substrat (AlN, diamant CVD) par simulation**

Dans une telle structure la résistance thermique de conduction devient prépondérante comme le montre la figure II.18. Ainsi le remplacement de la couche AlN par une couche nettement plus conductrice thermique apporte un gain important.



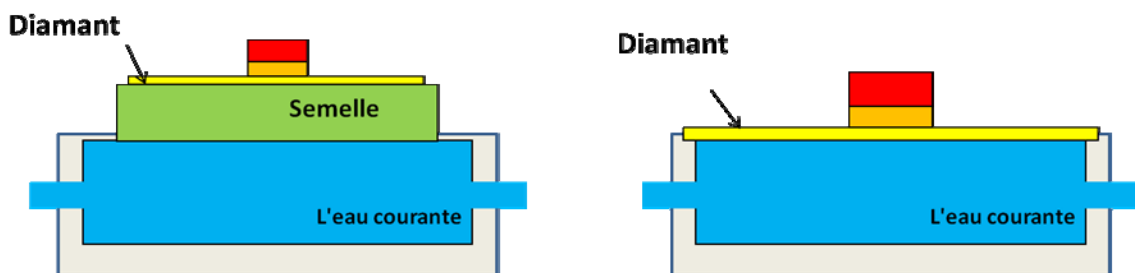
**Figure II.18 Comparaison relative des résistances thermiques des deux types de substrat**

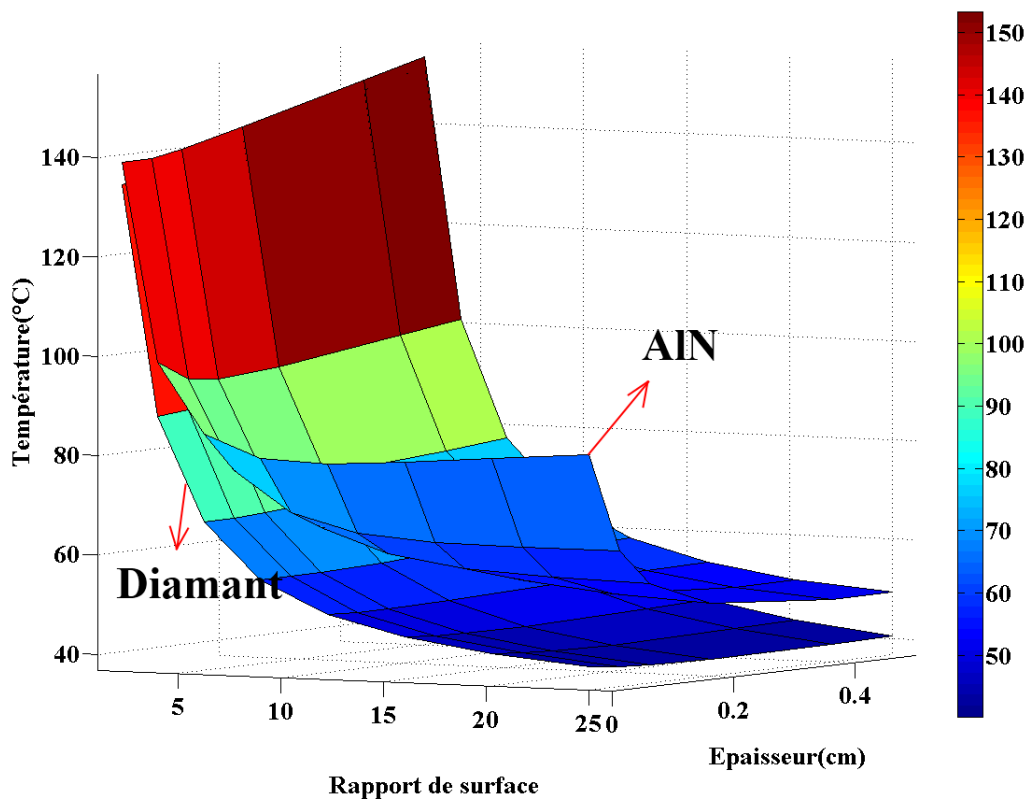
Une telle structure avec un substrat diamant présente également l'intérêt d'offrir une température de la puce quasiment homogène (figure II.19) ce qui pourrait être favorable à un bon comportement du composant.



**Figure II.19 : Répartition des températures sur les deux types de substrat (Diamant, AlN) en 3D et 2D**

Il pourrait être intéressant de conserver la semelle de cuivre pour améliorer la diffusion sous la puce. Pour juger de l'influence de cette semelle, nous avons étudié l'influence de la largeur et de l'épaisseur de cette semelle pour les deux substrats diamant ou AlN. Il apparaît que l'apport d'un substrat diamant n'est intéressant qu'en l'absence de semelle et pour un rapport surface de substrat sur surface de puce supérieur à six.





**Figure II.20 : Comparaison des deux assemblages avec AlN ou diamant**

La figure II.20 reprend ces résultats pour un rapport de surfaces de neuf. Le gain est important en l'absence de semelle. En dehors de ces conditions nous nous retrouvons dans le cas d'une structure classique où la résistance de conduction du substrat devient négligeable, la conductivité exceptionnelle du diamant n'apporte alors que très peu à l'ensemble du dispositif de refroidissement.

C'est pour cette raison que nous nous sommes attachés à développer un dispositif sans semelle présenté chapitre III.

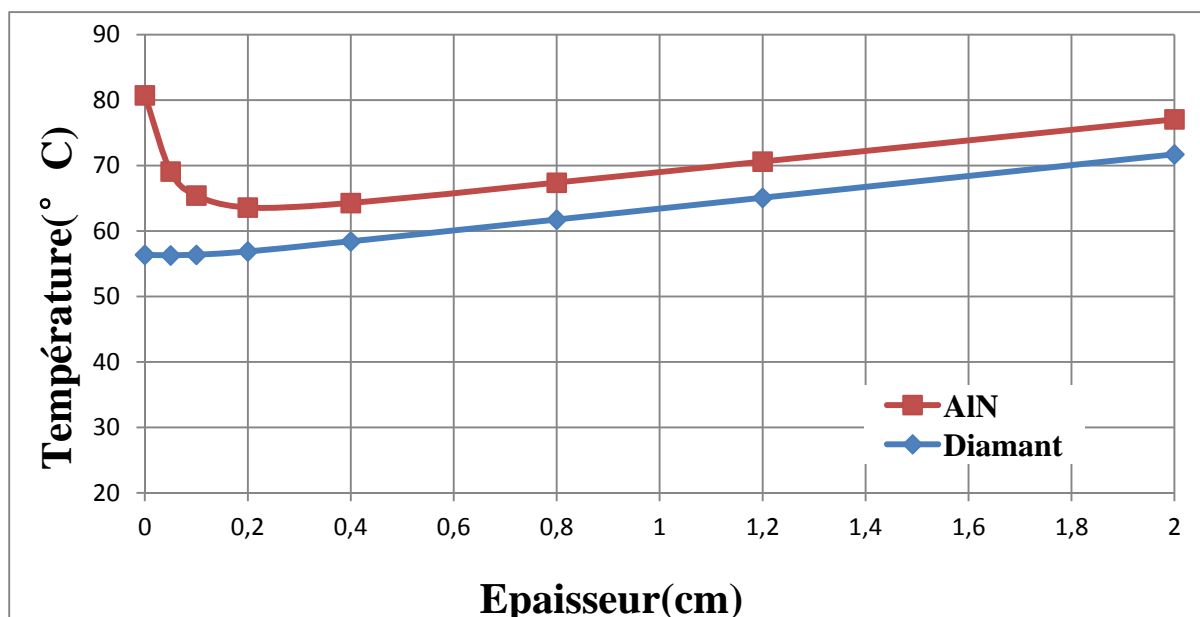
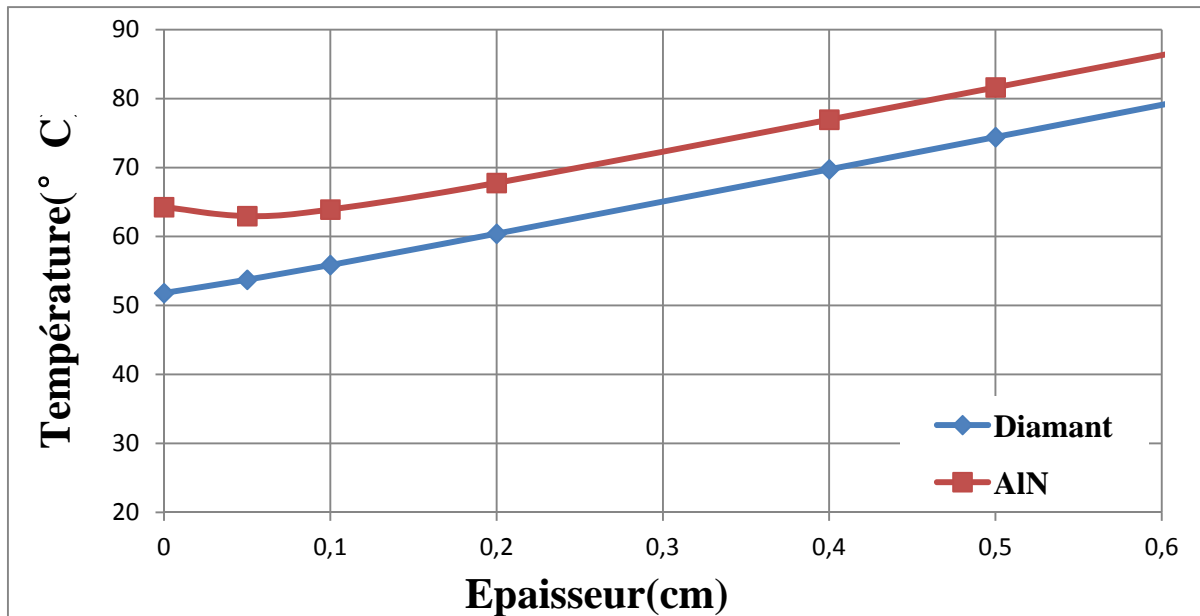


Figure II.21 : Apport d'un substrat diamant de surface  $1.2 \times 1.2 \text{ cm}^2$  en fonction de l'épaisseur de la semelle ( $h=5000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )

Même dans cette configuration l'apport du diamant reste négligeable dès lors que l'on place une petite semelle sous le substrat. Cette solution reste néanmoins intéressante si l'on cherche à gagner du poids en supprimant le diffuseur en cuivre.

Pour vraiment bénéficier pleinement de la conductivité du diamant il faudrait disposer d'un coefficient d'échange convectif bien plus grand, ce que nous ne pouvons envisager qu'avec des technologies de refroidissement à métaux liquide [45]. Ainsi la figure II.22. Montre le gain obtenu avec un  $h$  de  $50000 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ .



**Figure II.22 : Apport d'un substrat diamant de surface  $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$  en fonction de l'épaisseur de la semelle ( $h=50000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ )**

Dans ce cas le gain apporté par l'utilisation d'un substrat diamant est important même comparé à une structure avec diffuseur (diminution de 30% de l'élévation de température). Cela pourrait constituer des perspectives aux travaux que nous présenterons chapitre III

## II.2.4 Ajouts de micropoteaux

Nous pouvons aussi gagner sur la résistance thermique de convection en augmentant la surface d'échange grâce à des micropoteaux qui font ici office d'ailettes. Avec toujours pour objectif de réduire la résistance thermique de convection nous avons développé une technologie de micropoteaux cuivre disposés sous le substrat. La définition de l'échange convectif au sein d'une telle structure est extrêmement délicate et dépasse le cadre de ces travaux[23]. Nous avons eu à nous poser la question de la réalisation de ces micropoteaux (Chapitre III). Pour des raisons technologiques il est très difficile de réaliser de telles structures en diamant massif à des coûts abordables ! Nous avons alors envisagé de réaliser les « ailettes » en cuivre. Nous avons également étudié cet assemblage par simulation et nous présentons dans ce chapitre les résultats.

Les micropoteaux présentent une section de  $200\mu\text{m} * 200\mu\text{m}$  ils sont espacés de 200 microns comme présenté figure II.23

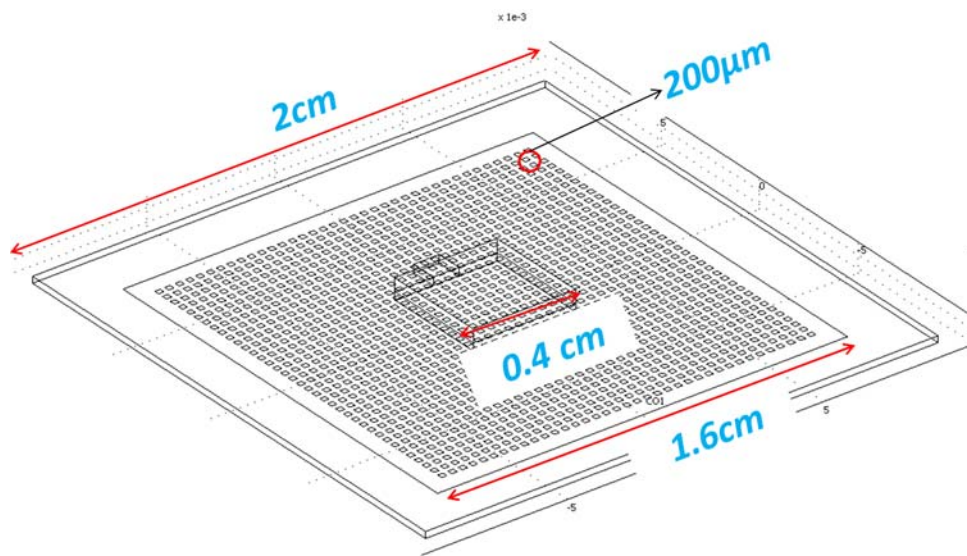
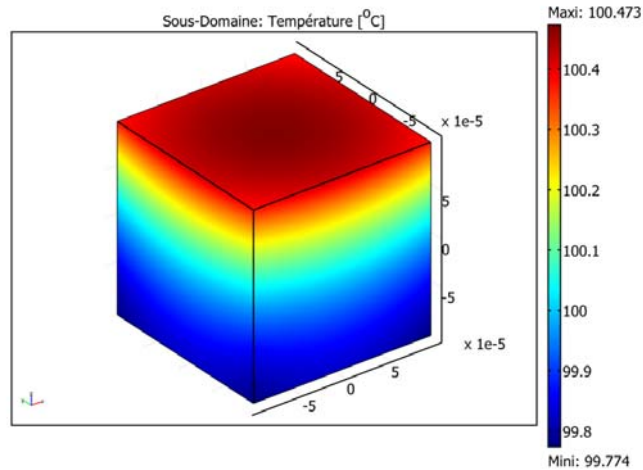


Figure II.23 : Schéma en 3D de la structure

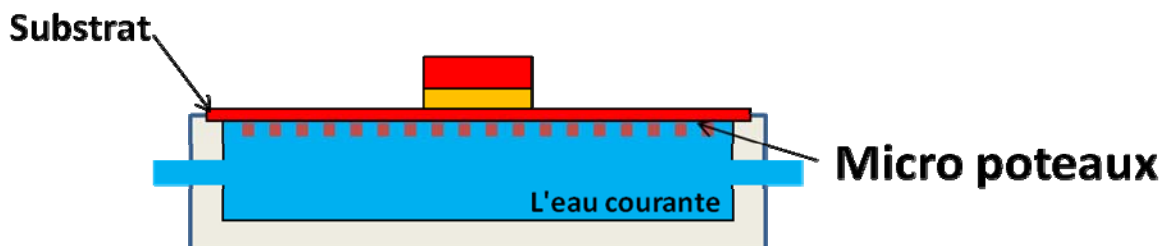
### Cas d'une lame d'eau avec micropoteaux

Comme précédemment nous avons identifié un coefficient d'échange équivalent dans les conditions de nos essais. Pour des raisons technologiques les micropoteaux de cuivre ne dépassent pas  $200\mu\text{m}$  de hauteur ce qui limite la variation de température sur cette hauteur. Nous avons ainsi considéré le cas d'une ailette parfaite où l'échange convectif est constant sur la totalité de la surface de l'ailette. Cette dernière hypothèse est très simplificatrice. Il faudrait pour cela que la vitesse du fluide, le régime laminaire ou turbulent, ... ne varient pas à travers les micropoteaux. Notre objectif n'est pas de rentrer ici dans le détail de ces calculs, nous préférons nous consacrer à la réalisation d'un démonstrateur pour valider ces performances.



**Figure II.24 Simulation d'un micropoteau 200 $\mu$ m<sup>3</sup> en cuivre chauffé par le haut refroidi dans de l'eau à 20°C. Mise en évidence de la faible variation de température le long du poteau**

Ces essais ont été réalisés sur un premier prototype où une résistance chauffante (4x4mm<sup>2</sup> de surface) est brasée sur un substrat silicium de 2\*2 cm<sup>2</sup> de surface. Des micropoteaux en cuivre d'une surface à la base de 200x200 $\mu$ m<sup>2</sup> et de hauteur 200 $\mu$ m sont placés sur la face immergée. La figure II.25 présente cette structure.



**Figure II.25 : Mesure de l'échange convectif par lame d'eau avec micropoteaux**

Pour rendre possible la simulation de ce système nous avons simplifié la structure. Pour cela nous avons remplacé les ailettes par des surfaces qui présentent un échange convectif équivalent à ce que l'on aurait par conduction à la base de l'ailette. En supposant que l'échange convectif reste similaire à ce que nous avons mesuré précédemment  $h_3=5000$  W/m<sup>2</sup>·K et avec une température homogène de l'ailette on peut envisager un coefficient d'échange convectif de cinq fois  $h_3$  soit  $h_4=25000$ W/m<sup>2</sup>·K.

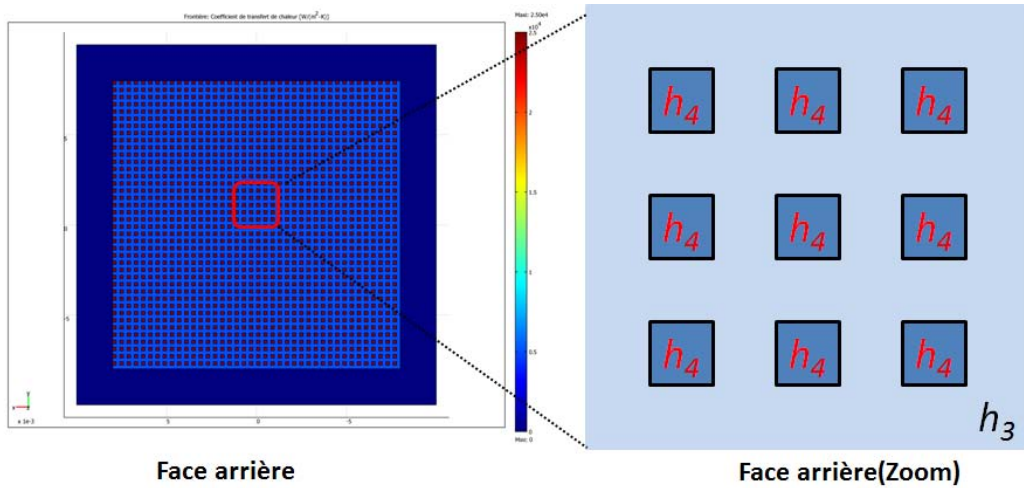


Figure II.26 : Principe retenu pour la simulation. Chaque ailette est remplacée par une surface à haut coefficient d'échange convectif

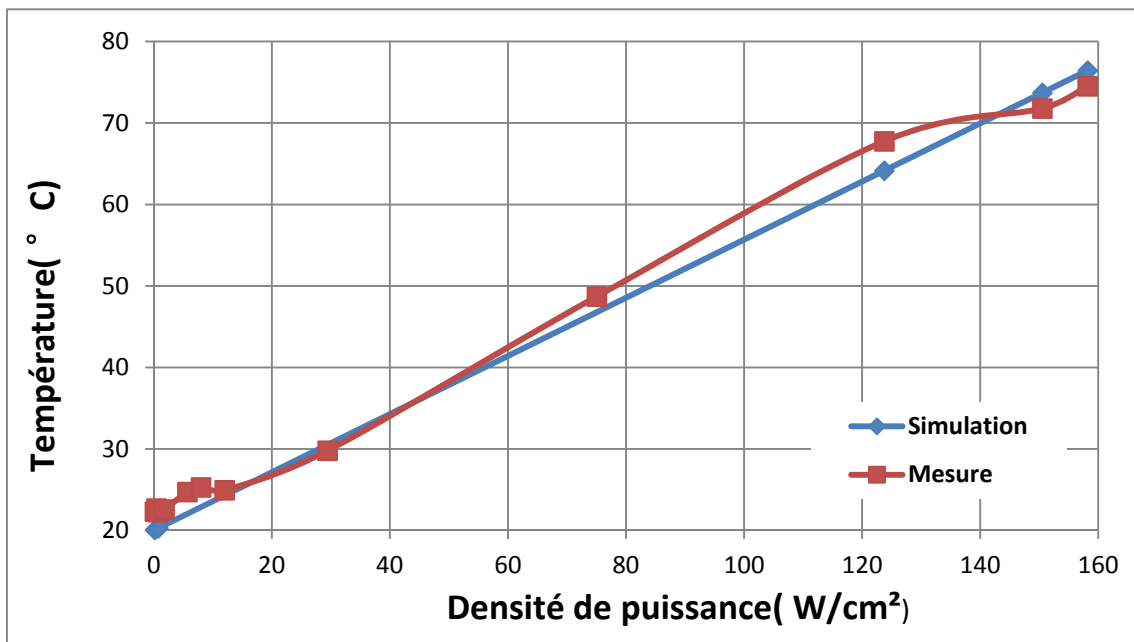


Figure II.27 : Mesures thermique réalisées par caméra infrarouge

Nous comparons les mesures par caméra infrarouge à nos résultats de simulation et nous en déduisons un coefficient d'échange convectif équivalent. Nous estimons ainsi  $h_4=25000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$  ce qui semble confirmer que dans les conditions auxquelles nous travaillons (taille des ailettes, vitesse du fluide, ...) le coefficient d'échange convectif reste constant sur toutes les surfaces.

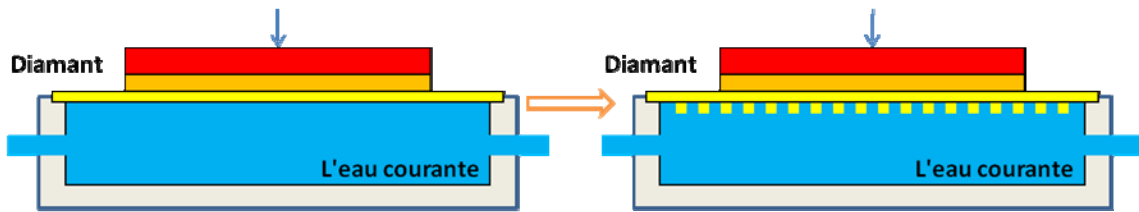


Figure II.28 : Disposition des micropoteaux sous le substrat et la puce

La figure II.29 illustre le gain obtenu.

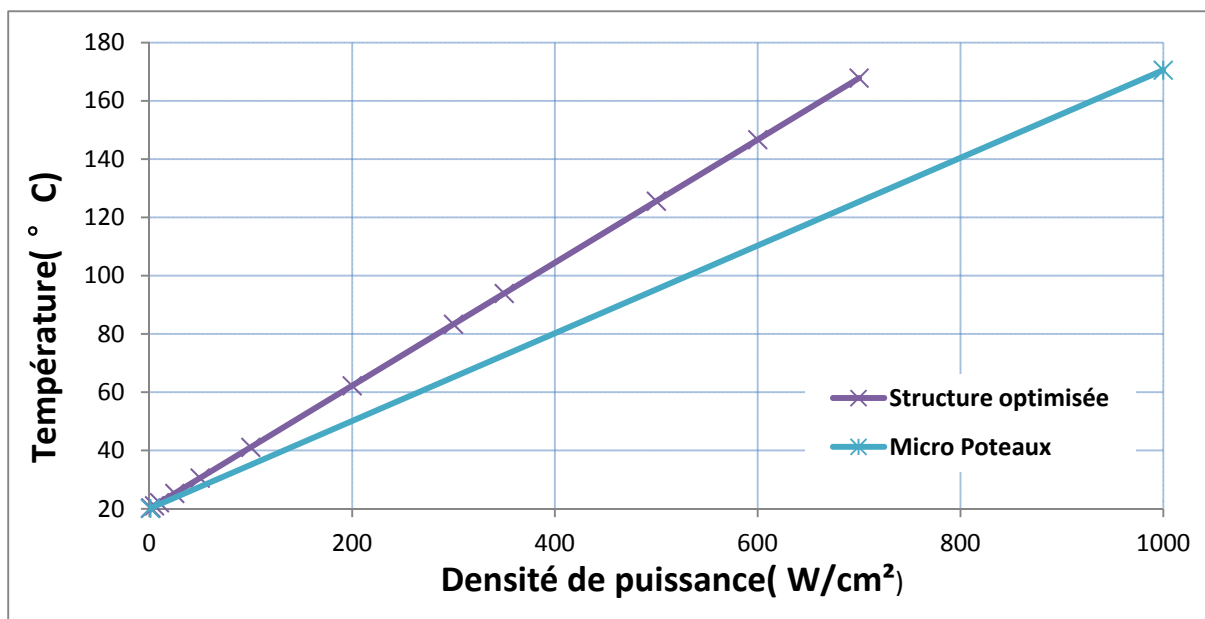
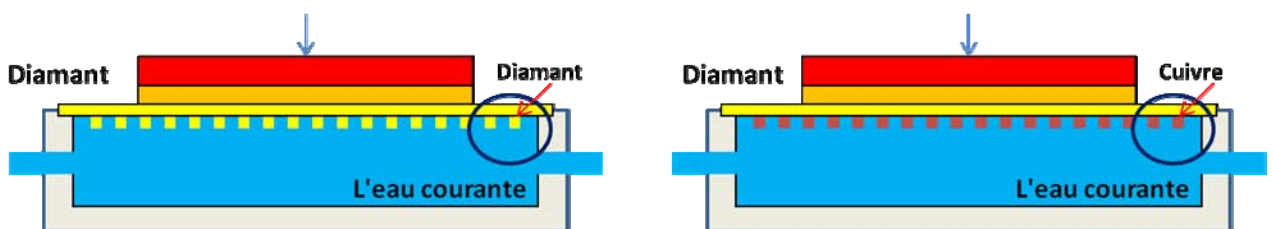
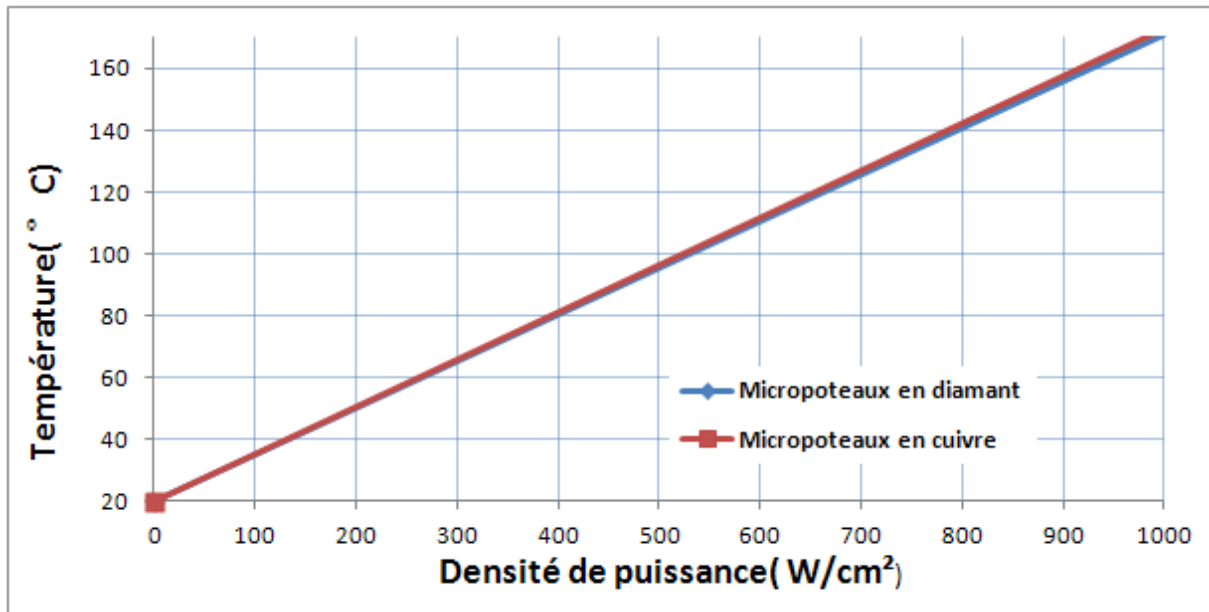


Figure II.29 : Comparaison des deux structures utilisées et leurs performances respectives

Nous avons utilisé pour ces simulation le coefficient d'échange  $h_4 = 25000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  déterminé auparavant. Il faut rappeler ici toutes les hypothèses qui nous amènent à cette simplification.





**Figure II.30 : Comparaison des deux types de micropoteaux (Cuivre, diamant CVD) et le résultat de simulation**

Les résultats de simulation (toujours avec les réserves posées au dessus) montrent une très faible différence entre des « ailettes » en diamant et des « ailettes » en cuivre (voir figure II.30). Nous avons adopté cette solution, dans ce qui suit les micropoteaux sont en cuivre sauf indication contraire.

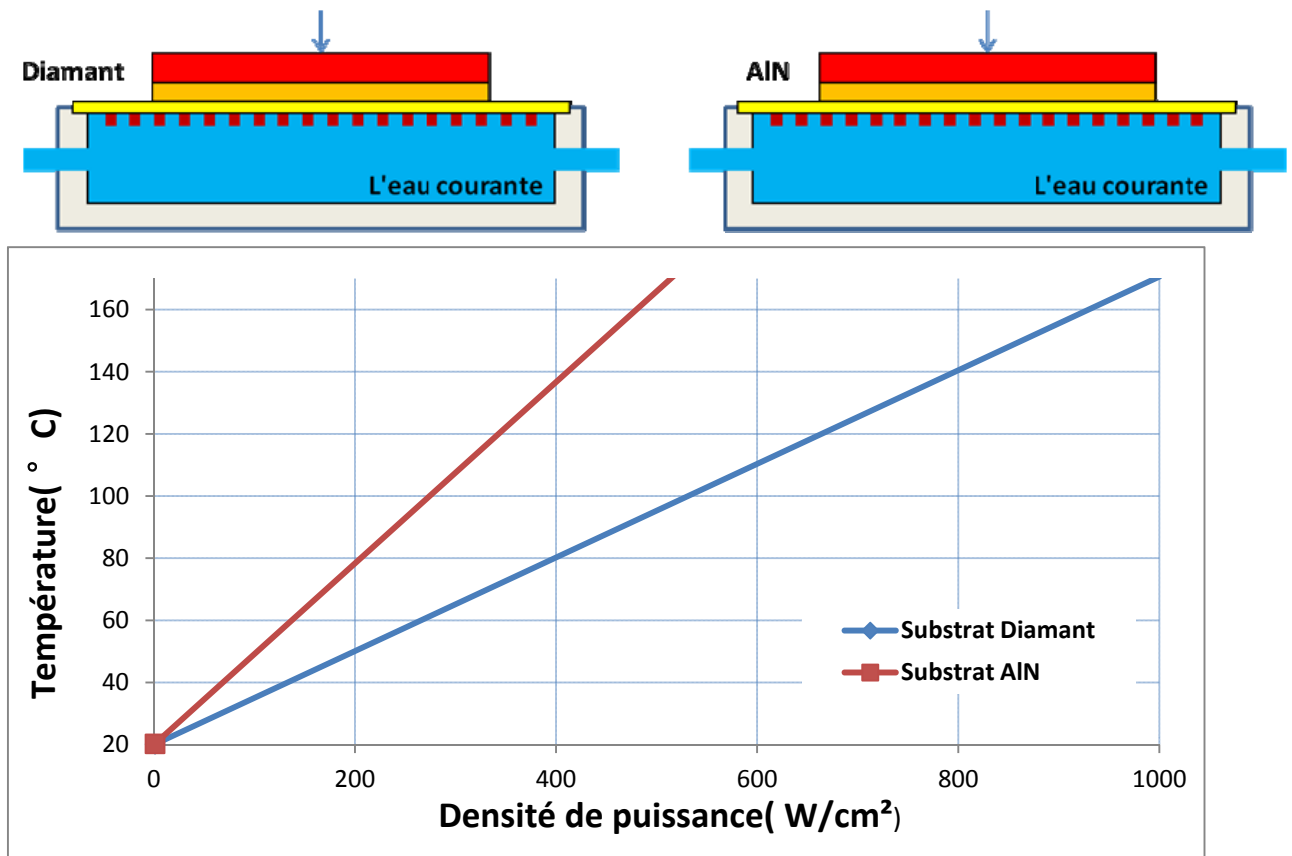


Figure II.31 : Comparaison des deux types de substrat (AlN, diamant CVD) et résultat de simulation

Nous pourrions réaliser des assemblages de ce type avec un substrat AlN. Comme le montre la figure II.31 nous obtiendrions des performances intéressantes (300W/cm<sup>2</sup> pour un DT de 80°C). Mais, dans ces conditions, l'utilisation d'un substrat diamant permet quasiment de doubler la puissance évacuée.

Nous pouvons résumer les résultats de nos différentes simulations sur une même figure (figure II.32). Nous voyons ainsi que l'utilisation d'un substrat diamant dans un système type « boîte à eau » avec ou sans micropoteaux permet de dissiper 4 à 6 fois plus de puissance. Ceci est vrai pour les dimensions de notre système dans les conditions précisées au dessus. Mais le gain est suffisamment important pour que l'on puisse affirmer que cette solution offre de nouvelles performances intéressantes pour la gestion thermique des convertisseurs à découpage.

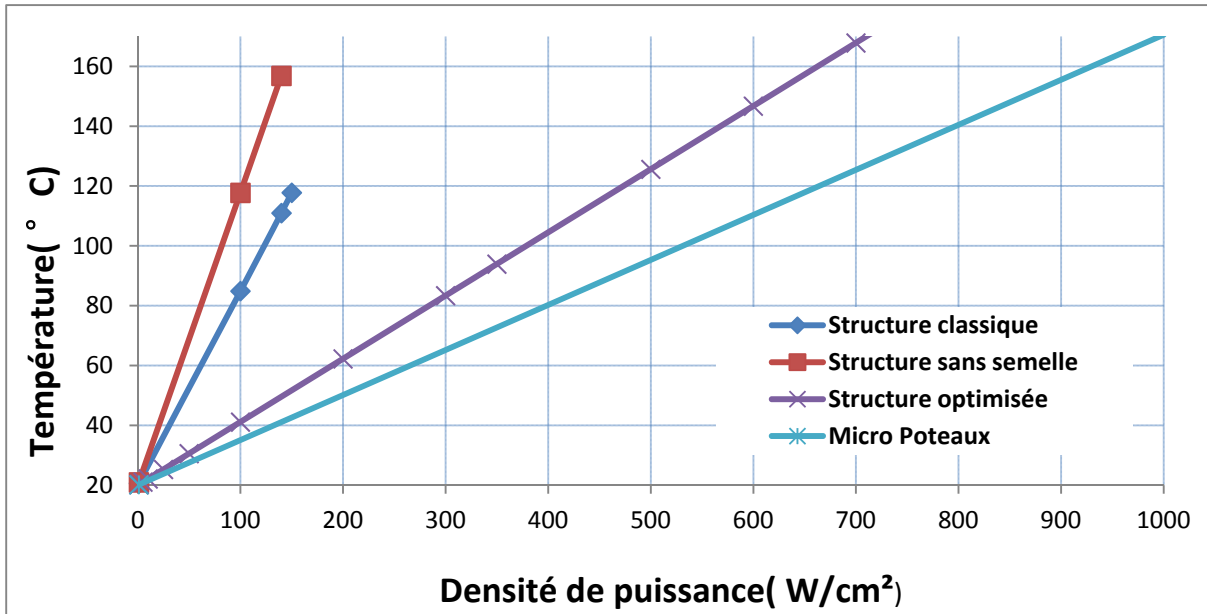


Figure II.32 : Comparaison des cinq structures utilisées sur leurs performances de refroidissement

## II.2.5 Refroidissement direct en double face

Nous pouvons évidemment chercher à améliorer encore les performances avec des structures de refroidissement double face. Nous reprenons pour cela les principes évoqués auparavant et nous pouvons mener une étude par simulation. La structure simulée est présentée en figure II.33 avec ou sans micropoteaux.

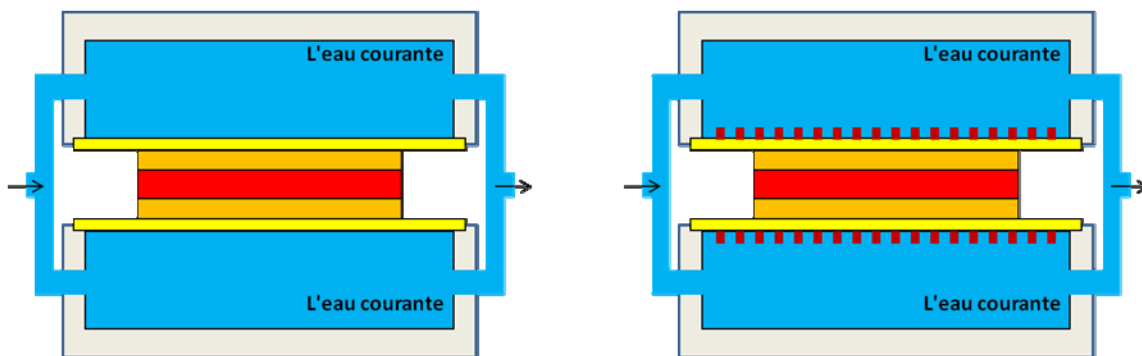
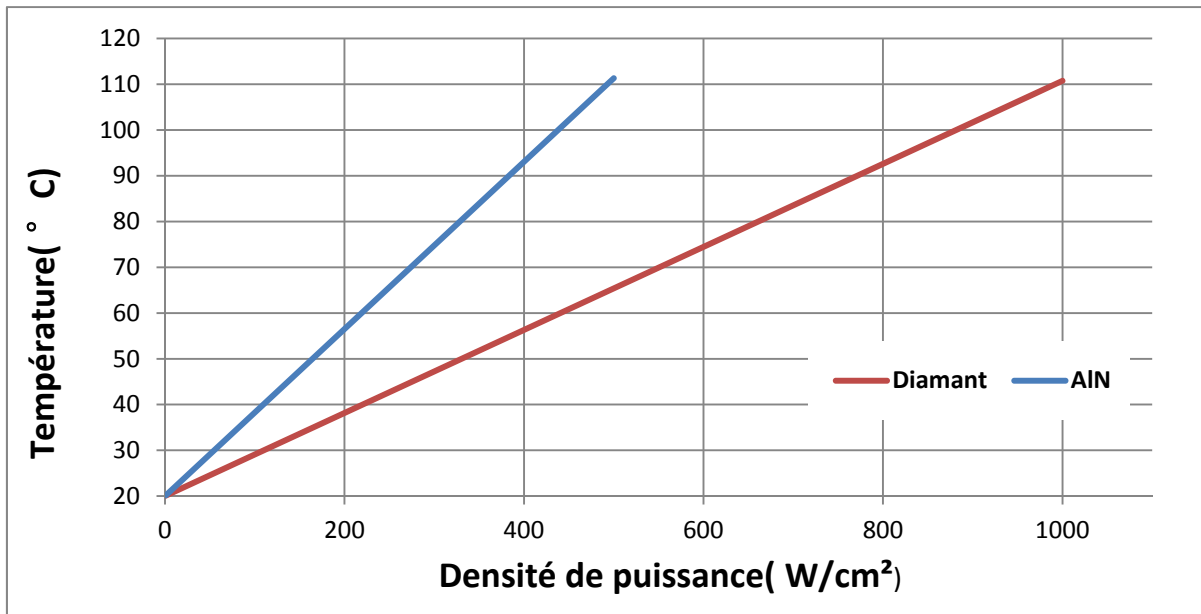


Figure II.33 : Refroidissement double face avec ou sans micropoteaux

Les deux côtés de la puce sont soudés avec les deux substrats de diamant avec 2cm de côté, 0.25mm d'épaisseur.



**Figure II.34 : Apport d'un substrat diamant dans un refroidissement double face (sans poteaux)**

L'utilisation du diamant comme substrat à la place de la couche d'AlN permet le doublement de la puissance dissipée pour un même échauffement.

## II.3 Conclusion

Nous avons présenté au cours de ce chapitre nos études par simulation de différentes solutions de refroidissement exploitant les propriétés thermiques exceptionnelles du diamant CVD. Pour s'assurer de la validité de nos simulations nous avons tout d'abord réalisé quelques essais de détermination des paramètres importants : la conductivité thermique du diamant et les différents coefficients d'échange convectif.

Nous avons ainsi confirmé par la mesure la bonne qualité du diamant disponible sur le marché. Nous avons confirmé sa conductivité thermique exceptionnelle de  $2000\text{W/m}\cdot\text{K}$  ce qui équivaut, à température ambiante, à 5 fois la conductivité du cuivre.

Nous avons déterminé expérimentalement Le coefficient d'échange convectif de différentes structures. Ce coefficient  $h$  dépend très fortement des conditions (température, viscosité et débit du fluide, état de surface), nous ne prétendons pas maîtriser totalement la détermination précise de ce coefficient, mais nos estimations nous permettent d'effectuer des études comparatives entre les différentes structures à l'aide de simulations.

Nous avons cherché à améliorer les performances thermiques dans une étude prospective. Le coût n'était pas un critère prépondérant mais il est clair que seules les solutions offrant un gain important pourront justifier l'investissement dans un substrat diamant. Nous avons ainsi écarté les solutions classiques pour nous concentrer sur l'étude de refroidissements directs qui exploitent au mieux les propriétés du diamant.

Même si nos conditions sont favorables (petit composant sur un large refroidisseur) nous pouvons prétendre extraire  $600\text{W/cm}^2$  avec nos moyens technologiques ce qui est considérable. Nous avons ainsi démontré les potentialités du diamant CVD.

## II.4 Bibliographie

1. Antipov, S., et al., *Numerical studies of International Linear Collider positron target and optical matching device field effects on beam*. Journal of Applied Physics, 2007. **102**(1).
2. Ding, J., et al., *Multiphysics simulation of electromagnetic shielding and thermal stressing within ceramic and silicon multilayer packages for RF applications*. ESTC 2006: 1st Electronics Systemintegration Technology Conference, Vols 1 and 2, Proceedings, 2006: p. 679-683.
3. Kamp, C.J., et al., *Directional radiative cooling thermal compensation for gravitational wave interferometer mirrors*. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2009. **607**(3): p. 530-537.
4. Kowalski, L., *Multiphysics Simulation of REMS hot-film Anemometer Under Typical Martian Atmosphere Conditions*author, in *COMSOL Conference Paris*.
5. Li, J.S., et al., *Analysis of Thermal Field on Integrated LED Light Source Based on COMSOL Multi-physics Finite Element Simulation*. 2011 International Conference on Physics Science and Technology (Icpst), 2011. **22**: p. 150-156.
6. Quarshie, T.E.I.M.G., *Power Transistor Heat Sink Design Trade-offs*, in *COMSOL Conference Boston*.
7. Langemyr, L., *Comsol Multiphysics User's Guide*. Vol. 622. 2005.
8. Wiecek, B., et al. *Multilayer structure investigations using lock-in and pulse thermography possible applications in medicine*. in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE*. 2003.
9. Sergent, J.E. and A. Krum, *Thermal Management Handbook: For Electronic Assemblies*1998: McGraw-Hill.
10. Culham, J.R., et al., *Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*2000: IEEE.
11. Skuriat, R. and C.M. Johnson, *Direct Substrate Cooling of Power Electronics*. Epe: 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Vols 1-9, 2009: p. 4674-4683.

12. Charboneau, B.C., et al., *Double-sided liquid cooling for power semiconductor devices using Embedded Power packaging*. Ieee Transactions on Industry Applications, 2008. **44**(5): p. 1645-1655.
13. Jankowski, N.R., et al., *Comparing microchannel technologies to minimize the thermal stack and improve thermal performance in hybrid electric vehicles*. 2007 Ieee Vehicle Power and Propulsion Conference, Vols 1 and 2, 2007: p. 124-130.
14. Sharar, D.J., N.R. Jankowski, and B. Morgan, *Thermal Performance of a Direct-Bond-Copper Aluminum Nitride Manifold-Microchannel Cooler*. 26th Annual Ieee Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Proceedings 2010, 2010: p. 68-73.
15. Buttay, C., et al., *High temperature direct double side cooled inverter module for hybrid electric vehicle application*. Silicon Carbide and Related Materials 2006, 2007. **556-557**: p. 709-712.
16. Silverman, I.Y., A. L.Reznik, S. N.Arenshtam, A.Kijet, D.Nagler, A., *High heat-flux accelerator targets: Cooling with liquid metal jet impingement*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**(17-18): p. 2782-2792.
17. Bauer, R. and V. Strickert, *Integrated liquid cooling system for the thermal management in LTCC multilayer*. Fifth Annual Pan Pacific Microelectronics Symposium, Proceedings, 2000: p. 1-6.
18. Jansen, E., et al., *Thermal conductivity measurements on diamond films based on micromechanical devices*. Diamond and Related Materials, 1996. **5**(6-8): p. 644-648.
19. Maheo, D. and J.M. Poitevin, *Direct-Current Diode Sputtering - a Study of the Thermal Power Dissipated in the Substrate*. Vacuum, 1993. **44**(2): p. 117-121.
20. Rogacs, A. and J. Rhee, *Performance-cost optimization of a diamond heat spreader*. 2007 12th International Symposium on Advanced Packaging Materials: Processes, Properties, and Interfaces, 2007: p. 24-31.
21. Stevanovic, L.D., et al., *Integral Micro-channel Liquid Cooling for Power Electronics*. 2010 Twenty-Fifth Annual Ieee Applied Power Electronics Conference and Exposition (Apec), 2010: p. 1591-1597.
22. Frank Fan, W. *Electronics packaging simplified radiation heat transfer analysis method*. in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004. IThERM '04. The Ninth Intersociety Conference on*. 2004.
23. Dr. Martin März, P.N.I.T.A., Munich, *Thermal Modeling of Power-electronic Systems*.

24. Iversen, A.H. and S. Whitaker, *A Uniform Temperature, Ultra-High Heat-Flux Liquid-Cooled, Power Semiconductor Package*. Ieee Transactions on Industry Applications, 1991. **27**(1): p. 85-92.
25. Peifer, W.R. and J.F. Garvey, *Wavelength Dependence of the Multiphoton Ionization and Fragmentation Dynamics of Cr(Co)<sub>6</sub>/Methanol Vanderwaals Heteroclusters*. Journal of Physical Chemistry, 1991. **95**(3): p. 1177-1183.
26. Delia, D.J., et al., *System Cooling Design for the Water-Cooled Ibm Enterprise System/9000 Processors*. Ibm Journal of Research and Development, 1992. **36**(4): p. 791-803.
27. Vidmar, R.J., *Application of high-fluence convective cooling to pulsed power components*. Ppc-2003: 14th Ieee International Pulsed Power Conference, Vols 1 and 2, Digest of Technical Papers, 2003: p. 257-260.
28. Bhowmik, H. and K.W. Tou, *Effect of protrusion on thermal transient behavior of chips in a liquid channel during loss of pumping power*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005. **32**(1-2): p. 166-174.
29. Mochizuki, M., et al., *Advanced micro-channel vapor chamber for cooling high power processors*. Ipack 2007: Proceedings of the Asme Interpack Conference 2007, Vol 1, 2007: p. 695-702.
30. Koyuncuoglu, A., et al., *Heat transfer and pressure drop experiments on CMOS compatible microchannel heat sinks for monolithic chip cooling applications*. International Journal of Thermal Sciences, 2012. **56**: p. 77-85.
31. Burgemeister, E.A., *Thermal-Conductivity of Diamond Heat Sinks*. Industrial Diamond Review, 1975(Jul): p. 242-244.
32. Nunes, D., et al., *Production of Cu/diamond composites for first-wall heat sinks*. Fusion Engineering and Design, 2011. **86**(9-11): p. 2589-2592.
33. Chu, K., et al., *Thermal conductivity of SPS consolidated Cu/diamond composites with Cr-coated diamond particles*. Journal of Alloys and Compounds, 2010. **490**(1-2): p. 453-458.
34. Eisele, H. and G.I. Haddad, *Gaas Tunnnet Diodes on Diamond Heat Sinks for 100-Ghz and Above*. Ieee Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995. **43**(1): p. 210-213.
35. Horng, R.H., et al., *Thermal Management Design from Chip to Package for High Power InGaN/Sapphire LED Applications*. Electrochemical and Solid State Letters, 2009. **12**(6): p. H222-H225.

36. Hui, P. and H.S. Tan, *Three-dimensional analysis of a thermal dissipation-system with a rectangular diamond heat spreader on a semi-infinite copper heat sink*. Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers, 1996. **35**(9A): p. 4852-4861.
37. Hui, P. and H.S. Tan, *A Rigorous Series Solution for a Thermal Dissipation System with a Diamond Heat Spreader on an Infinite Slab Heat Sink*. Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Brief Communications & Review Papers, 1995. **34**(9A): p. 5056-5064.
38. Kidalov, S.V. and F.M. Shakhov, *Thermal Conductivity of Diamond Composites*. Materials, 2009. **2**(4): p. 2467-2495.
39. Leistner, D., *Single Drift Impatt Diodes on Diamond Heat Sinks for W-Band Frequencies*. Iee Proceedings-I Communications Speech and Vision, 1984. **131**(2): p. 56-58.
40. Parashchuk, V.V., et al., *Improving the efficiency of high-power diode lasers using diamond heat sinks*. Quantum Electronics, 2010. **40**(4): p. 301-304.
41. Seal, M., *Thermal and Optical Applications of Thin-Film Diamond*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1993. **342**(1664): p. 313-322.
42. Ghoshal, U., et al., *High-performance liquid metal cooling loops*. Twenty-First Annual Ieee Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Proceedings 2005, 2005: p. 16-19.
43. Kumar, A., S. Ghosh, and B.K. Dhindaw, *Simulation of Cooling of Double-Layered Splat and its Experimental Validation Using Jackson-Hunt Theory*. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2011. **42**(2): p. 269-273.
44. Oskam, G., et al., *Electrochemical deposition of metals onto silicon*. Journal of Physics D-Applied Physics, 1998. **31**(16): p. 1927-1949.
45. TAWK, M., *Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique*, 2006.
46. Hocine, R., A.B. Stambouli, and A. Saidane, *A three-dimensional TLM simulation method for thermal effect in high power insulated gate bipolar transistors*. Microelectronic Engineering, 2003. **65**(3): p. 293-306.

47. Chang, H.R., et al., *300A 650V 70 um Thin IGBTs with Double-Sided Cooling*. 2011 Ieee 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics (Ispsd), 2011: p. 320-323.
48. Homod, R.Z., et al., *Double cooling coil model for non-linear HVAC system using RLF method (vol 43, pg 2043, 2011)*. Energy and Buildings, 2011. **43**(12): p. 3737-3737.
49. Wang, C.G., et al., *GaAs/GaInP Double Heterostructure Characterization for Laser Cooling of Semiconductors*. Laser Refrigeration of Solids Iv, 2011. **7951**.
50. DING, H., *Evaluation des propriétés diélectriques et thermiques de diamant CVD en vue du management thermique des composants d'électronique de puissance. Rapport LAAS 2007*



## **Chapitre III Réalisations technologiques**



## III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré aux réalisations technologiques des solutions à refroidissement directe que nous avons identifiées au chapitre précédent. Nous présentons notamment la réalisation de micropoteaux électro-déposés sur un substrat en diamant. Ces réalisations posent le problème de précision des motifs compte tenu des dimensions choisies des micropoteaux. Nous montrerons comment nous avons réussi à relever ces défis puis comment nous avons exploité les différentes réalisations de structures de refroidissement pour faire des comparaisons d'efficacité de refroidissement.

Nous utiliserons ces différentes solutions réalisées pour refroidir une diode SiC et mettrons en évidence l'apport considérable du diamant associé aux micropoteaux pour certains cas spécifiques.

## III.2 Définition du système

Nous présentons ici notre système de refroidissement et notre choix de substrat diamant.

### III.2.1 Géométrie du système

On se propose d'exploiter ces propriétés thermiques exceptionnelles du diamant en réalisant l'assemblage décrit par la figure III.1. On peut remarquer que des micropoteaux en cuivre sont prévus sur la face en contact avec le fluide caloporteur.

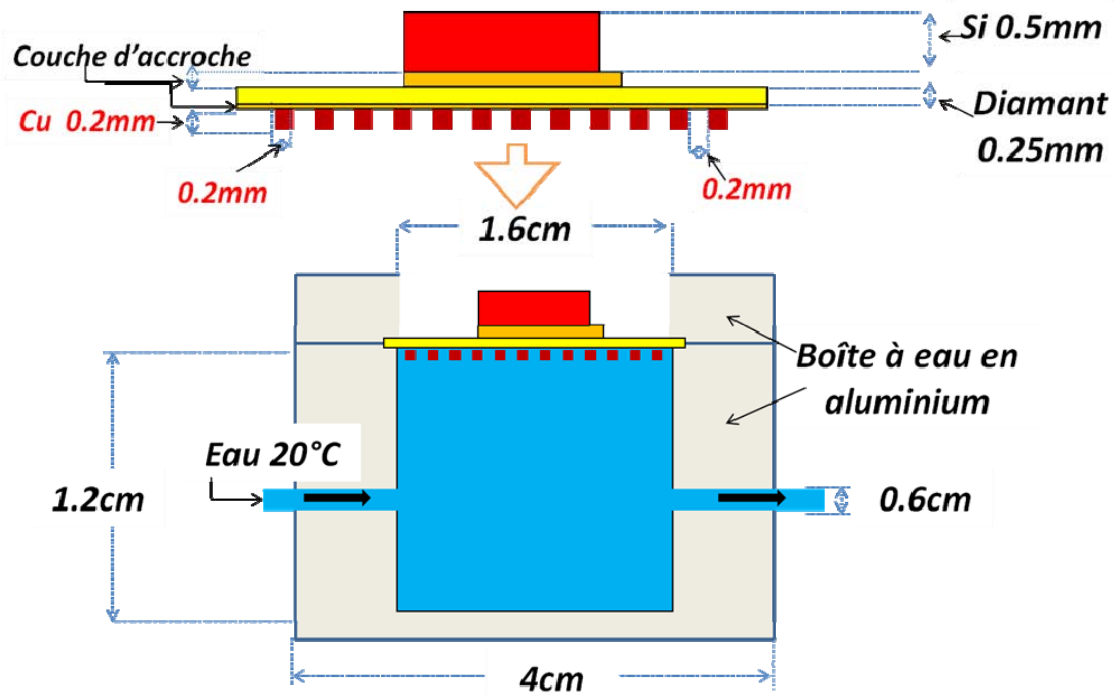


Figure III.1: Schéma en coupe de la structure proposée

### III.2.2 Choix du substrat diamant CVD

Suivant les sources d'approvisionnement du diamant CVD, les prix varient, mais aussi les caractéristiques intrinsèques du produit. Nous récapitulons la dispersion de certaines caractéristiques en fonction du fournisseur dans le tableau III.1.

Fabricant	Conductivité thermique (w/m·K)	Épaisseur ( $\mu\text{m}$ )
DDK[1]	800, 1000, 1800	150/300/500
ELEMENT SIX[2]	1000, 1800, 2000	250/300/500
CVD Diamond[3]	>1600	100-500
Hediamond[4]	1000-1800	250
sp3 Diamondtech[5]	1000-1400	250

Tableau III.1 : Comparaison des caractéristiques des différents produits diamant CVD selon les fabricants

Compte tenu des caractéristiques recherchées, nous avons choisi le substrat diamant d'ELEMENT SIX. Ce substrat a de très bonnes qualités thermiques et électriques (Conductivité thermique 2000 W/m·K, Résistivité  $> 10^{12}$  ohm·cm) par rapports aux autres produits disponibles. Il se présente sous la forme d'un substrat de 4cm<sup>2</sup> de surface et 250µm d'épaisseur. La figure III.2 montre des substrats diamant CVD.

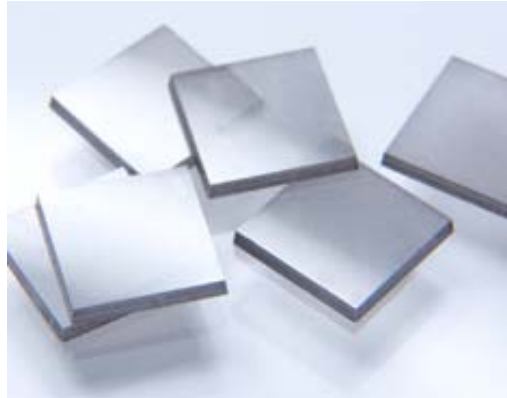


Figure III.2: Photo de substrat de diamant CVD[2]

### III.3 Développement des procédés technologiques

La première partie est consacrée au dépôt de couche d'accroche métal/diamant CVD. Nous nous sommes principalement intéressés au dépôt de couches Ti/Pt/Au utilisées par ailleurs pour la réalisation de contacts ohmiques[9].

La deuxième partie est dédiée au choix d'une résine adaptée à notre besoin. En effet, la maîtrise de la résine à haute épaisseur et à haute résolution reste un obstacle dans le développement de la présente étude. Nous nous sommes principalement intéressés à la résine film WBR2100.

Enfin la troisième partie est consacrée à la croissance électrolytique de micropoteaux en cuivre de 200µm de hauteur sur la face arrière du diamant CVD.

### **III.3.1 Couche d'accroche**

Afin d'utiliser un substrat en diamant il faut réaliser des métallisations qui assurent une bonne accroche mécanique sur ce support. Pour cela nous avons étudié des métallisations multicouches avec une première couche d'accroche en Titane ou en Silicium. Ces deux matériaux forment un carbure TiC ou SiC après recuit ce qui assure une parfaite adhérence. Cette couche peut alors être recouverte d'un bon conducteur électrique Or, Cuivre ou Aluminium.

#### **III.3.1.1 Couche Ti/Métal**

Les couches Ti/Pt/Au sont classiquement utilisées pour la réalisation des contacts ohmiques. Nous n'avons pas besoin ici de la barrière de diffusion en Platine. Nous adoptons une métallisation bi couches Ti/Au. La couche de Titane peut être limitée à 200 nm, elle n'est là que pour la fonction d'accroche. La couche en Or dépendra du courant à faire passer, nous limiterons à quelques microns pour des questions de coût. Un recuit de l'ensemble à 500°C pendant une heure assure une bonne accroche de cette couche.

Nous pouvons aussi réaliser des couches Ti/Cu. Il est alors possible d'obtenir une forte épaisseur de cuivre par dépôt électrolytique, c'est ce qui a été utilisé pour la réalisation des micropoteaux [11, 12].

#### **III.3.1.2 Couche Si/Al**

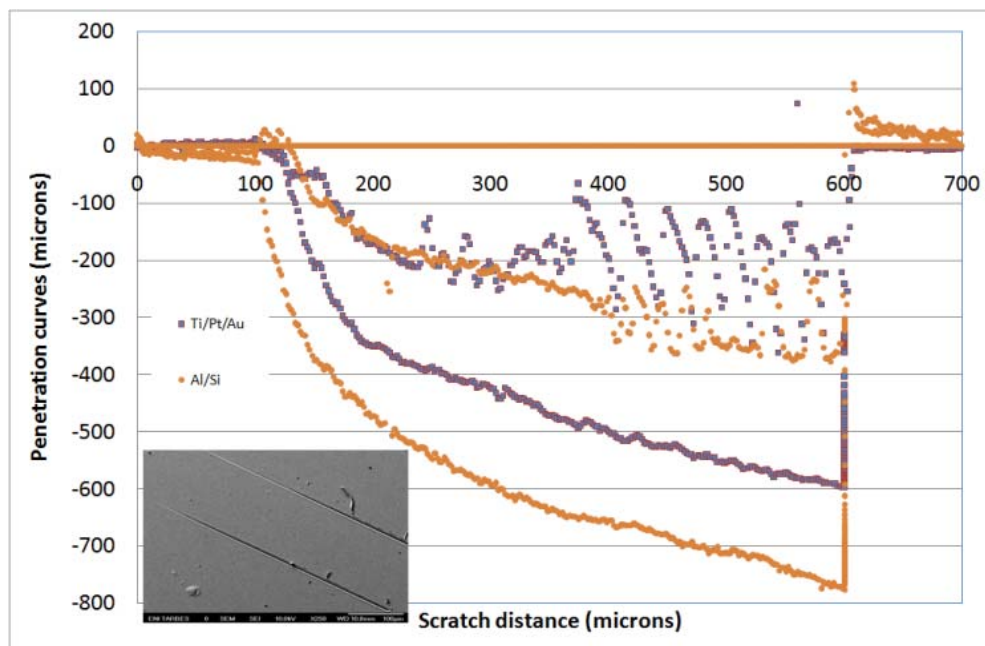
L'avantage de cette solution est de proposer une terminaison Aluminium mais elle nécessite deux recuits. Après le dépôt de la couche de silicium un premier recuit à 1200°C, 15 secondes en atmosphère inerte (Azote) permettent la formation du carbure. L'aluminium est ensuite déposé et recuit dans les conditions utilisées pour recuire des contacts aluminium sur du silicium (450 °C pendant 20 minutes).

#### **III.3.1.3 Caractérisation de la tenue mécanique des couches d'accroche**

Des tests de « nano-scratching » ont été réalisés au LGP (Laboratoire de Génie de Production à Tarbes) sur les deux technologies étudiées. Ces tests permettent d'évaluer la

qualité de l'interface contact/diamant. Ils consistent à rayer le contact grâce au déplacement d'une pointe sur la métallisation étudiée. La pointe se déplace horizontalement à une vitesse constante, tandis qu'une force verticale croissant linéairement est appliquée. Le mouvement vertical de la pointe est enregistré en fonction de son déplacement horizontal. Le retour de la pointe vers son point de départ est effectué pour une force appliquée très faible.

Lors des tests présentés sur la figure III.3, la force appliquée a varié de 0,1 à 80 mN, pour une vitesse horizontale de  $10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Comme on peut le voir, la pénétration dans les premières centaines de nanomètres est assez rapide, bien que la force appliquée soit encore faible. Plus on s'enfonce dans les contacts, moins la pénétration est rapide bien que la force appliquée soit alors plus grande. Une observation du fond des rayures permet de tirer des caractéristiques concernant l'interface métal/semi-conducteur. Ainsi, aucune fissuration des films métalliques ou du carbure d'interface n'a pu être observée lors de ces tests. De plus, aucun phénomène de délaminage entre la métallisation et le substrat n'est apparu. Ceci permet de conclure que l'adhérence du métal à l'échantillon de diamant est plus forte que la cohésion des films métalliques elle-même pour les deux types de contacts étudiés[14].



**Figure III.3: Tests de nano-scratching effectués sur les couches Ti/Pt/Au et Si/Al**

Enfin, des caractérisations mécaniques permettent de conclure que l'adhérence des couches, promue par leurs carbures respectifs, est très satisfaisante. Mais la technologie des

couches Si/Al est plus complexe. Sauf mention particulière nous utiliserons le plus souvent des couches du type Ti/Au. La figure III.4 montre un exemple de réalisation pour le report d'une puce de 7x7mm<sup>2</sup>. La réalisation des motifs est assurée soit par masquage (shadow mask) soit par des techniques de photolithographie classiques.

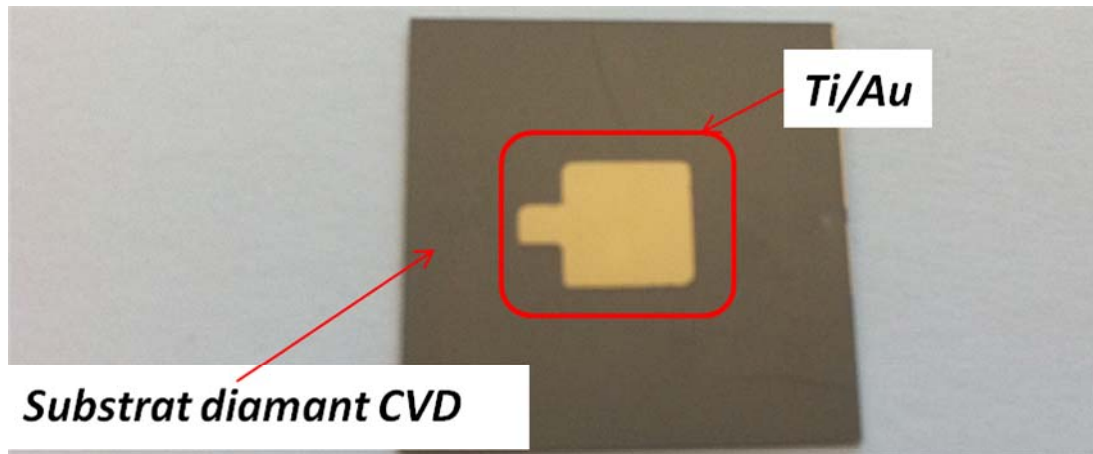


Figure III.4 : Face avant de substrat diamant CVD avec une métallisation locale

### III.3.2 Choix de la résine

Pour déposer une couche de micropoteaux sur la face arrière, il faut d'abord sélectionner une résine photosensible adaptée à notre besoin. La résine est un matériau photosensible utilisé dans de nombreux procédés industriels, comme la photolithographie ou la photogravure afin de former un revêtement protecteur ajouré à la surface d'un substrat.

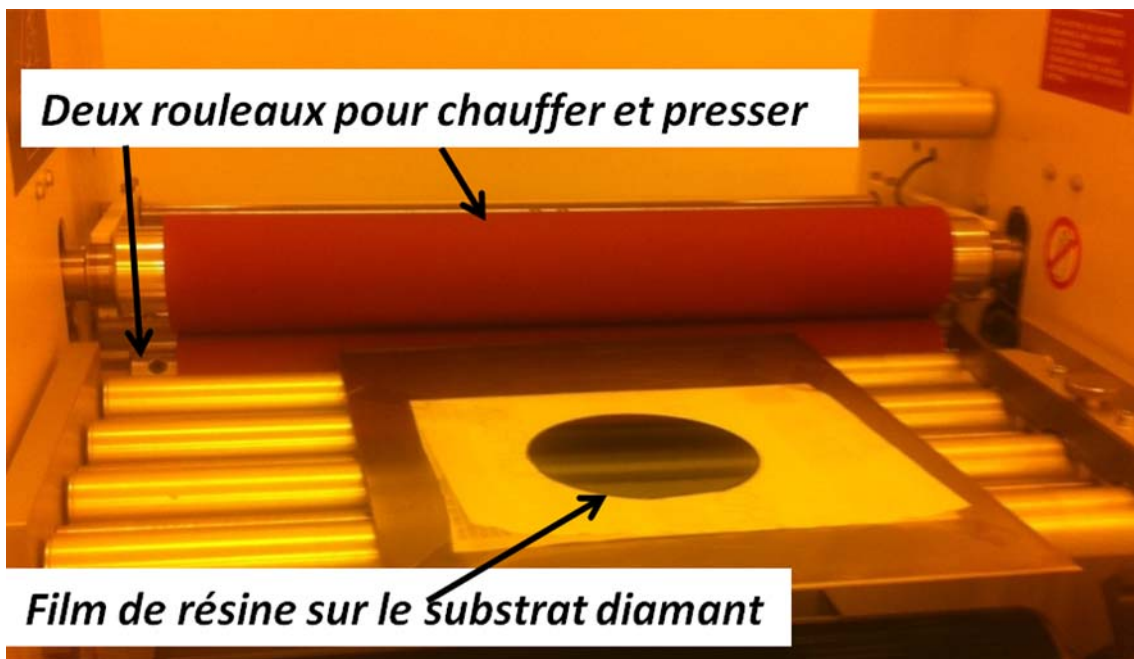
Les résines photosensibles peuvent être classées en deux groupes, les résines positives et les résines négatives. Les principaux paramètres de choix de la résine sont.

1. Résolution : Correspond au plus petit motif réalisable
2. Sensibilité : Plus une résine est sensible, moins elle demande d'énergie (mJ/cm<sup>2</sup>) pour une certaine longueur d'onde lors de l'opération d'insolation.
3. Adhérence : Pour réaliser des motifs précis, la résine doit adhérer parfaitement au substrat. Une adhérence déficitaire peut conduire à une déformation des motifs.

Pour la réalisation des micropoteaux, qui sont assez profonds, nous devons avoir recours à une résine épaisse. De plus, étant donné la taille des motifs, elle doit aussi être de bonne résolution. Une résine ayant ces deux caractéristiques simultanément est rare à trouver.

Pour satisfaire les besoins précis à la réalisation des micropoteaux, nous avons d'abord utilisé une résine film (Enthone 2050). Elle a  $50\mu\text{m}$  d'épaisseur, mais on peut aller au-delà en déposant plusieurs couches (dans notre cas 4 couches). Par contre, l'inconvénient de cette résine réside dans sa résolution insuffisante ( $50\mu\text{m}$  pour  $50\mu\text{m}$  d'épaisseur). Dans notre cas, nous arrivons à une résolution de  $200\mu\text{m}$ , ce qui largement insuffisant.

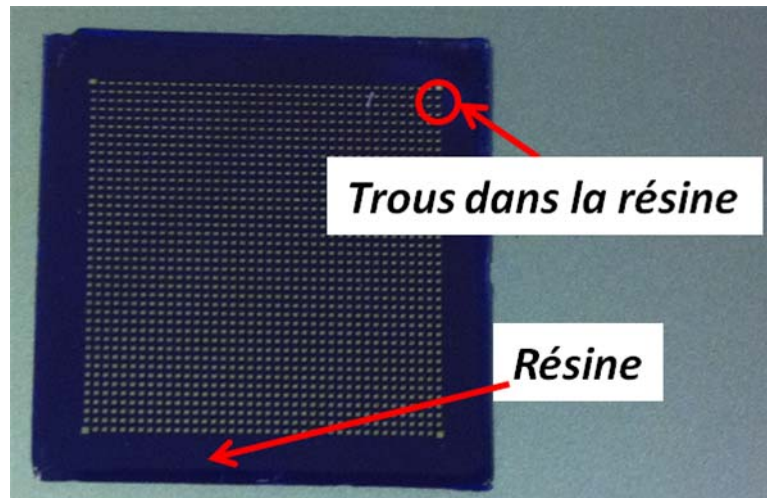
Pour résoudre le problème de résolution insuffisante, nous avons utilisé la résine négative WBR2100 qui se présente sous forme de papier film uniforme. Elle a  $100\mu\text{m}$  d'épaisseur. Sa résolution est 5:1. C'est à dire pour  $100\mu\text{m}$  d'épaisseur de résine, la taille minimum des motifs est de  $20\mu\text{m}$ . Pour notre besoin il faut  $200\mu\text{m}$  d'épaisseur et  $200\mu\text{m}$  d'intervalle, ce qui fait de cette résine la plus adaptée pour nos travaux, d'autant plus qu'elle est facile à retirer.



**Figure III.5: Machine de dépôt de résine film**

Après l'insolation, Les zones cachées par le masque doivent se dissoudre dans le révélateur. Cette opération est délicate dans notre cas parce que la largeur des trous est seulement  $200\mu\text{m}$ , mais la profondeur l'est aussi. A cause de la force tensorielle du liquide révélateur celui-ci ne peut pas arriver au fond des trous. La solution choisie pour ce problème est de faire passer de l'eau à une haute pression, qui permet au révélateur d'arriver au fond des trous. La durée de la révélation est de 30 minutes, pendant laquelle le substrat baigne dans le

liquide révélateur. A l'issue de cette opération, le substrat se présente comme on peut le voir en figure III.6.



**Figure III.6: Ouverture des motifs sur le substrat diamant CVD après révélation**

En conclusion, la résine WBR2100 convient parfaitement à nos besoins. Nous avons d'ailleurs fait des essais avec une épaisseur de résine de 300 $\mu$ m et des intervalles de motif de 200 $\mu$ m

### III.3.3 Dépôt électrochimique

Pour le dépôt d'une couche de micropoteaux en cuivre, nous avons accès à deux techniques de dépôts métalliques :

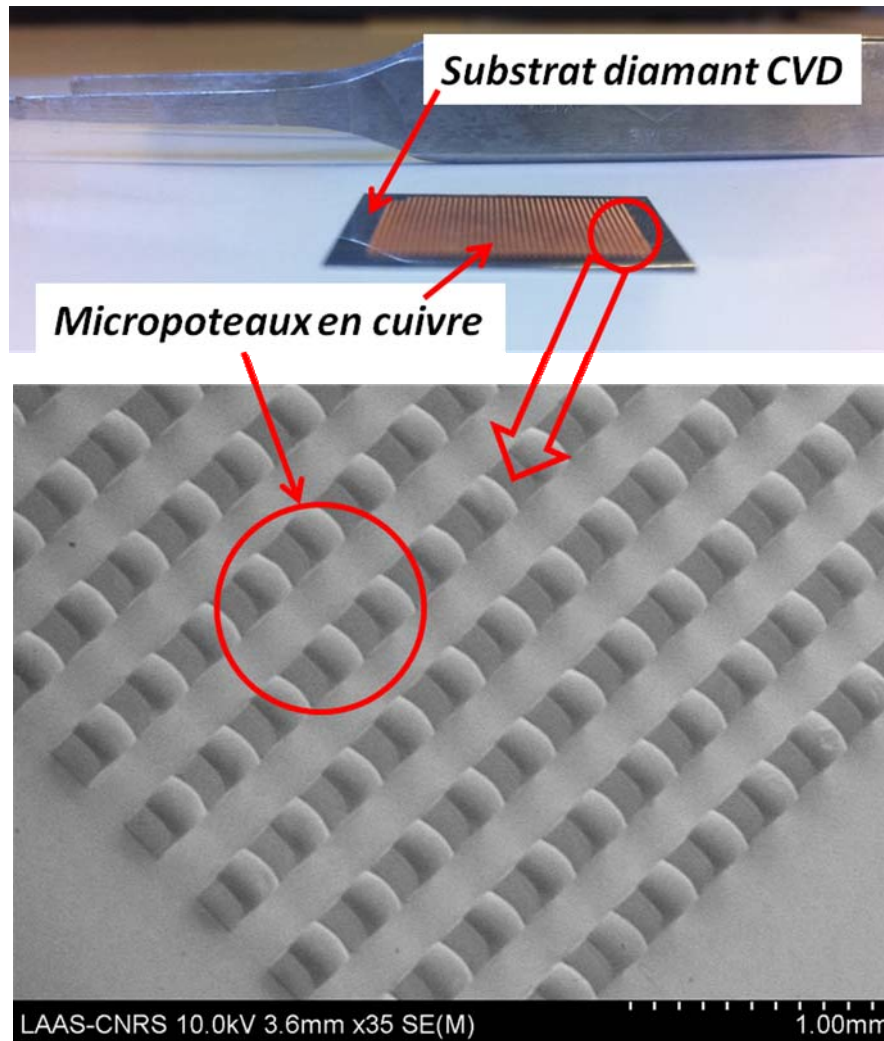
1. Physique : Evaporation, Sputtering .
2. Chimique en phase liquide : Auto catalytique, Electrodeposition

L'avantage du dépôt électrochimique réside dans sa capacité de déposer une couche épaisse avec un faible coût. Pour notre échantillon, nous avons besoin de déposer 200  $\mu$ m de cuivre sur la face arrière. Cette technologie nous paraît complètement adaptée à notre besoin.

Processus électrochimique :

Nous commençons par déposer une fine couche de Ti/Au suivi d'un recuit à 450 °C de façon identique à ce qui a été fait sur la face avant pour le report du composant. Cette couche sert d'accroche mécanique des micropoteaux et de prise de contact électrique pour la réaction électrochimique. Le substrat est ensuite plongé dans un liquide électrolytique qui permet le

passage d'un courant ionique qui produit un déplacement de la matière vers les zones découvertes par la résine et polarisées par l'intermédiaire de la couche Ti/Au.



**Figure III.7 : Photos des micropoteaux sur diamant CVD**

Après croissance des micropoteaux il suffit de dissoudre la résine pour obtenir le motif présenté par la figure III.7. Afin d'empêcher l'oxydation des micropoteaux qui pourrait altérer les motifs, nous procédons immédiatement à une fine déposition électrochimique d'Or.

### **III.3.4 Processus de fabrication**

Nous détaillons ici les étapes du processus de fabrication que nous utilisons pour réaliser les différentes couches qui nous permettent de valider la filière technologique. Ce

processus technologique comprend dix étapes et inclut toutes les étapes que nous avons optimisées pour notre système.

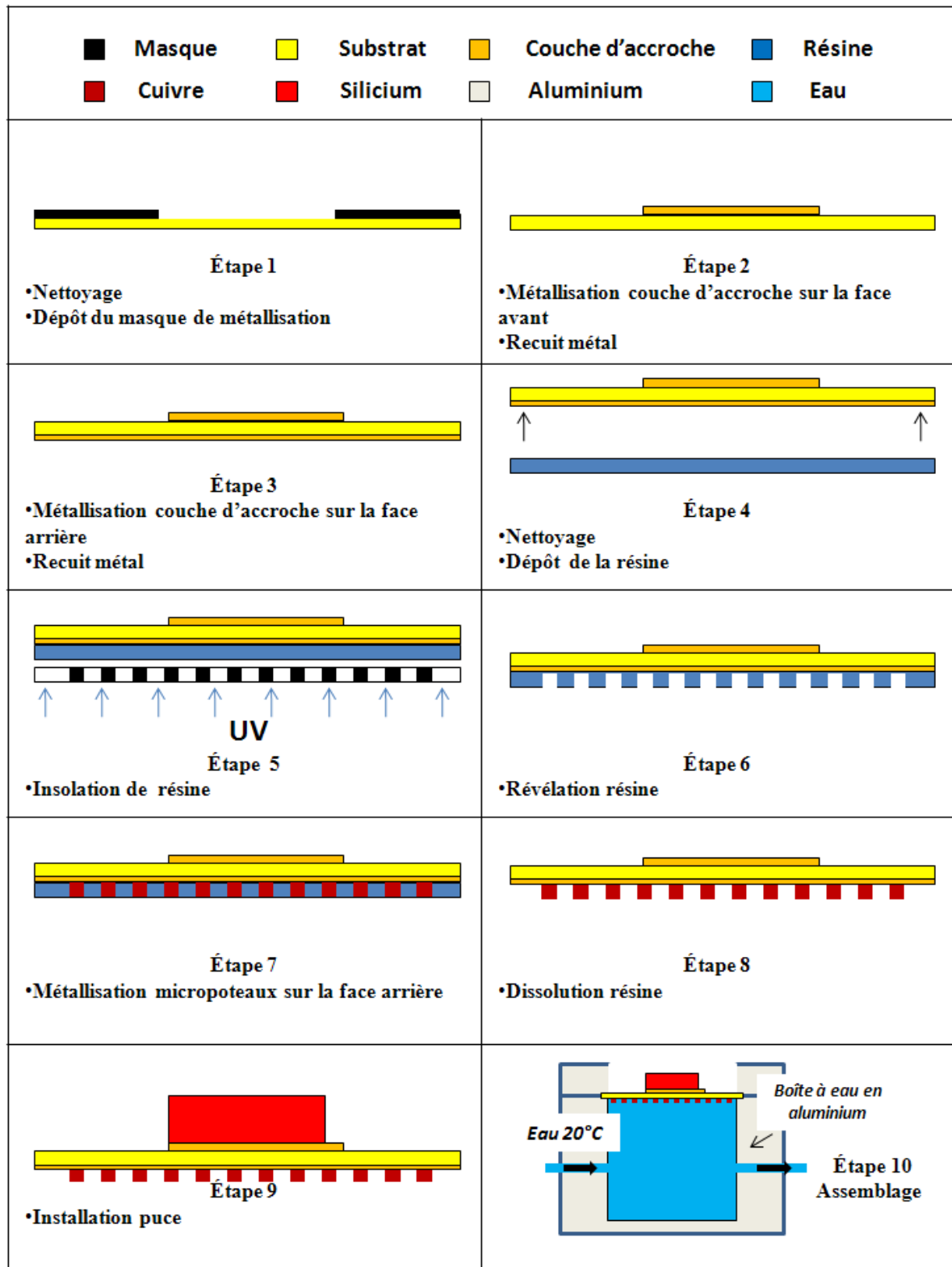


Figure III.8 : Principales étapes de fabrication de la structure de refroidissement avancé

La figure III.8 représente l'ensemble des étapes technologiques de la filière flexible illustrée pour les principales couches réalisées. A chaque étape nous précisons la modification structurelle apportée aux différents composants.

## III.4 Caractérisations thermiques et performances

### III.4.1 Dispositif de test

La figure III.9 montre le dispositif expérimental qui nous a permis de faire les caractérisations thermiques.

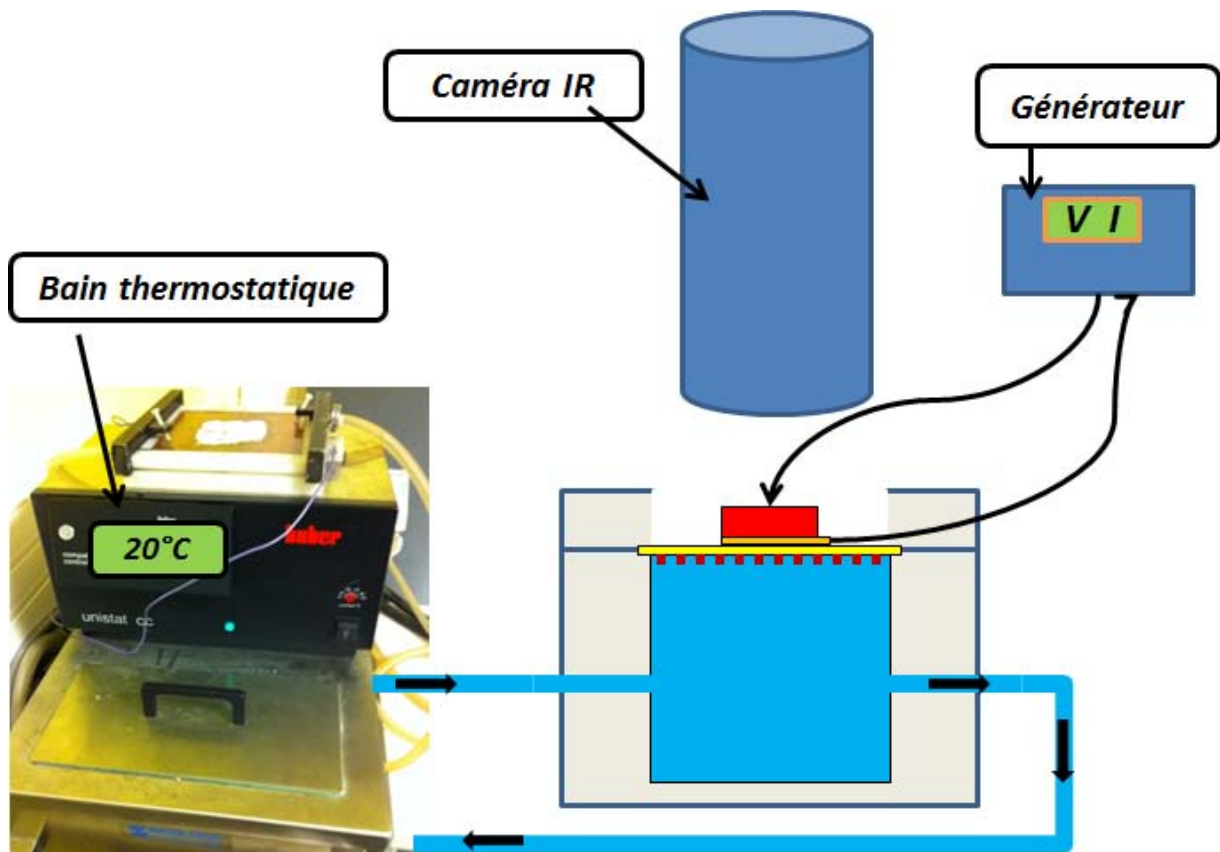


Figure III.9 : Principales des mesures thermographiques

### III.4.2 Mesures

A partir de l'estimation du coefficient d'échange thermique  $h$  qui est amélioré avec l'ajout de micropoteaux déterminé au chapitre précédent. Les mesures thermiques confirment toutes nos études par simulation. Avec ces mesures, nous testons le prototype avec substrat diamant CVD.

Une puce (en Si avec 4 mm par 4 mm de surface) qui est en fait juste une résistance chauffante constituée de silicium faiblement dopé ( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) avec prise de contacts ohmiques, ce qui lui confère une résistance de 10 Ohms. Elle est brasée sur le substrat (diamant CVD avec micropoteaux en cuivre) refroidi directement par l'eau qui circule en face arrière.

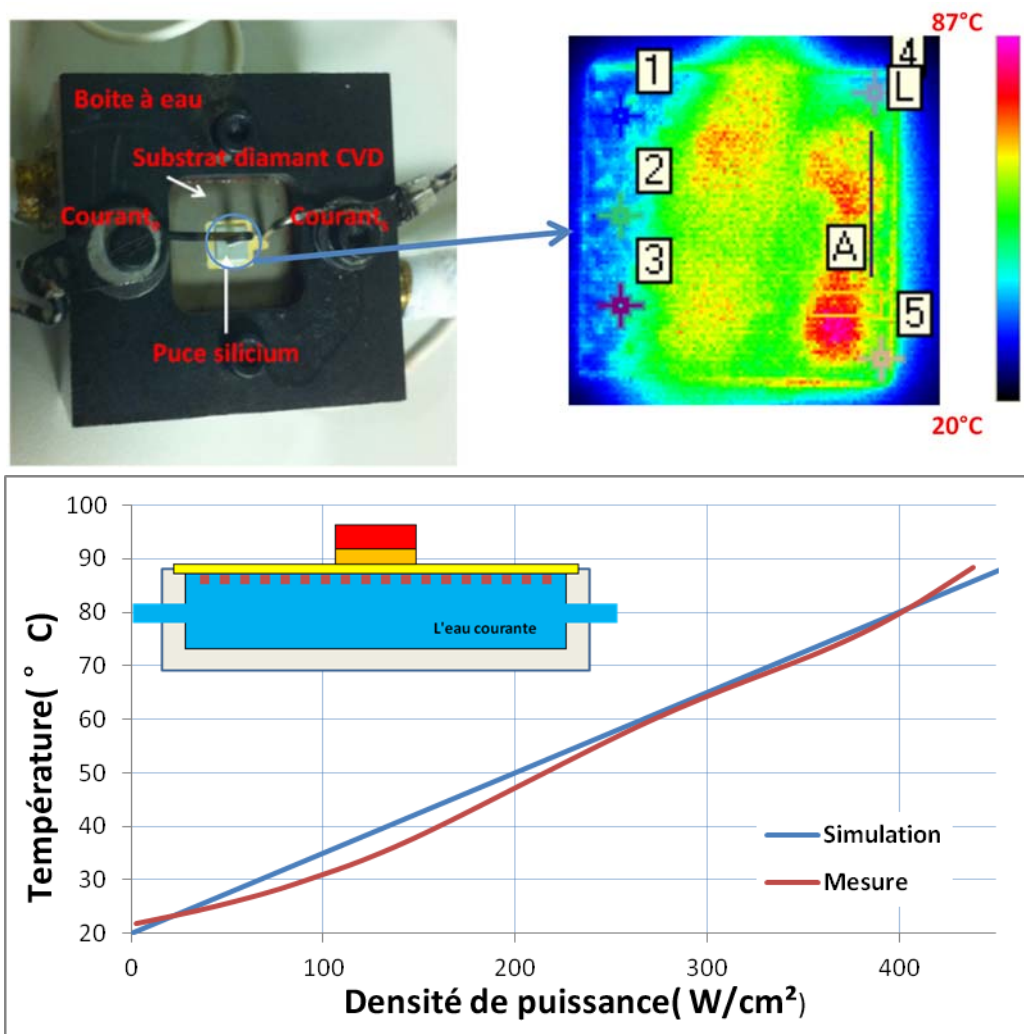


Figure III.10 : Mesures thermique réalisées par caméra infrarouge comparées avec les simulations

Sur la figure III.10 nous présentons une comparaison entre les résultats de simulations (voir CH. II) et les résultats de mesures infrarouges. Ces résultats donnent la température maximum atteinte au niveau de la puce pour différentes puissances dissipées.

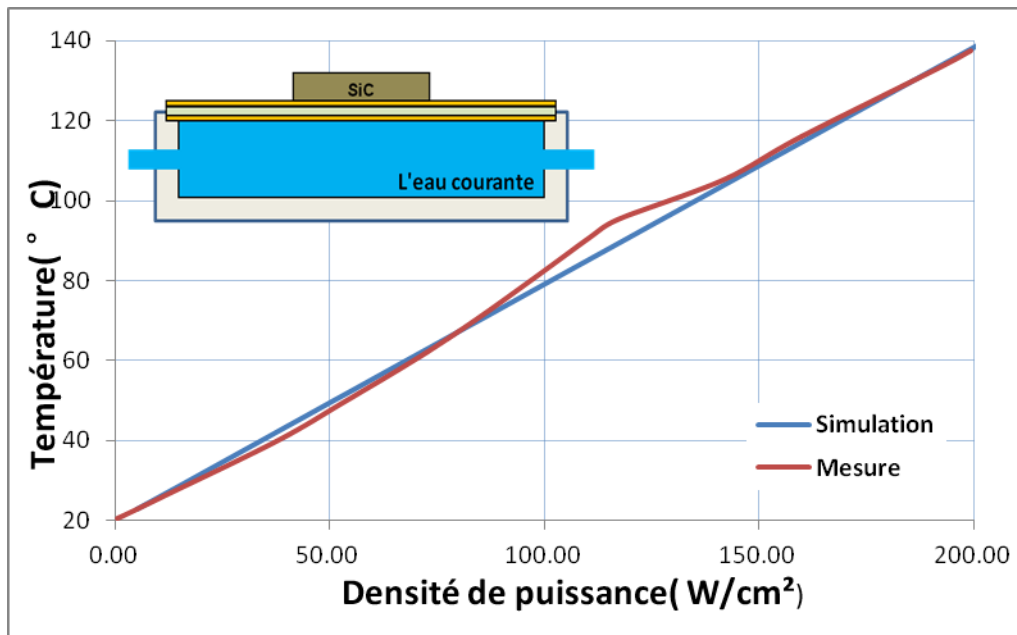
Nous pouvons constater une bonne correspondance entre les résultats de simulations et ceux issus des mesures thermographiques. La résistance thermique pour cette structure est évaluée à 0,9K/W.

### **III.4.3 Evaluation de différentes structures de refroidissement d'une diode SiC**

Nous avons également réalisé plusieurs solutions de refroidissement pour une puce plus large de 7x7mm<sup>2</sup> en SiC. Cette diode SiC présente une tension de seuil particulièrement élevée (3V) ce qui nous permet de dissiper une forte densité de puissance avec des courants modérés. La première utilisant un substrat DBC directement refroidi par l'eau. La deuxième solution a consisté à remplacer le DBC par une fine couche de diamant directement en contact avec l'eau. Et enfin la troisième solution a consisté à maintenir la couche de diamant et à déposer des micropoteaux en cuivre baignant dans l'eau.

#### **III.4.3.1 Première solution : substrat DBC en AlN**

La diode est brasée sur le substrat AlN (DBC de 2x2cm<sup>2</sup> de surface) refroidi directement par l'eau qui circule en face arrière. La mesure de la température est réalisée à l'aide d'une caméra infrarouge. Par ailleurs, nous procédons à des simulations sur la base des modèles validés et nous comparons avec les résultats expérimentaux.

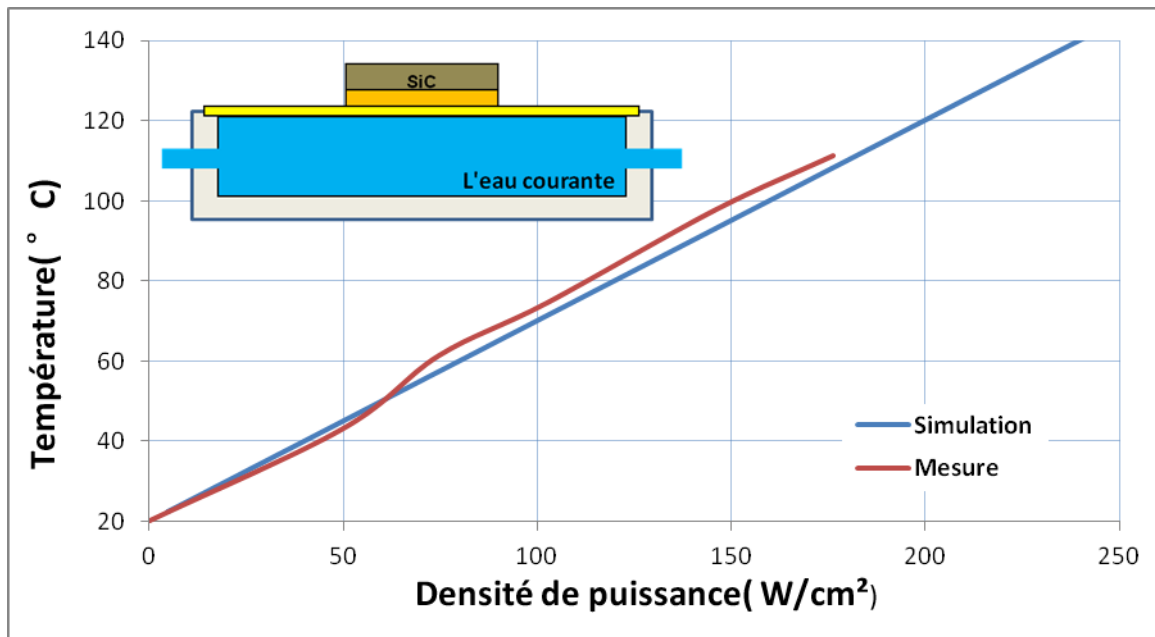


**Figure III.11: Mesures thermique réalisées par caméra infrarouge comparées avec les simulations**

Sur la figure III.11, on peut déduire qu'avec cette structure nous parvenons à une résistance thermique de 1,2 K/W. Par ailleurs, on peut remarquer que les deux courbes sont pratiquement superposées ce qui valide par la même notre démarche de modélisation.

### III.4.3.2 Deuxième solution : Substrat en diamant CVD

Nous reprenons la même diode SiC et nous la brasons sur un substrat de diamant CVD de 2x2 cm<sup>2</sup> de surface, et de 250µm d'épaisseur refroidi directement par l'eau qui circule en face arrière.



**Figure III.12 : Mesures thermiques réalisées par caméra infrarouge comparées avec les simulations**

De la figure III.12, on peut déduire la résistance thermique obtenue en procédant du remplacement du DBC par une fine couche de diamant CVD. Celle-ci étant de 1 K/W, nous avons un gain en termes de refroidissement de 20% par rapport à la structure précédente.

Il faut remarquer ici aussi la bonne correspondance entre résultats de simulations et résultats de mesures.

### III.4.3.3 Troisième solution : Substrat diamant CVD avec micropoteaux en cuivre

Afin d'améliorer encore la capacité de refroidissement de la diode SiC (voir figure III.13), nous avons réalisé une nouvelle structure partant de la deuxième solution et rajoutant des micropoteaux dont les caractéristiques sont données au chapitre II.

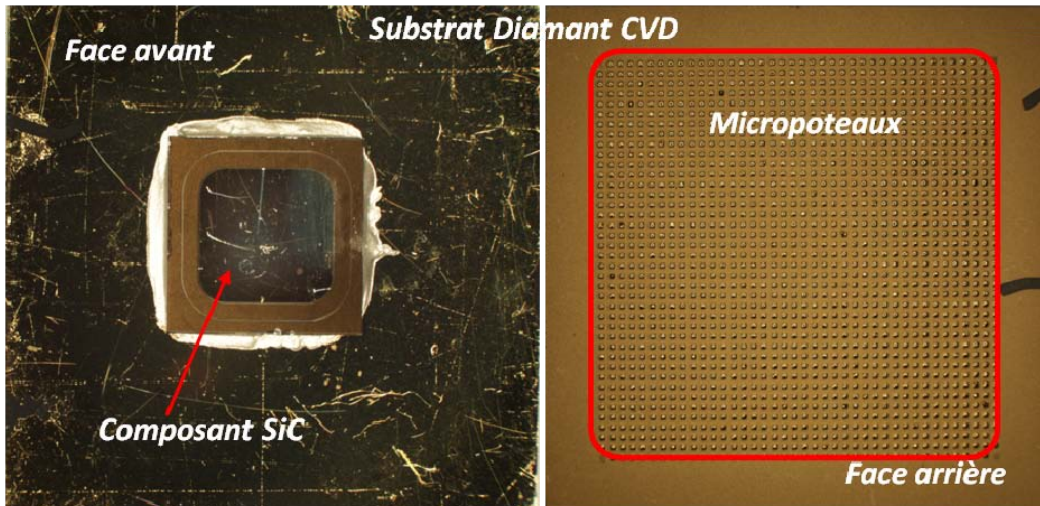


Figure III.13 : Diode SiC sur substrat Diamant CVD avec micropoteaux (vues face avant et face arrière)

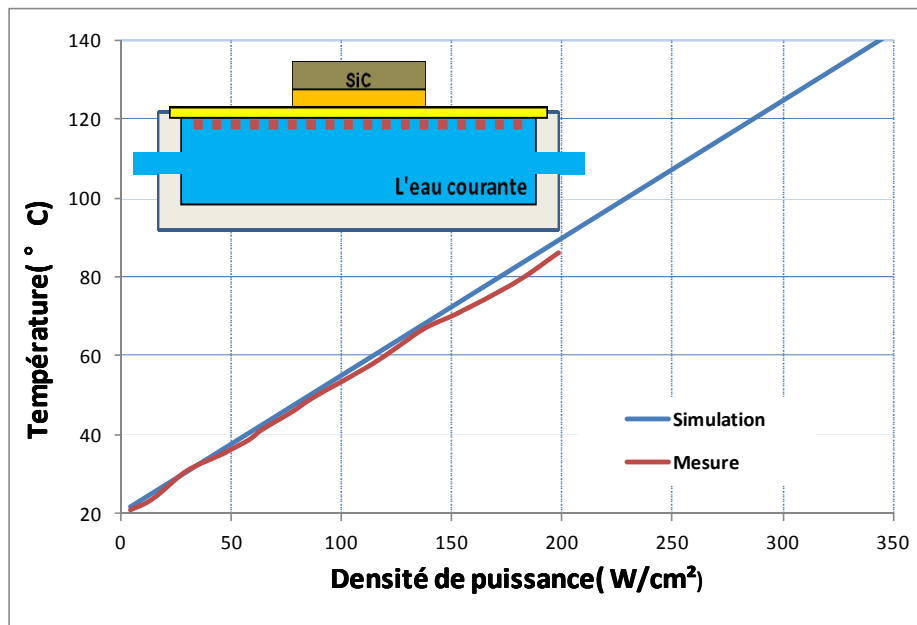


Figure III.14 : Mesures thermiques réalisées par caméra infrarouge comparées avec les simulations

Ici aussi, à partir de la figure III.14, nous pouvons déduire la résistance thermique de cette nouvelle structure. Celle-ci étant évaluée à 0,7 K/W, nous avons encore gagné en capacité de refroidissement de la diode SiC de 30% par rapport à la solution précédente et 40% par rapport à la solution classique DBC directement refroidi par l'eau.

### III.4.3.4 Comparaison entre les différentes solutions proposées

Nous avons récapitulé les courbes d'efficacité de refroidissement des trois solutions proposées en figure III.15. Cela nous permet de faire le meilleur choix possible compte tenu de la puissance dissipée à évacuer. Sachant par ailleurs que le coût peut être dans certains cas un paramètre important. Cependant, il ne faut pas interpréter ces courbes comme un abaque de dimensionnement car la figure III.15 donne les résultats pour un cas particulier pour une structure de dimensions bien précises.

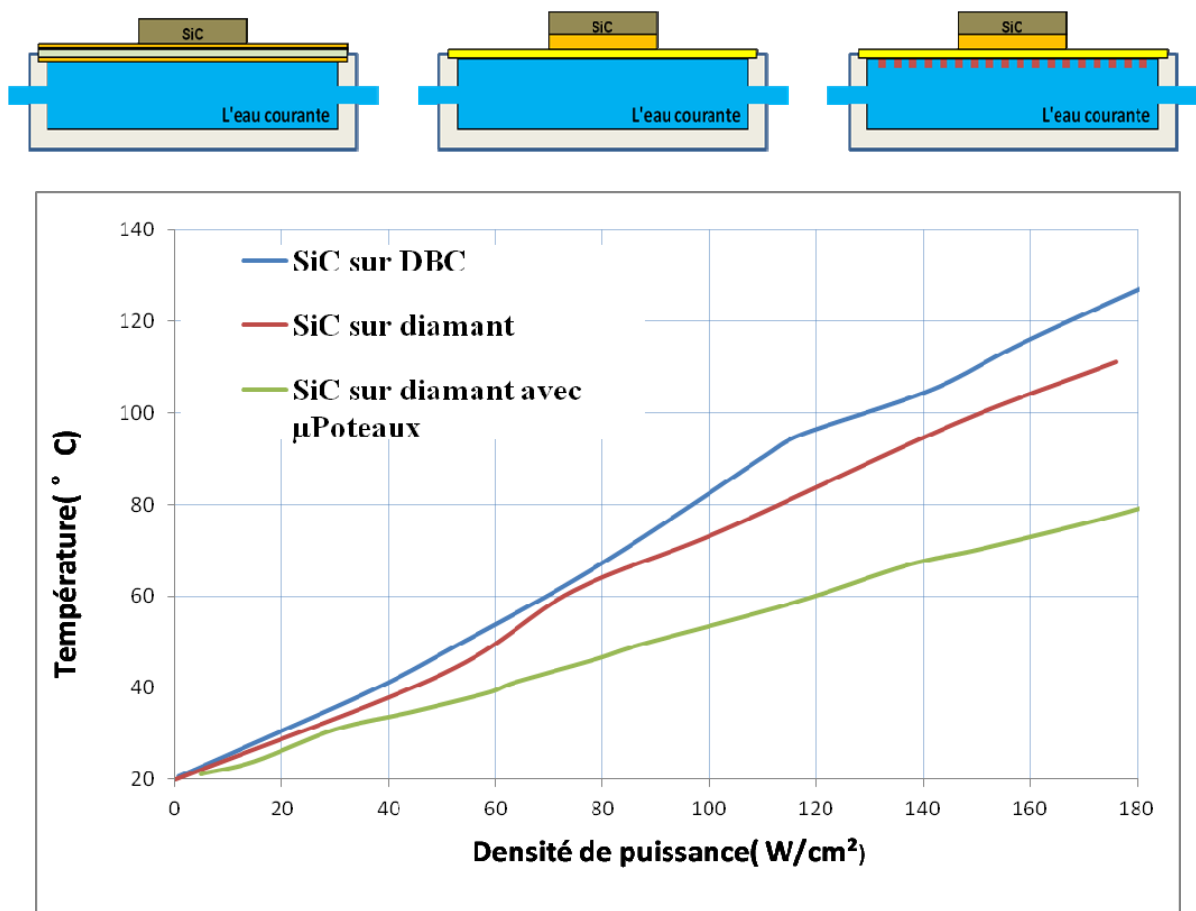


Figure III.15 : Comparaison des performances de refroidissement des trois structures

## III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons montré les trois structures réalisées et les mesures effectuées dessus comparées aux résultats des simulations faites sur ces mêmes structures. Nous avons ainsi mis en évidence la bonne correspondance entre les mesures et les simulations, montrant ainsi que les modèles élaborés sont judicieux.

Il apparaît dans cette étude que le fait d'augmenter la surface d'échange par l'ajout de micropoteaux améliore nettement la capacité de refroidissement. Avec cette dernière solution, le potentiel de refroidissement peut encore être considérablement amélioré si l'on remplace l'eau par des métaux liquides comme le gallium, ce qui ferait augmenter le coefficient d'échange convectif à plus de  $50.000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Il est bien entendu nécessaire de faire des calculs plus poussés pour des cas particuliers qui pourraient se poser, car la taille de la puce (voir figure II.25) à considérer conditionne tout le système de refroidissement et les solutions les plus adaptées peuvent aussi dépendre de cette grandeur fondamentale. Par ailleurs, le coût est un paramètre qui peut avoir selon les applications visées plus ou moins d'importance. Il est par exemple exclu actuellement de viser l'industrie de l'électronique automobile avec ce type de structures avancées. Mais pour des applications aérospatiales la question est posée.

## III.6 Bibliographie

1. DDK. *CVD DIAMOND*. Available from: <http://www.ddk.com/cvd-diamond.php>.
2. Six, E. *Polycrystalline CVD diamond(Thermal materials)*. 2012; Available from: [http://www.e6.com/wps/wcm/connect/e6\\_content\\_en/home/materials+and+products/polycrystalline+cvd+diamond/thermal+materials/thermal+materials](http://www.e6.com/wps/wcm/connect/e6_content_en/home/materials+and+products/polycrystalline+cvd+diamond/thermal+materials/thermal+materials).
3. cvd-diamond. *Diamond Materials*. Available from: <http://www.cvd-diamond.com/>.
4. Hebei Plasma Diamond Technology Co., L. *CVD Diamond for thermal management*. 2011; Available from: <http://www.hediamond.cn/en/default.aspx>.
5. Technologies, s.D. *DiaTherm™ CVD Diamond Heat Spreaders*. 2012; Available from: [http://www.sp3diamondtech.com/prod\\_diatherm.asp](http://www.sp3diamondtech.com/prod_diatherm.asp).
6. Ding, H., et al., *Basic parameters and models in simulation of CVD diamond devices*. *Diamond and Related Materials*, 2010. **19**(5-6): p. 500-502.
7. Kone, S., et al., *CVD diamond Schottky barrier diode, carrying out and characterization*. *Diamond and Related Materials*, 2010. **19**(7-9): p. 792-795.
8. Kone, S., et al., *High performances CVD diamond Schottky barrier diode - Simulation and carrying out*. Epe: 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Vols 1-9, 2009: p. 5137-5144.
9. Civrac, G., *Vers la réalisation de composants haute tension, forte puissance surdiamant CVD. Développement des technologies associées*, 2009.
10. Hoff, H.A., et al., *Ohmic contacts to semiconducting diamond using a Ti/Pt/Au trilayer metallization scheme*. *Diamond and Related Materials*, 1996. **5**(12): p. 1450-1456.
11. Werner, M., et al., *Electrical characterization of Al/Si ohmic contacts to heavily boron doped polycrystalline diamond films*. *Journal of Applied Physics*, 1996. **79**(5): p. 2535-2541.
12. Verdyan, A., et al., *Nano indentation inspection of the mechanical properties of gold nitride thin films*. 3rd Int Conf on Cybernetics and Information Technologies, Systems, and Applicat/4th Int Conf on Computing, Communications and Control Technologies, Vol 1, 2006: p. 52-57.
13. Das, K., et al., *A review of the electrical characteristics of metal contacts on diamond*. *Thin Solid Films*, 1992. **212**(1-2): p. 19-24.
14. Khan, M.K., et al., *Application of the work of indentation approach for the characterization of aluminium 2024-T351 and Al cladding by nanoindentation*. *Journal of Materials Science*, 2009. **44**(4): p. 1006-1015.
15. Burger, R., et al. *Multiplexing of highly reproducible, bead-based immunoassays on a centrifugal microfluidic platform*. in *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference on*. 2011.
16. Fritzscht, T., et al., *Cost effective flip chip assembly and interconnection technologies for large area pixel sensor applications*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics*

- Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2011. **650**(1): p. 189-193.
17. Braun, T., et al. *3D stacking approaches for mold embedded packages*. in *Microelectronics and Packaging Conference (EMPC), 2011 18th European*. 2011.
  18. Oskam, G., et al., *Electrochemical deposition of metals onto silicon*. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 1998. **31**(16): p. 1927-1949.
  19. TAWK, M., *Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique*, 2006. p. 167.



## **Chapitre IV Le diamant CVD pour la passivation des composants**



## IV.1 Introduction

Les composants de puissance classiques en silicium nécessitent le dépôt d'une couche de terminaison, dite couche de passivation primaire. Cette couche sert à protéger le composant des contraintes extérieures et surtout augmente la tenue en tension en évitant un claquage dans l'air. Cette passivation est réalisée aujourd'hui par un dépôt d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou de nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), matériaux qui présentent des propriétés diélectriques excellentes mais de piètres propriétés thermiques. Remplacer ces matériaux par une couche de diamant déposée par des techniques CVD permettrait d'augmenter considérablement les propriétés thermiques de cette couche et pourrait offrir de nouvelles performances en termes de refroidissement des composants. C'est aussi une façon d'utiliser le diamant avec parcimonie puisque ces couches sont très fines ce qui réduira le coût d'une telle mise en œuvre.

Nous avons mené des études très prospectives dans ce sens. Nous avons étudié par simulation les différentes configurations qui permettraient de tirer profit d'une couche de diamant déposée par CVD. Nous avons ensuite travaillé avec le CEA Saclay pour développer les technologies nécessaires à la réalisation et à la caractérisation de ces dépôts. Ce chapitre présente un résumé de ces travaux.

### IV.1.1 Passivation

Dès 1959, M.M Atalla et ses collègues du laboratoire BELL ont trouvé que les composants silicium sont instables dans l'air. Pour stabiliser ces composants semi-conducteurs ils ont développé une couche isolante électrique protectrice déposée à la surface des dispositifs[1]. Cette couche doit passiver les états de charges en surface du semi-conducteur, protéger les parties actives des ruptures diélectriques par contournement du champ en surface, et réduire l'effet des nuisances extérieures telles que les agressions mécaniques, l'humidité ou les contaminants, qui peuvent dégrader les caractéristiques électriques du composant[3].

La figure IV.1 présente différents composants de puissance avec la localisation de la couche de passivation.

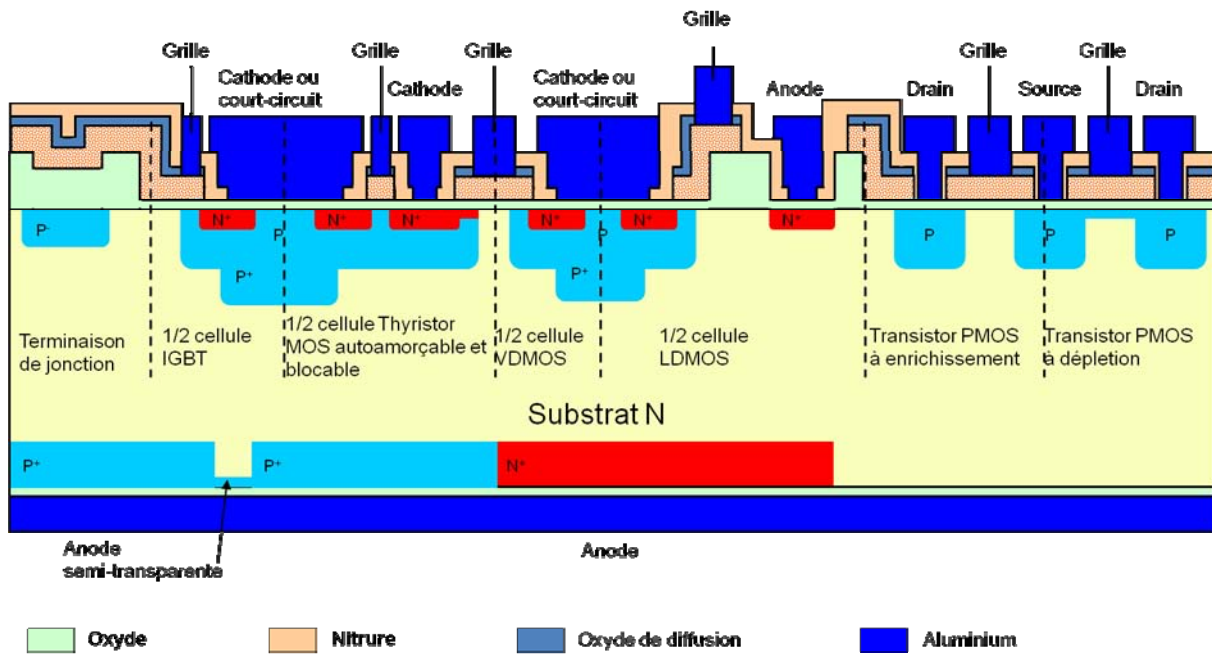


Figure IV.1 Structure des composants avec une couche de passivation[4]

Les propriétés de cette couche doivent être :

- Champ de rupture diélectrique élevé.
- Bonne tenue en température
- Empêcher la diffusion des impuretés nocives.
- Bonne adhérence avec le semi-conducteur.
- Coefficient de dilatation thermique proche du semi-conducteur.

Le film de dioxyde de silicium est largement utilisé depuis les années 1960, plus tard, les chercheurs ont développé plusieurs types de passivation : PSG,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et polyamide, etc. Ces matériaux peuvent être associés pour former des passivations multicouches. Le tableau IV.1 résume les propriétés de ces différents matériaux. Ce tableau montre aussi clairement que le diamant massif présente les meilleures propriétés physiques pour la passivation des composants de puissance. Il faut savoir maintenant s'il est possible d'obtenir le dépôt d'une couche fine de diamant, compatible avec la filière silicium, et qui présente ces mêmes propriétés. Il faudra également s'assurer de la bonne adhérence de cette couche.

Matériau	Résistivité ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$E_c$ (V/cm)	Conductivité thermique (W/m·K)	Thermal expansion (ppm/°C)
SiO <sub>2</sub>	$10^{14} - 10^{16}$	$10^7$	1.4	0.42
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	$10^{14}$	$10^7$	18.4	1.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$10^{19}$	$10^6$	26.9	6
Polyimide	$10^{19}$	$5.5 \times 10^5$	0.5	35
Diamant CVD	$10^{14}$	$10^6$	2000	1.5

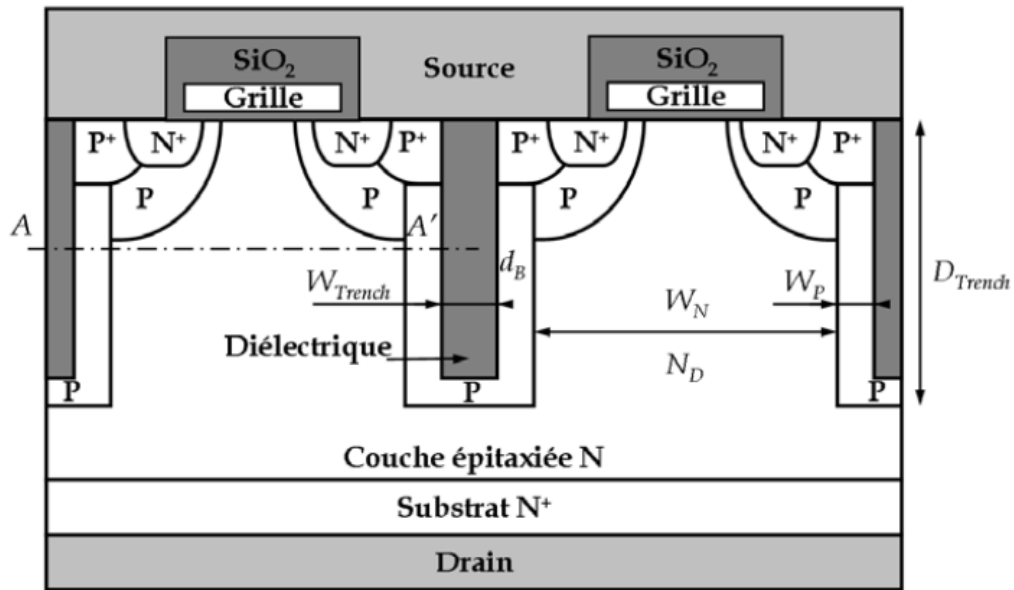
Tableau IV.1 : Les matériaux utilisés pour la passivation

## IV.1.2 Apport d'une couche de passivation en diamant – Etude par simulation

Parallèlement à nos études technologiques présentées par la suite nous avons utilisé la plateforme de simulation numérique pour étudier les potentialités offertes par une couche de passivation en diamant.

Nous pourrions envisager d'utiliser cette couche pour améliorer le refroidissement par la face supérieure dans le cadre d'un refroidissement double face. Mais, comme nous l'avons vu au chapitre II, cette couche fine présente une résistance thermique négligeable devant l'ensemble des résistances thermiques mises en jeu. L'amélioration de la conductivité thermique en statique de cette couche n'apporte que très peu de gain et nous ne présenterons pas ici cette étude.

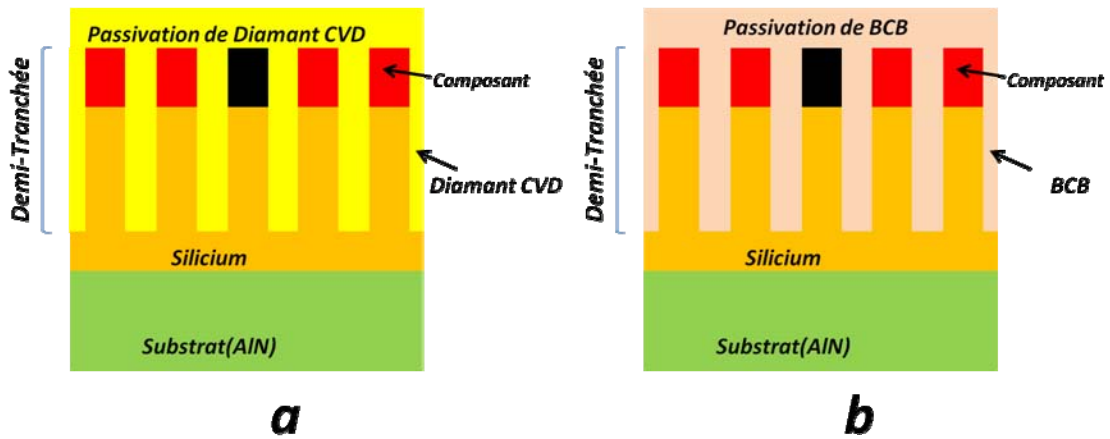
Là où une passivation en diamant nous paraît présenter un intérêt c'est par rapport à des phénomènes localisés et/ou transitoires très courts. La diffusivité exceptionnelle du diamant pourrait alors apporter un gain substantiel. Nous illustrons ces potentialités dans le cas particulier des composants à tranchées [16]. La figure IV.2 présente par exemple un DTSJMOS.



**Figure IV.2 : Coupe schématique d'un transistor DT-SJMOS avec une tranchée de profondeur  $D$  et largeur  $W$ .**

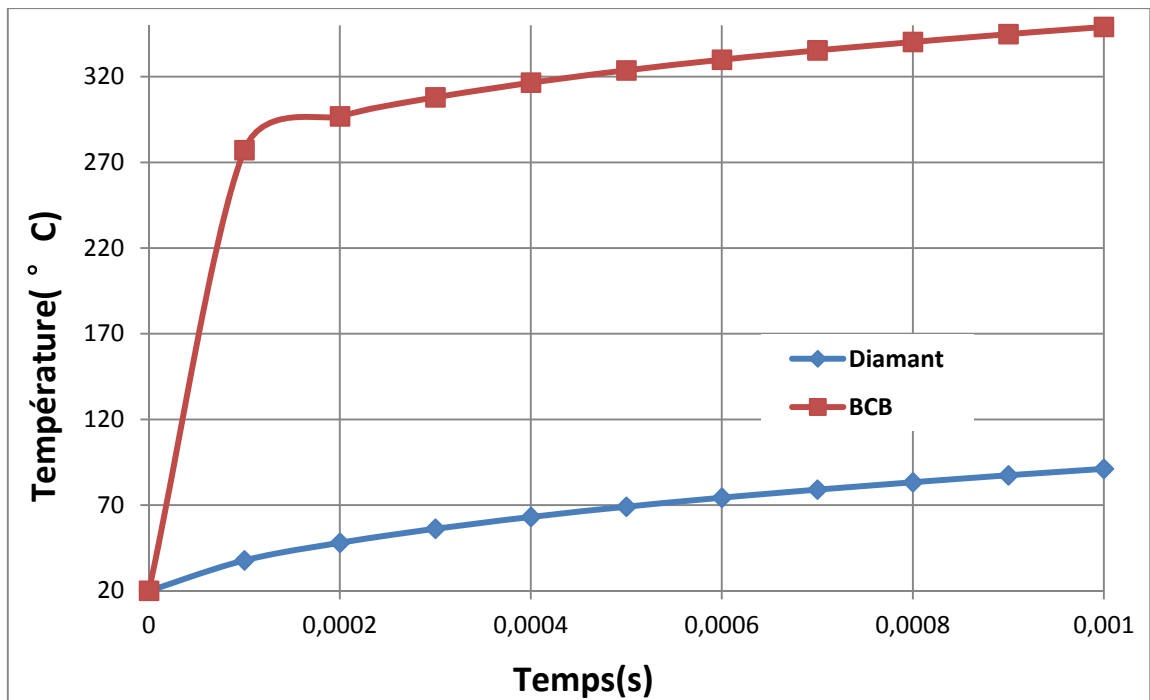
Les tranchées de séparation des cellules ou de terminaisons sont en général remplies d'un diélectrique type BCB (Benzocyclobutène) mauvais conducteur thermique. Le BCB est un polymère qui se comporte comme une résine négative en photolithographie. Ce polymère peut être utilisé comme membrane, couche de passivation ou encore diélectrique. Il est utilisé d'une part pour son faible coût, et d'autre part pour ses propriétés mécaniques (faibles contraintes résiduelles, température de polymérisation inférieure à  $300^{\circ}\text{C}$ , coefficient de dilatation raisonnable) et électriques (constante diélectrique et facteur de dissipation faibles). Mais le BCB présente une conductivité thermique très faible ( $0.3 \text{ W/m}\cdot\text{k}$ ). Nous montrons ci-dessous l'intérêt que l'on pourrait trouver à remplacer ce BCB par du diamant. La réalisation technologique sera discutée par la suite.

Pour résoudre exclusivement notre problème thermique et ne pas avoir à recourir à un simulateur de physique du composant nous avons modélisé notre problème par un ensemble de poteaux de silicium séparés par le diélectrique et simulé le tout avec COMSOL. La figure IV.5 présente ce principe avec la localisation d'une zone à forte dissipation au milieu du composant.

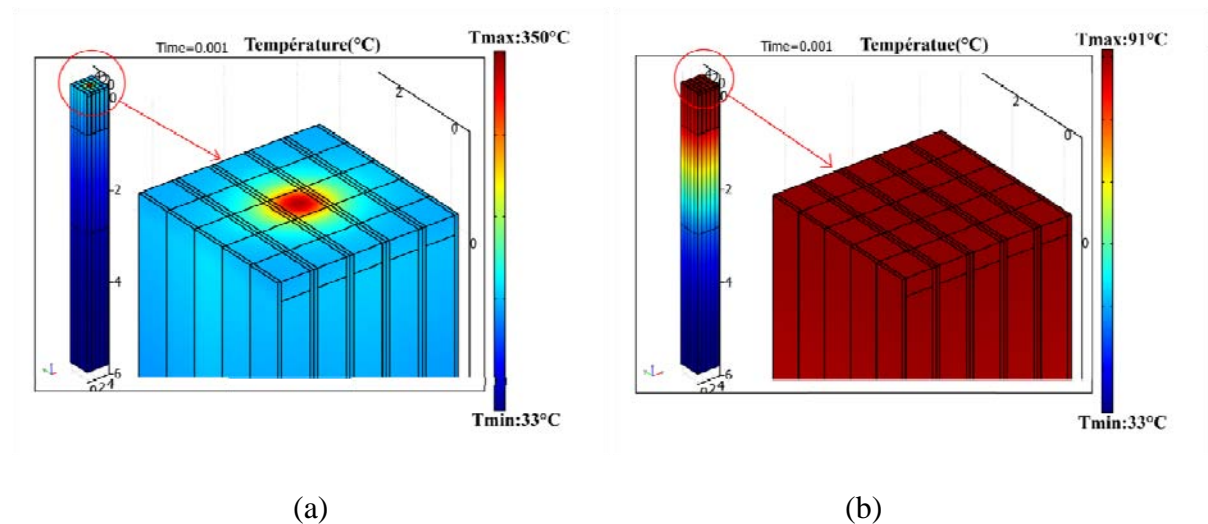


**Figure IV.3 : Coupe schématique du transistor DT-SJMOS. (a)Passivation en diamant CVD et tranchée en diamant CVD ;(b) Passivation en BCB et tranchée en BCB**

Dans ce cas là nous pouvons déterminer l'élévation de la température de la cellule du milieu lors d'une dissipation importante localisée en ce point. On pense par exemple ici à des phénomènes transitoires tels que les SEE (Single Event Effect)[18]. Pour plus d'information sur ce point le lecteur pourra se reporter à la thèse de Aurore LUU[20]



**Figure IV.4 : Evolution de la température d'une cellule au sein d'un composant de puissance à tranchées lors d'une dissipation localisée. Diélectrique diamant ou BCB**



**Figure IV.5 : Simulation de plusieurs cellules d'un DT-SJMOS lors d'une dissipation locale au milieu. Résultat après 1ms. (a) BCB, (b) Diamant**

Les figures IV.4 et figure IV.5 présentent nos résultats de simulation transitoire aux temps allant jusqu'à 1ms. Nous pouvons voir clairement (figure IV.4) que le remplacement de la couche de BCB par du diamant réduit notablement la température de la zone active pour une impulsion de puissance de courte durée (réduction de l'échauffement de 300°C à 50°C). Par ailleurs, cette simulation illustre parfaitement la diffusion, rendue possible par le diamant, qui facilite l'évacuation des calories et évite un point chaud par homogénéisation des températures (figure IV.5).

Nous n'avons pas poussé plus loin ces études par simulation pour nous consacrer à la réalisation technologique qui a pris malheureusement beaucoup plus de temps que prévu et ne nous a pas permis de revenir sur ces aspects.

## IV.2 Croissance d'une couche fine de diamant CVD sur puces silicium

Des croissances de diamant CVD ont été réalisées au CEA-LIST (Commissariat à l'énergie atomique site de Saclay). Le CEA a développé une nouvelle technique de dépôt de particules de diamant basée sur la chimie de surface (voir figure IV.6). En recouvrant le support d'une très fine couche (quelques nanomètres) d'un polymère chargé positivement, il

est possible de greffer électro-statiquement les particules de diamant chargées négativement sur de nombreux supports. Dès le début de la croissance le polymère est entièrement éliminé. Cette technique permet de réaliser des films de diamant ultraminces de l'ordre de 50 nm. La technique est très simple d'utilisation puisque le dépôt du polymère et le greffage des particules s'effectuent par simple trempage dans des solutions aqueuses [21].

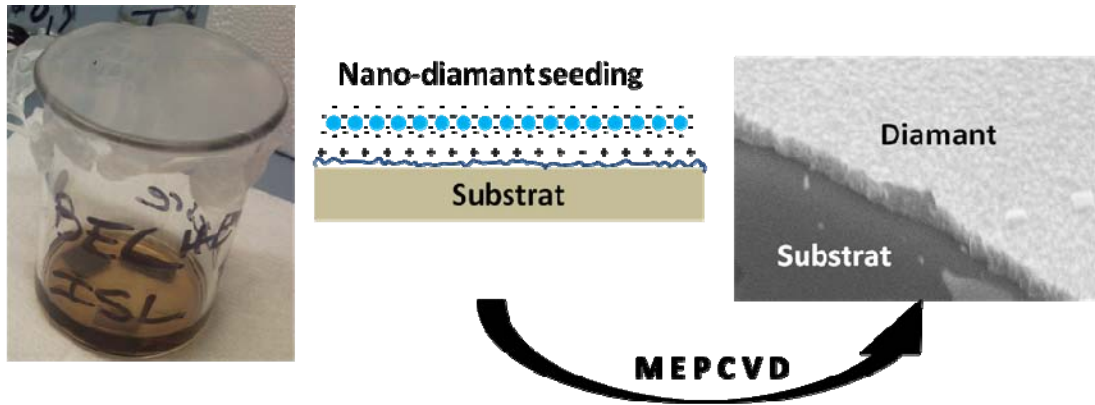


Figure IV.6 : Illustration d'une croissance d'une couche diamant sur substrat

Pour les besoins de nos expériences nous avons découpé une plaquette de silicium issue de la filière composants de puissance du LAAS (figure IV.7). Nous pouvons ainsi mener plusieurs essais sur le même type de composant (diodes, mosfet, IGBT).

Nous avons également essayé de déposer du diamant sur un support GaN mais cela n'ayant pas été concluant nous n'en parlerons pas ici.

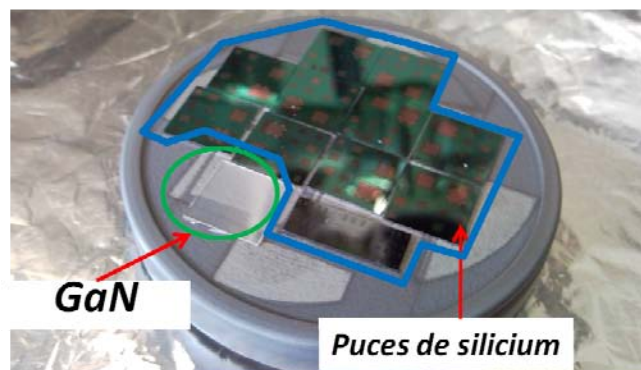


Figure IV.7: Les différentes puces de silicium et GaN avant dépôt de diamant

Dans un premier temps, nous allons présenter l'enchaînement des étapes technologiques du processus complet que nous avons réalisé à la centrale de technologie du LAAS.

Ensuite, nous étudierons la caractérisation électrique des composants de cet échantillon, tels qu'une diode et une résistance.

## IV.2.1 Réalisation

Nous avons utilisé ces techniques de dépôt de diamant CVD pour remplacer la couche de passivation de composants de puissance. Pour cela il nous a fallu développer différentes étapes spécifiques :

- Croissance d'une couche de diamant homogène
- Ouverture de cette couche par gravure RIE (Reactive Ion Etching)
- Dépôt des contacts

La figure IV.8 illustre ces différentes étapes :

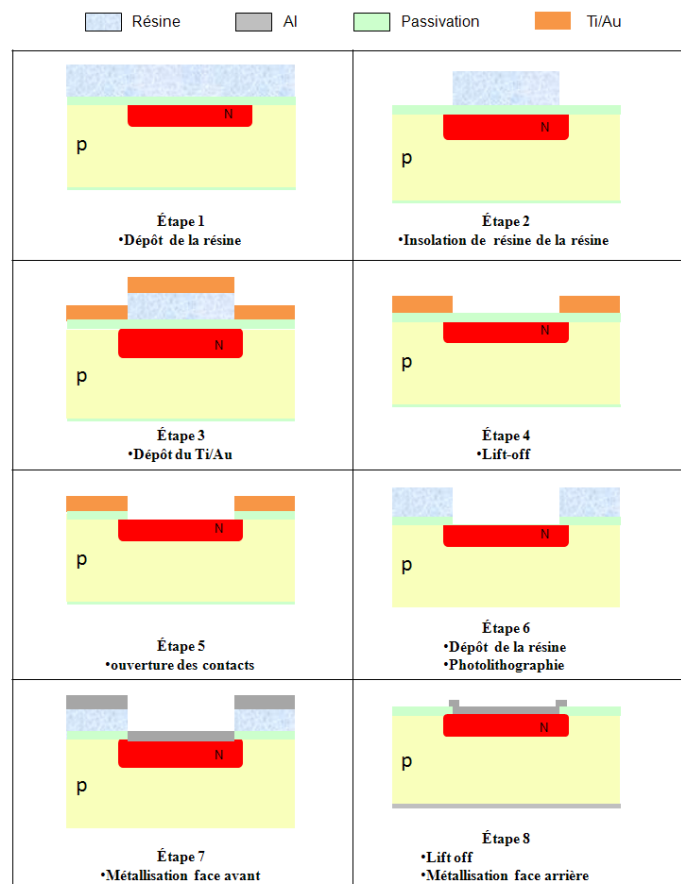
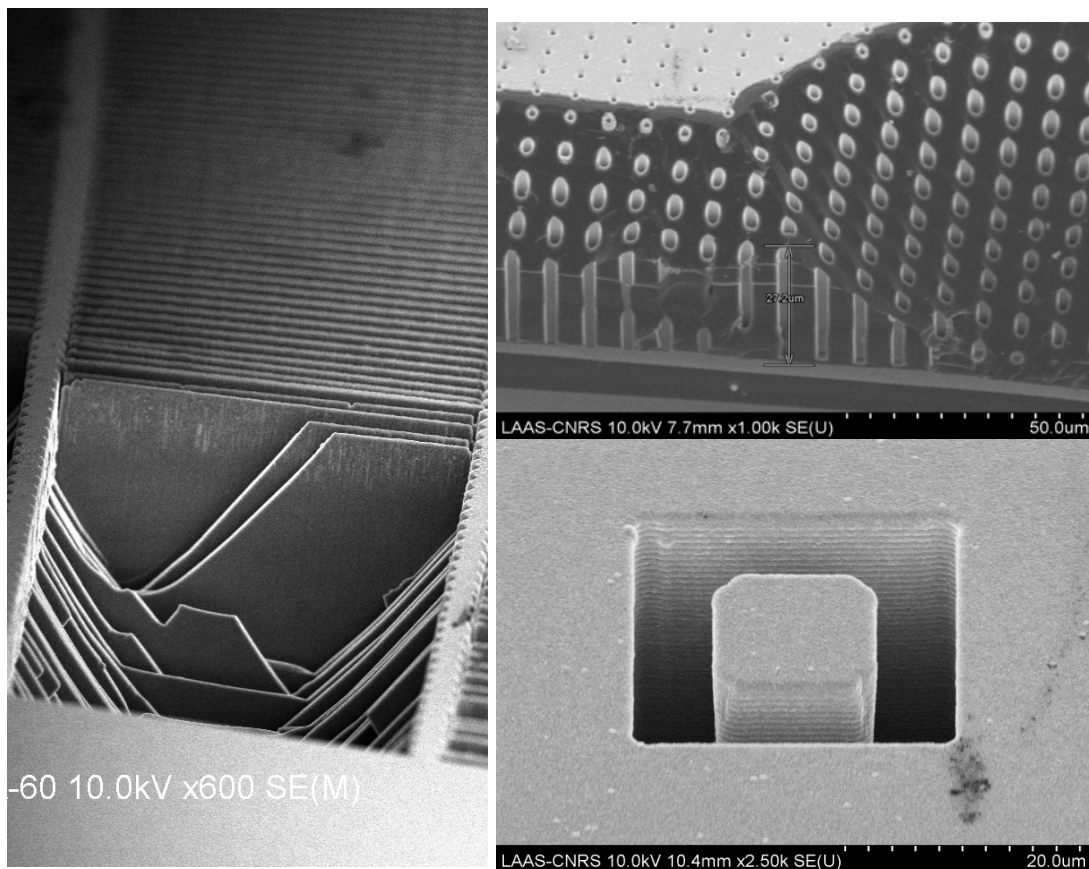


Figure IV.8 : Etapes nécessaires à la passivation par diamant CVD

### IV.2.1.1 Croissance d'une couche homogène

Il est particulièrement important de s'assurer que nos dépôts soient conformes et couvrants. Nous avons étudié cette uniformité des dépôts sur des structures gravées dans du silicium. Nous avons ainsi démontré que nous pouvions déposer du diamant de façon uniforme sur des hauteurs de marche de trou ou de tranchée de plus de 120  $\mu\text{m}$  comme l'illustre la figure IV.9.



**Figure IV.9 : Structures utilisées pour évaluer la conformité de nos dépôts**

Cette technique semble donc être parfaitement adaptée à nos besoins. Nous avons alors utilisé ce même procédé pour recouvrir des composants de puissance (diodes ou IGBT).

La figure ci-dessous (figure IV.10) montre une diode vue de dessus après une croissance de diamant CVD.

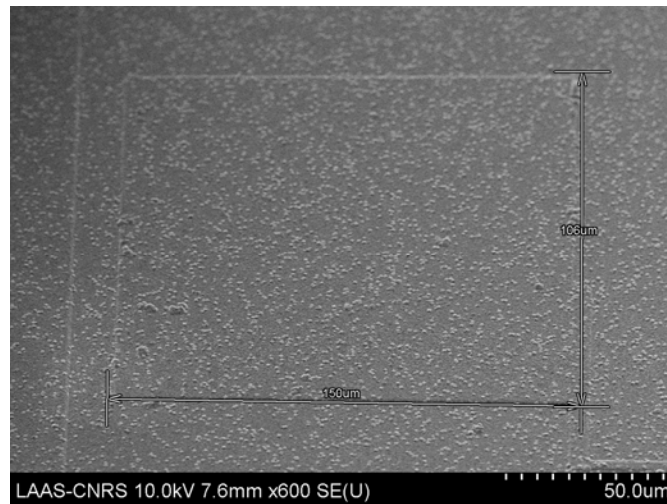


Figure IV.10 : Diamant CVD sur composants silicium

### IV.2.1.2 Ouverture contacts face avant

Après l'étape de croissance du diamant CVD il faut venir ouvrir cette couche isolante pour reprendre le contact de face avant. Le diamant, inerte chimiquement, est très difficile à graver par voie humide, du moins à des températures modérées. Il est donc nécessaire de maîtriser sa gravure par voie sèche. Le LAAS dispose d'un réacteur de gravure RIE/ICP (Reactive Ion Etching/ Inductive Coupled Plasma). Le dispositif est entièrement piloté à partir d'un PC, seul le chargement/déchargement des plaquettes dans le sas de transfert est manuel.

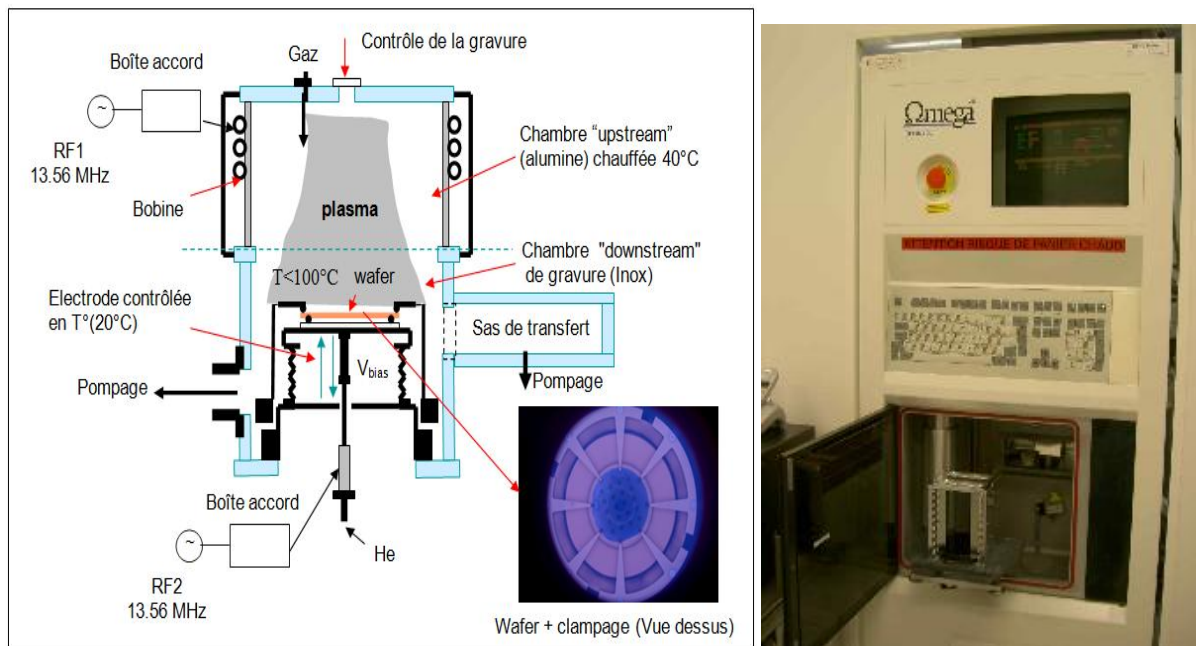


Figure IV.11 : Schéma de principe et photographie de réacteur RIE-ICP du LAAS.

Le réacteur ICP comprend :

Une chambre plasma "upstream" appelée enceinte basse pression équipée d'un système d'introduction des gaz avec le contrôle de leur débit. La source ICP, composée d'un générateur RF1 (13,56 Mhz) connecté à une bobine par l'intermédiaire d'une boîte d'accord, permet de générer un plasma basse pression (0.1 à 10 Pa) haute densité ( $10^{11}$  à  $10^{12}$  cm<sup>-3</sup>) sans pulvérisation des parois du réacteur. La puissance maximale de la source RF1 est de 600W.

Une chambre de gravure "downstream" où a lieu effectivement la gravure du wafer.

Le générateur RF2 (13,56 Mhz) permet la polarisation du substrat indépendamment de la création du plasma inductif. Un champ électrique perpendiculaire au substrat généré par la tension de polarisation permet alors d'accélérer les espèces ioniques vers le substrat.

Les produits de gravures volatils sont évacués hors du réacteur par le système de pompage.

L'avantage de contrôler indépendamment les principaux paramètres du plasma offre une meilleure précision du procédé :

La puissance plasma ( $P_{RF}$ ) est à la base de la création du plasma "réservoir d'ions et de radicaux". Plus la puissance plasma est importante, plus la densité des ions et des radicaux est élevée. A une polarisation et une pression donnée, cela va avoir pour conséquence directe une augmentation de la vitesse d'attaque de la surface du matériau.

La tension de polarisation contrôle l'énergie des ions responsables de la gravure physique du matériau. Les valeurs de la tension de polarisation déterminent le caractère isotrope ou anisotrope de la gravure et l'état de surface du matériau.

La pression est régulée par le débit des gaz injectés et des gaz évacués par le système de pompage. Plus la pression du gaz devient importante, plus le flux ionique et l'énergie des ions diminuent. L'influence du bombardement ionique des surfaces se fait donc moins ressentir. Les hautes pressions favorisent donc la composante chimique (isotrope) de la gravure et sont utilisées pour des applications où seule la sélectivité compte.

Des études précédentes menées au sein de notre laboratoire ont permis d'établir un procédé de gravure RIE-ICP du diamant à partir d'un plasma oxygène avec une vitesse de gravure de 1,3  $\mu\text{m/h}$  ou à partir d'un mélange gazeux Argon/Oxygène (Ar/O<sub>2</sub>). L'avantage de ce plasma est la combinaison des deux mécanismes de gravure chimique liés à l'oxygène et

de gravure physique due aux ions argon. Ce qui permet d'obtenir une plus grande vitesse de gravure de 8  $\mu\text{m/h}$ . La figure IV.12 présente le principe d'une gravure RIE du diamant par plasma Ar/O<sub>2</sub>.

Par ailleurs, nous avons utilisé un masque aluminium (Al) dans cette étude pour sa potentialité à supporter des gravures profondes du fait de sa bonne résistance aux gaz de gravure.

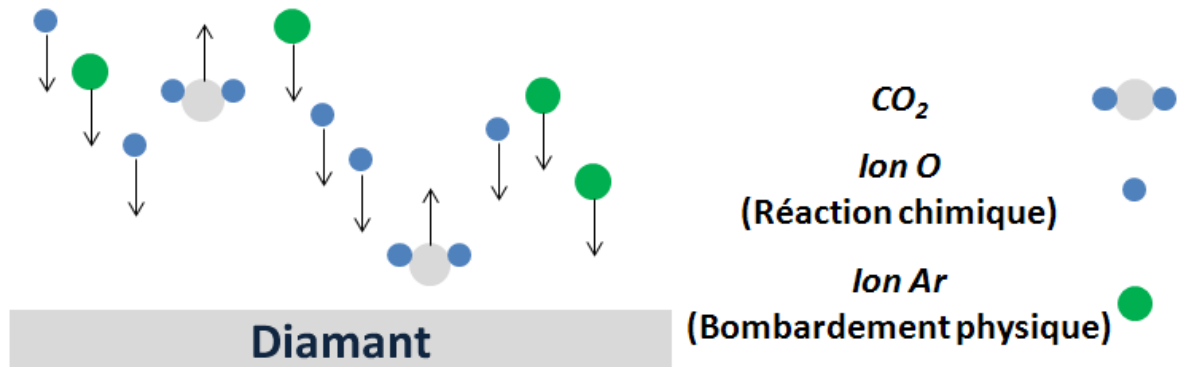
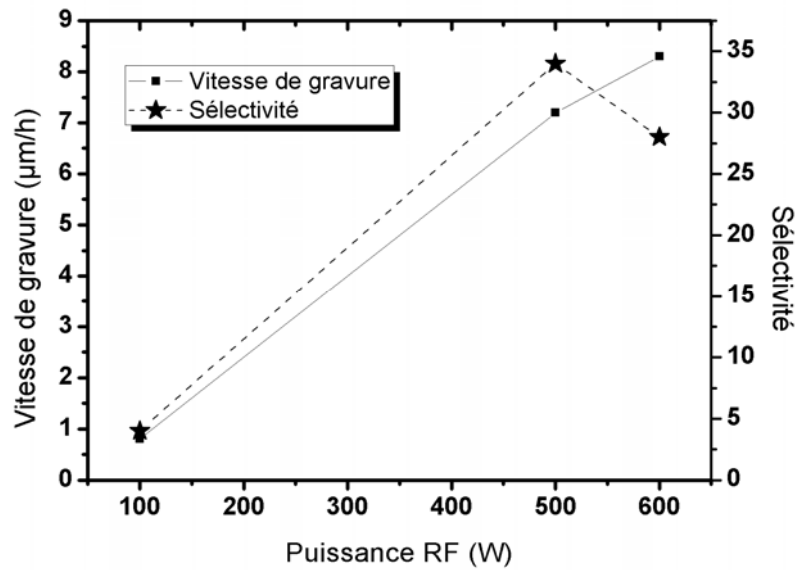


Figure IV.12 : Principe de la gravure RIE Ar/O<sub>2</sub> du diamant

Avant tout procès, les échantillons subissent un premier nettoyage chimique comprenant un bain successif de Trichloréthylène, d'Acétone et d'eau. Ce nettoyage a pour but d'éliminer les traces de graisses, d'huiles, de particules et de composés organiques sources de contamination des procédés microélectroniques. Ensuite un deuxième nettoyage chimique, plus agressif, vise à éliminer d'éventuelles particules métalliques incrustées dans les échantillons à la suite du polissage mécanique. Ce bain chimique est constitué d'un mélange HF/HNO<sub>3</sub> (1:1).

Le masque aluminium (Al) est ensuite reporté par photolithographie (technique de lift-off).

Une première série d'expérimentations préliminaire sur l'étude de la gravure du diamant par plasma Ar/O<sub>2</sub> a permis l'analyse de l'influence du rapport des gaz (O<sub>2</sub>/Ar), de la puissance du plasma (PRF) et de la polarisation du substrat ( $P_{\text{bias}}$ ). La pression du gaz a été fixée à 5 mTorr. La figure IV.13 présente les résultats de la vitesse de gravure et de la sélectivité du procédé en fonction de la puissance RF.



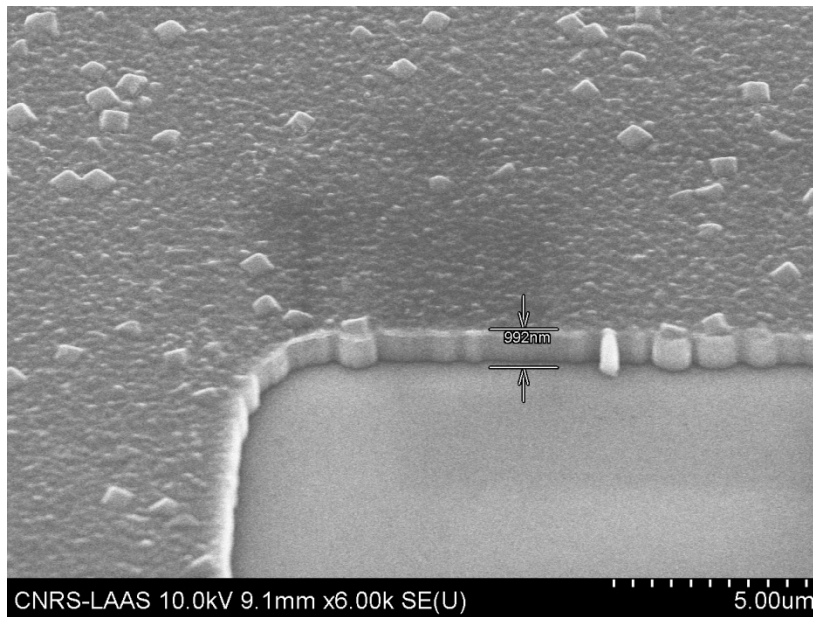
**Figure IV.13 : Vitesse de gravure du diamant et la sélectivité diamant/aluminium en fonction de la puissance du plasma  $P_{RF}$**

Cette série d'expériences nous a permis de retenir les conditions suivantes:

- Débit  $O_2$ : 40 sccm
- Débit Ar : 8 sccm
- Pression du gaz: 5 mTorr
- Polarisation ( $P_{bias}$ ): 100 W
- Puissance plasma ( $P_{RF}$ ): 500 W

Ici, sccm (standard cubic centimeter per minute) est l'unité de débit. Dans ces conditions le plasma Ar/ $O_2$  grave le diamant à une vitesse de gravure proche de  $8 \mu\text{m/h}$  avec une sélectivité supérieure à 25. Ainsi un masque Aluminium de  $0.2 \mu\text{m}$  suffit pour graver nos couches de 1 à  $3 \mu\text{m}$  de diamant.

Cependant les observations MEB des zones gravées révèlent la présence de micro-colonnes (figure IV.14). La formation des micro-colonnes résulte du redépôt de particules métalliques issues de la pulvérisation du masque au cours de la gravure. Ces particules métalliques constituent alors des masques secondaires conduisant à terme à l'apparition de colonnes[27].

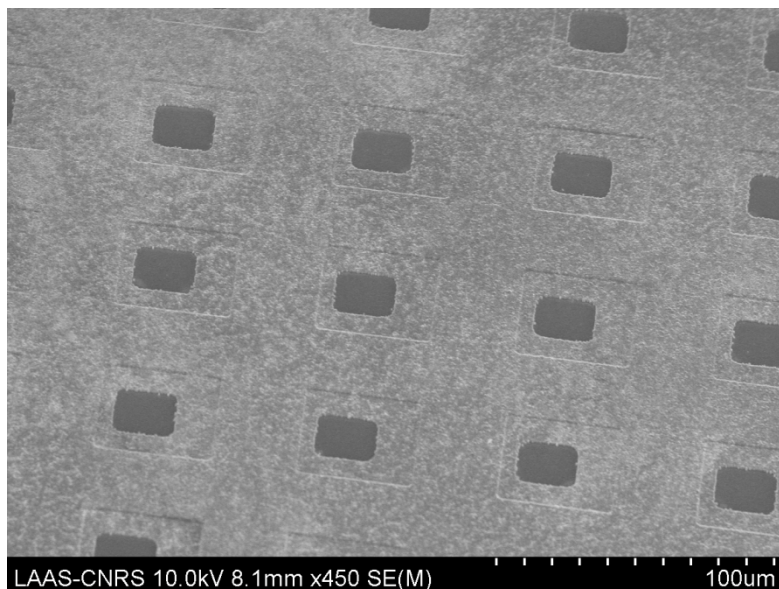


**Figure IV.14 : Imagerie MEB du fond de gravure**

Nous avons alors préféré un masque en Ti/Au (50nm/200nm) qui évite la pulvérisation pendant la gravure.

Ainsi avec une telle gravure il ne faudra que quelques minutes pour graver notre dépôt de diamant et ouvrir les contacts.

La figure IV.15 illustre la qualité de nos résultats obtenus ici sur une structure d'IGBT.



**Figure IV.15 : Photographie MEB de l'échantillon après ouverture des contacts d'émetteur d'un IGBT**

### IV.2.1.3 Métallisation

Les contacts sont ensuite réalisés de façon classique conformément au procédé de la filière silicium. Une puce terminée est présentée figure IV.16.

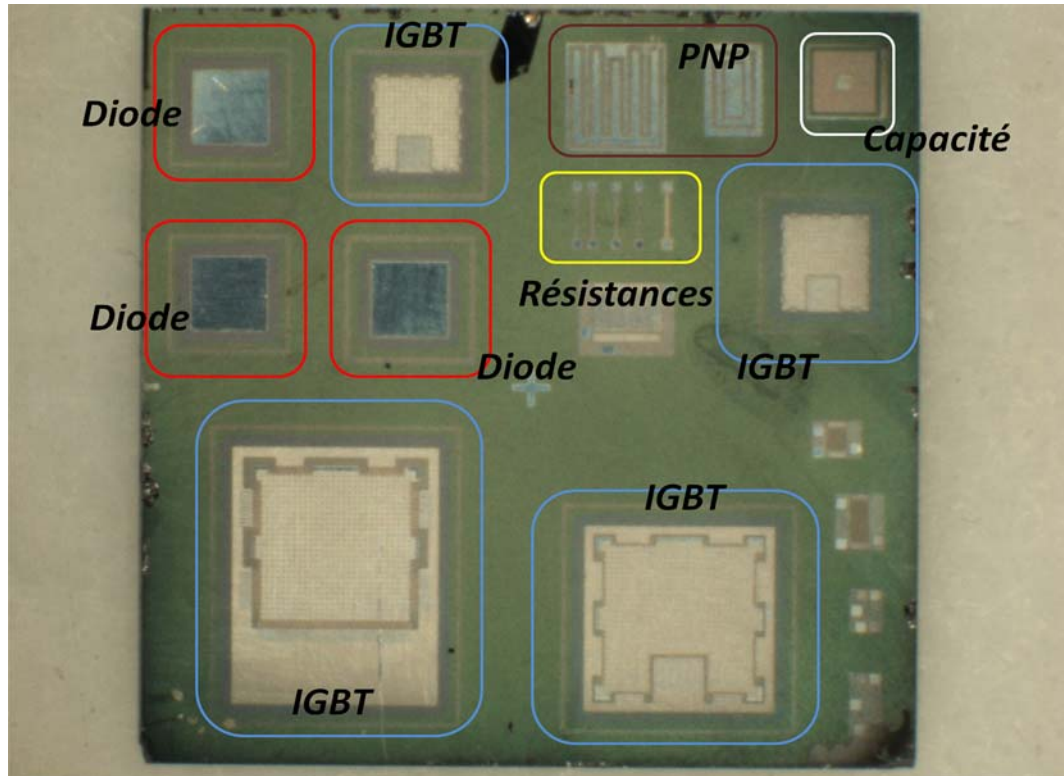
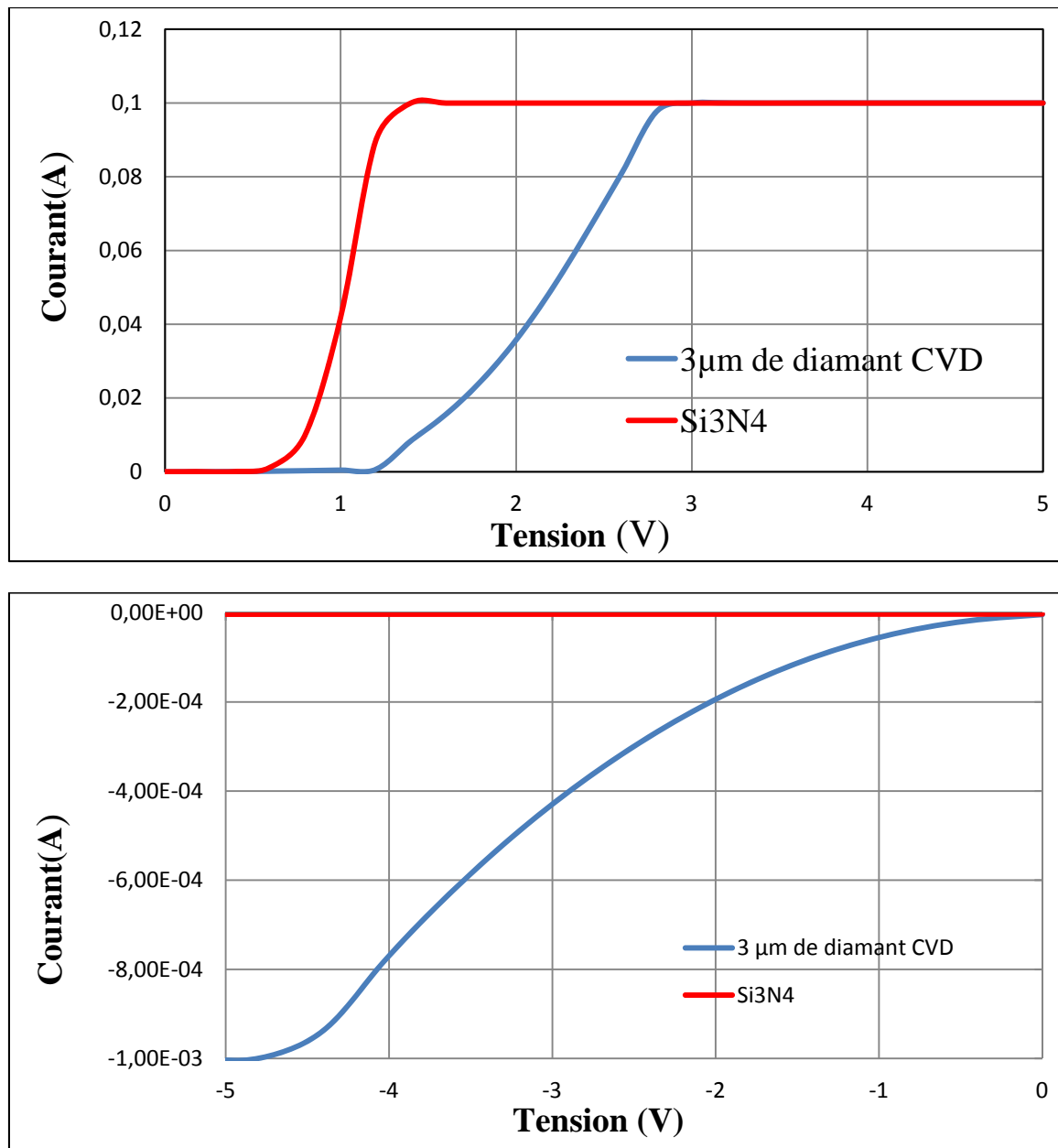


Figure IV.16 : Photo puce terminée avec différents composants Diodes, Résistances, ...

## IV.2.2 Caractérisation électrique des composants passivés

Nous avons comparé ensuite les caractéristiques électriques de composants passivés par du  $\text{Si}_3\text{N}_4$  et composants passivés par du diamant. Avant de travailler sur les MOSFET et l'IGBT qui sont des composants plus difficiles à réaliser nous avons caractérisé des diodes et des résistances. Le premier échantillon est passivé avec du  $\text{Si}_3\text{N}_4$  et  $\text{SiO}_2$ , l'autre échantillon est passivé par  $3\mu\text{m}$  de diamant CVD.

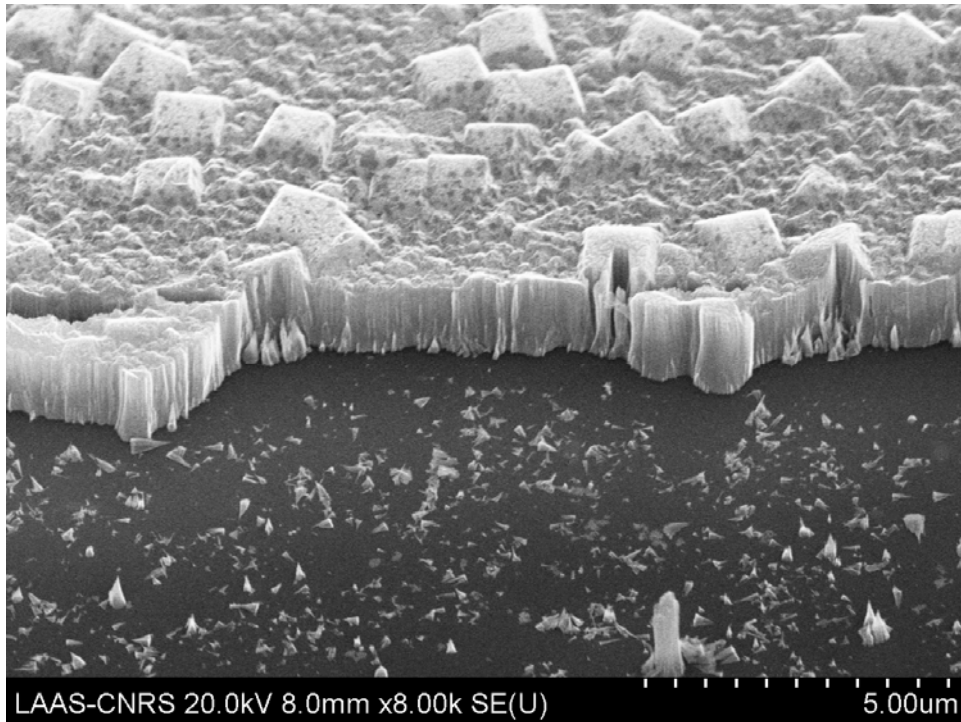
Les mesures  $I(V)$  ont été réalisées à l'aide d'une station sous pointes KARL SUSS PA200 associé à une alimentation DC de type Agilent HP4142B moyenne puissance. La température de mesure est  $20^\circ\text{C}$ .



**Figure IV.17 : Caractéristiques I(V) des deux types de passivation**

Pour cette deuxième série de diodes, le métal utilisé pour la fabrication du contact est l'Aluminium. Ces contacts ont montré une bonne cohésion, permettant des caractérisations sous pointes plus aisées. La figure IV.17 présente la caractéristique de la diode en passivation Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ayant donné les meilleurs résultats. La tension de seuil est classiquement de 0,6V. Mais on voit très nettement une dégradation de cette tension de seuil avec une passivation diamant CVD. A ce stade la seule explication que nous pouvons avancer est une détérioration du contact supérieur par un manque de gravure. En effet on constate que le fond de la gravure

n'est pas parfaitement nettoyé (figure IV.18) ce qui pourrait laisser une fine couche isolante entre la couche N et la métallisation et créer ainsi un seuil supplémentaire.



**Figure IV.18 : Photo fond de gravure montrant des résidus de diamant**

Mais, l'augmentation du courant inverse après le dépôt du diamant, paraît bien plus inquiétante. Cela met en évidence une conduction latérale au sein de la couche de passivation ou à l'interface. C'est un point que nous pouvons vérifier en mesurant les différentes résistances sur l'échantillon.

	R1	R2	R3	R4	R5
SiO <sub>2</sub> +Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	10kΩ	4.8kΩ	131Ω	163Ω	217Ω
Diamant CVD	650Ω	530Ω	111.7Ω	181Ω	207Ω

**Tableau IV.2 : Résistances tests mesurées sur les différents échantillons avec une passivation standard ou avec du diamant**

Tableau IV.2 montre clairement une diminution de la valeur de la résistance après dépôt d'une couche de diamant CVD (sauf pour R4). Notre dépôt modifie considérablement les propriétés de l'interface et provoque une conduction parasite inacceptable pour nos

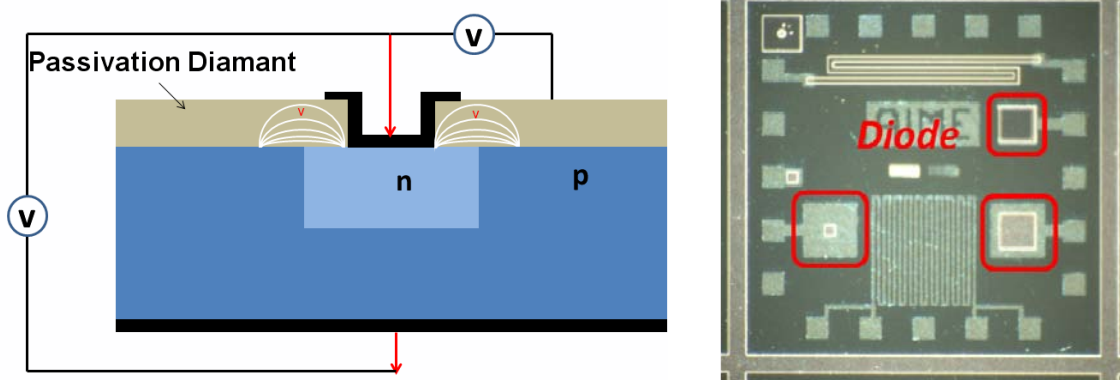
composants de puissance. Nous avons alors repris des essais spécifiques pour analyser plus précisément l'origine de ce défaut.

### IV.2.3 Méthode de caractérisation de la couche de passivation

Comme nous avons pu le voir, le dépôt d'une couche de diamant perturbe fortement le fonctionnement des composants ainsi recouverts. Il nous faut donc optimiser les conditions de dépôts afin de maîtriser les propriétés de la couche de diamant et surtout les propriétés de l'interface entre le silicium et le diamant. Pour pouvoir évaluer l'efficacité de la passivation nous avons développé un dispositif de test qui permette de venir sonder cette interface sur toute la surface du dépôt.

Pour cela nous avons implanté des diodes de faibles dimensions à la surface d'une plaquette de silicium (voir figure IV.19). Le champ présent à la jonction est vu par cette interface, ce qui nous permet de sonder notre dépôt à différents endroits de la plaquette. Ainsi en mesurant le courant inverse de ces diodes nous pouvons savoir s'il existe une conduction latérale à l'interface silicium diamant. Ce procédé nous permettra optimiser les conditions de dépôt.

La figure IV.19 illustre le principe de test de l'interface silicium/diamant par le champ électrique en surface d'une jonction PN.



**Figure IV.19 : Principe et réalisation de test de l'interface silicium/diamant par un champ électrique en surface d'une jonction PN**

Ces essais sont en cours et ne peuvent être intégrés à ce manuscrit.

## IV.3 Conclusion

Ce chapitre plus prospectif nous a permis de présenter nos travaux sur la passivation des composants de puissance par une fine couche de diamant CVD. Il apparait que si ce diamant était utilisé comme diélectrique passivant dans des structures de composants en tranchées il pourrait apporter énormément sur l'homogénéisation de la température et constituer un puits thermique au sein de la structure.

Le développement d'une nouvelle technologie de passivation est un travail parfois laborieux que nous n'avons malheureusement pas eu le temps de terminer au cours de ces travaux. Les techniques de dépôt uniques développées au CEA permettent de garantir un dépôt conforme de diamant même dans des tranchées à grand facteur de forme. Nous avons pu ainsi recouvrir des tranchées de 5 $\mu$ m de large sur 120  $\mu$ m de profond ce qui constitue un des résultats marquant de nos travaux.

Cependant nous avons mis en évidence une conductivité électronique parasite qui nuit à la tenue en tension inverse des composants. Nous avons proposé une solution pour évaluer la qualité des dépôts par de petites diodes réparties sur tous le substrat. Ce procédé devrait nous permettre d'évaluer l'influence des paramètres de dépôt des couches de diamant CVD et ainsi améliorer cette brique technologique.

## IV.4 Bibliographie

1. Kahng, D., *A historical perspective on the development of MOS transistors and related devices*. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1976. **23**(7): p. 655-657.
2. Harper, C.A., *Passive Electronic Component Handbook*1997: McGraw-Hill.
3. Hasegawa, H. and M. Akazawa, *Surface passivation technology for III-V semiconductor nanoelectronics*. Applied Surface Science, 2008. **255**(3): p. 628-632.
4. Tahir, H., *Conception et réalisation de structures IGBTs bidirectionnelles en courant et en tension*, 2011, L'Université Paul Sabatier.
5. Zelmat, S., *Etude des propriétés électriques d'un matériau polyimide à haute température*2006.
6. Biserica, O., et al., *Study of AlN/SiO<sub>2</sub> as dielectric layer for SiC MOS structures*. 2000 International Semiconductor Conference, Vols 1 and 2, Cas 2000 Proceedings, 2000: p. 205-208.
7. Chang, E.Y., G.T. Cibuzar, and K.P. Pande, *Passivation of GaAs FET's with PECVD silicon nitride films of different stress states*. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1988. **35**(9): p. 1412-1418.
8. Chevallier, J., et al., *Hydrogen-boron interactions in p-type diamond*. Physical Review B, 1998. **58**(12): p. 7966-7969.
9. Korec, J. and R. Held, *Comparison of DMOS/IGBT-compatible high-voltage termination structures and passivation techniques*. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1993. **40**(10): p. 1845-1854.
10. Schmid, U. and G. Krotz. *Investigation on different passivation technologies for thin film sensors on ceramic substrates*. in *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*. 2002.
11. Xinke, L., et al. *Diamond-like carbon (DLC) liner with highly compressive stress formed on AlGaIn/GaN MOS-HEMTs with in situ silane surface passivation for performance enhancement*. in *Electron Devices Meeting (IEDM), 2010 IEEE International*. 2010.
12. Nebel, C.E.R., J., *Thin-Film Diamond II*2004: Elsevier.
13. Cailin, W., S. Cheng, and H. Junya. *A new trench-planner gate MOSFET structure*. in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International*. 2009.
14. Nakamura, K., et al. *Advantages of thick CVD gate oxide for trench MOS gate structures*. in *Power Semiconductor Devices and ICs, 2000. Proceedings. The 12th International Symposium on*. 2000.
15. Zhongfei, S., et al. *Process optimization for a high gate trench MOS to minimize threshold voltage variation*. in *Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 International Conference on*. 2010.
16. THEOLIER, L., *Conception de transistors MOS haute tension (1200 Volts) pour l'électronique de puissance*, 2008.

17. S. Morand, F.M., P. Austin, P. Poirot, R. Gaillard, T. Carrière, N. Buard, *Study of the thermal impact on power electronic radiation sensitivity*, in *NSREC 2011 SUMMARY*2011.
18. Shoji, T.O., T. ; Fujikawa, T. ; Nose, N. ; Ishiko, M. ; Hamada, K. , *Cosmic Ray Ruggedness of IGBTs for Hybrid Vehicles*, in *Proceedings of The 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*2010: Hiroshima. p. 129 - 132
19. Nishida, S.O., T. ; Fujikawa, T. ; Nose, N. ; Ishiko, M. ; Hamada, K. , *Neutron Induced Single-Event Burnout of IGBT*, in *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*2010. p. 142 - 148.
20. LUU, A., *Méthodologie de prédiction des effets destructifs dus à l'environnement radiatif naturel sur les MOSFETs et IGBTs de puissance*, 2009, l'Université Toulouse III – Paul Sabatier.
21. Scorsone, E., et al., *Enhanced control of diamond nanoparticle seeding using a polymer matrix*. *Journal of Applied Physics*, 2009. **106**(1).
22. Barrat, S., et al., *Synthesis of highly oriented CVD diamond films by ultra short bias enhanced nucleation step*. *Diamond and Related Materials*, 2001. **10**(9-10): p. 1637-1642.
23. Mazellier, J.P., et al., *First demonstration of heat dissipation improvement in CMOS technology using Silicon-On-Diamond (SOD) substrates*. 2009 Ieee International Soi Conference, 2009: p. 141-142.
24. Barrat, S., et al., *Image analysis to characterize CVD diamond deposits*. *Revue De Metallurgie-Cahiers D Informations Techniques*, 2000. **97**(2): p. 277-282.
25. Girard, H.A., et al., *Hydrogenation of nanodiamonds using MPCVD: A new route toward organic functionalization*. *Diamond and Related Materials*, 2010. **19**(7-9): p. 1117-1123.
26. Girard, H.A., et al., *Electrostatic grafting of diamond nanoparticles: a versatile route to nanocrystalline diamond thin films*. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2009. **1**(12): p. 2738-46.
27. Kone, S., et al., *CVD diamond Schottky barrier diode, carrying out and characterization*. *Diamond and Related Materials*, 2010. **19**(7-9): p. 792-795.
28. Schneider, H., et al., *Study of CVD diamond films for thermal management in power electronics*. 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Vols 1-10, 2007: p. 2896-2903.
29. NGUYEN, V.H., *Etude et caractérisation d'une nouvelle connectique adaptée à l'intégration tridimensionnelle pour l'électronique de puissance*, 2010, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier.
30. Frédéric MORANCHO, D.P., *Composants sur SiC et GaN Intérêt, performances, études et perspectives à moyen terme*, in *Micro-électronique de puissance: pour une voiture plus électrique*Mars 2008: TOULOUSE FRANCE.



# **Conclusion générale**



L'objectif principal du travail de thèse exposé dans ce mémoire est d'explorer les différentes techniques qui permettraient de tirer avantage des propriétés exceptionnelles du diamant CVD dans la gestion thermique des composants électroniques.

La première étape a consisté à confirmer la conductivité exceptionnelle du diamant CVD à partir d'échantillons émanant de différents fournisseurs. Par la même occasion, nous avons aussi vérifié la faible dispersion de cette caractéristique.

Nous avons mis en place une démarche de conception aidée par de la simulation thermique 3D. Une majorité de paramètres thermiques des matériaux sont connus et nous les avons utilisés dans nos modèles 3D. Cependant, le coefficient d'échange convectif pour différentes techniques de refroidissement envisagées est difficilement déterminable. Nous avons alors dû réaliser des structures constituées d'assemblages spécifiques afin d'extraire ce coefficient. Pour cela, nous avons procédé par comparaison entre les températures données par les modèles et celles par la caméra infrarouge. Nous avons ainsi pu, par ajustements successifs, déduire le coefficient de convection pour chaque cas visé. Ceci est bien évidemment valable pour une plage de température et un débit du fluide donnés.

Une fois les modèles thermiques 3D calibrés, nous avons pu envisager de simuler l'apport du remplacement de certaines couches classiquement utilisées dans les assemblages d'électronique de puissance par un substrat de diamant CVD. Nous avons vite constaté que le diamant ne peut impacter la capacité de refroidissement si l'échange convectif final n'est pas de bonne qualité. En effet, si l'on raisonne en termes de résistances thermiques, l'intérêt du diamant se manifeste uniquement si la résistance thermique de convection n'est pas beaucoup plus grande que celle de la conduction à travers les différentes couches de l'assemblage. Nous avons alors opté pour des solutions de refroidissement avancées comme l'utilisation de la boîte-à-eau avec ou sans micropoteaux. A l'aide de la simulation nous avons montré l'intérêt du diamant pour certains cas caractérisés par des rapports de dimensions géométriques.

L'intérêt de l'utilisation du diamant CVD dans certains cas pour la gestion thermique ayant été démontré, nous avons alors mis en place toute une démarche de réalisation technologique. La meilleure solution étant celle qui intègre des micropoteaux, nous devons relever certains défis de réalisation technologique. D'une part, compte tenu des dimensions de micropoteaux il était délicat d'assurer la précision de la croissance du cuivre, le choix de la résine a été déterminant. D'autre part, le choix de la couche d'accroche devait assurer une bonne tenue mécanique à la structure. Cette propriété a été vérifiée dans un autre laboratoire.

La structure de refroidissement à micropoteaux ayant été réalisée, nous avons procédé à des mesures d'efficacité de refroidissement en mesurant la température maximum atteinte au niveau de la puce pour différentes valeurs de dissipations de puissance. Ces mesures ont été comparées aux résultats de simulations 3D utilisant des modèles préalablement calibrés. Ces mesures et simulations ont concerné d'abord une puce résistive en silicium, puis nous avons monté des diodes SiC sur trois structures différentes dont deux comportant du diamant CVD. Une étude comparative de ces trois solutions par l'intermédiaire des mesures et des simulations a été menée.

La dernière partie du travail a été menée sur un autre front. Toujours dans l'objectif de tirer le maximum des propriétés exceptionnelles du diamant, Nous avons pensé rapprocher encore plus ce matériau de la zone de dissipation de puissance. Comme toute puce semi-conductrice est recouverte d'une couche de passivation, nous avons pensé utiliser le diamant pour cette fonction en lieu et place des matériaux classiques ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ , Polyimide...)

Nous avons montré que la réalisation de tranchées comblées avec une croissance de diamant pourraient augmenter le gain apporté par ce matériau. Ceci a été montré à l'aide de simulations thermiques transitoires qui mettent en évidence la mise à profit de la forte diffusivité thermique du diamant qui atténue drastiquement les échauffements impulsionsnels de courtes durées.

Pour les aspects de réalisations technologiques de la croissance du diamant CVD, nous avons eu recours à une technique de croissance du diamant développée au CEA. A cette occasion, nous avons montré que la croissance du diamant dans les tranchées était conforme.

Malheureusement, nous n'avons pu exploiter les puces passivées avec du diamant déposé car à l'interface une couche conductrice parasite s'est développée. Mais pour essayer de palier à cette conduction parasite, nous avons élaboré un nouveau procédé de dépôt en collaboration avec le CEA qui consiste à rajouter une couche tampon. Ces travaux sont actuellement en cours.

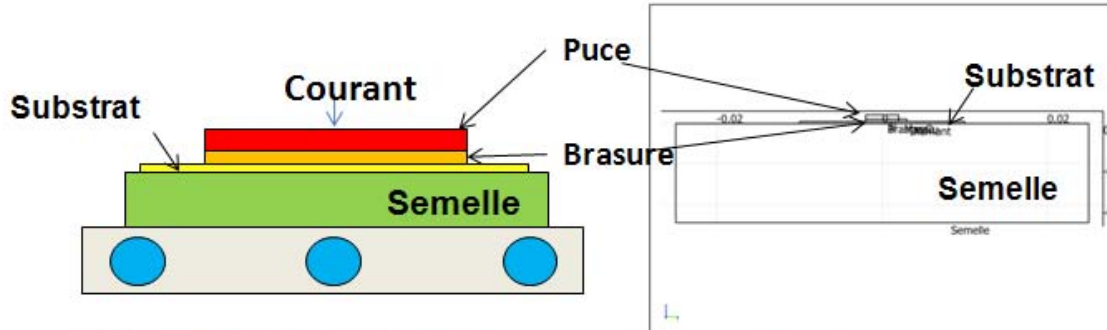
Nous pensons que ce travail exploratoire peut servir à d'autres travaux qui visent l'exploitation du diamant dans les systèmes électroniques.



# **Annexes**

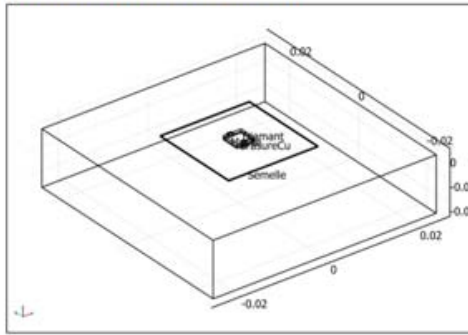
# Annexe1

## Modèle de la structure classique à simuler

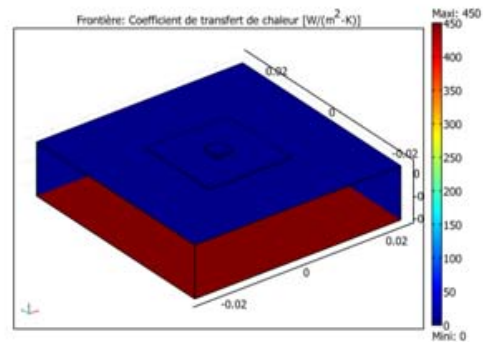


**Schéma de principe: refroidissement par plaque à eau – avec semelle**

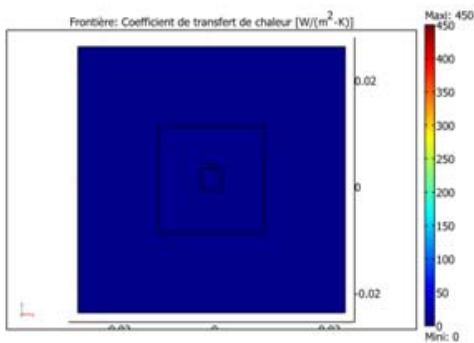
**Vue de coté du modèle**



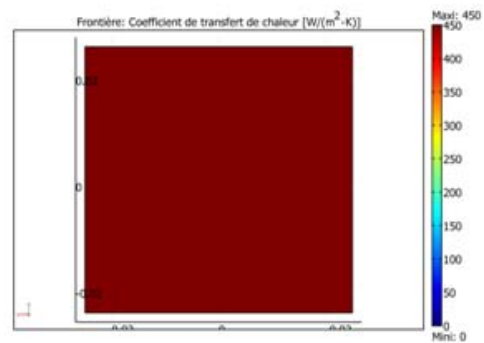
**Vue en perspective du modèle**



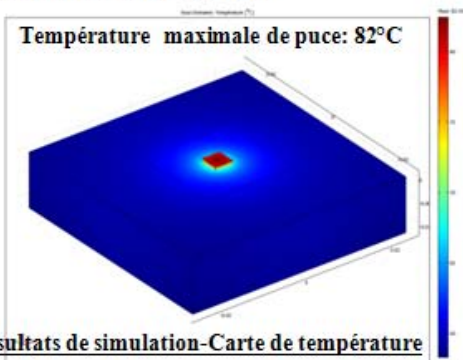
**Coefficient  $h$  aux limite**



**Coefficient  $h$  Face avant**



**Coefficient  $h$  Face arrière**



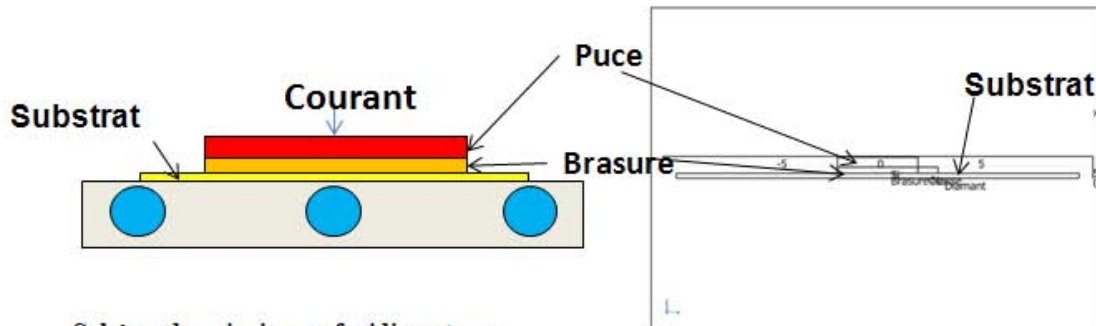
**Résultats de simulation-Carte de température**

### Paramètres de la simulation

- Température initiale : 20 °C
- Température ambiante: 20 °C
- Densité de puissance dissipation: 100w/cm<sup>2</sup>

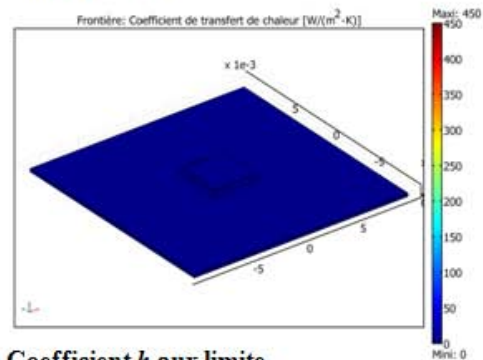
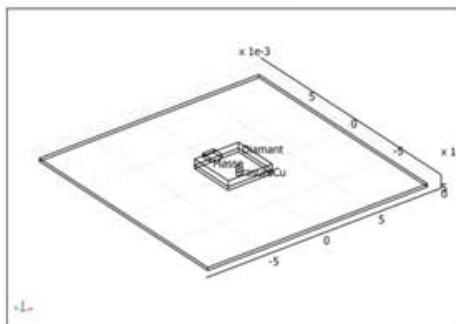
## Annexe2

### Modèle de la structure sans semelle à simuler



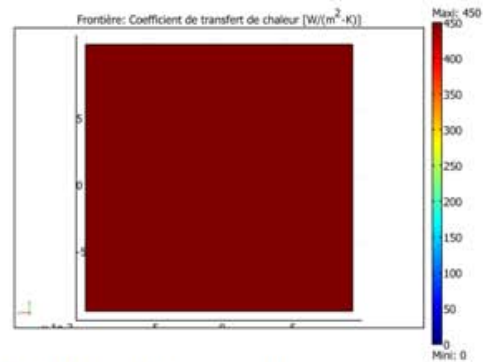
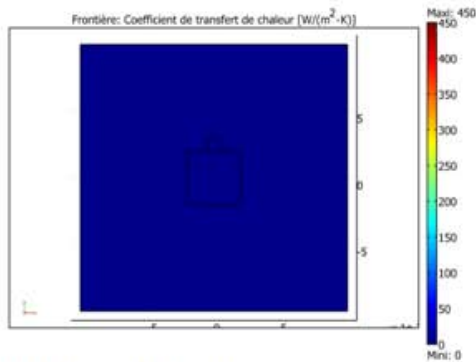
**Schéma de principe: refroidissement par plaque à eau – sans semelle**

**Vue de coté du modèle**



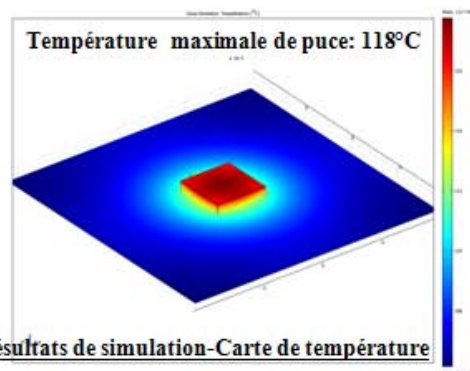
**Vue en perspective du modèle**

**Coefficient  $h$  aux limites**



**Coefficient  $h$  Face avant**

**Coefficient  $h$  Face arrière**



**Résultats de simulation-Carte de température**

#### Paramètres de la simulation

- Température initiale : 20 °C
- Température ambiante: 20 °C
- Densité de puissance dissipation: 100w/cm<sup>2</sup>

## Annexe3

### Modèle de la structure optimisée à simuler

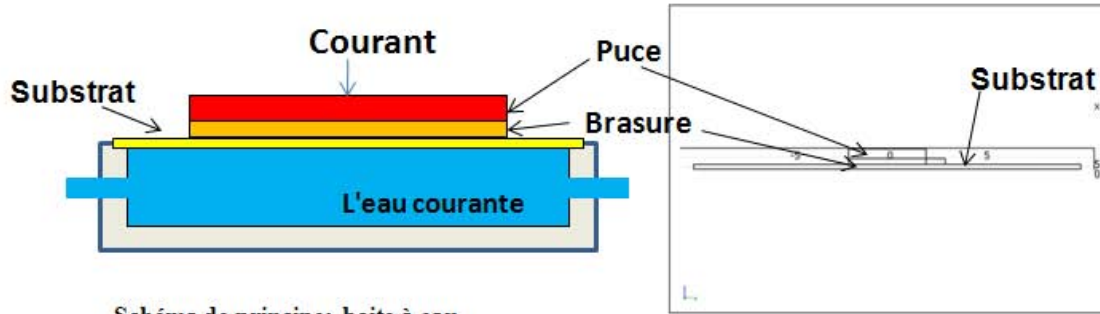
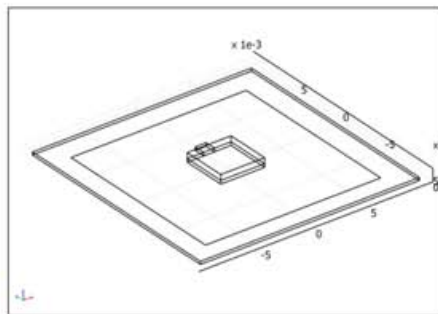
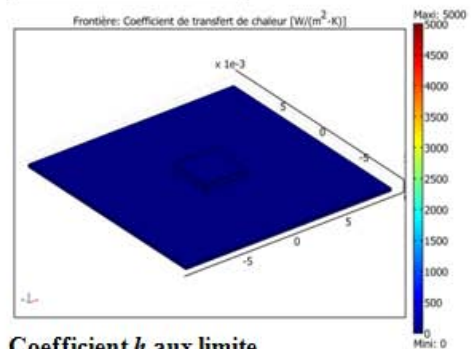


Schéma de principe: boîte à eau

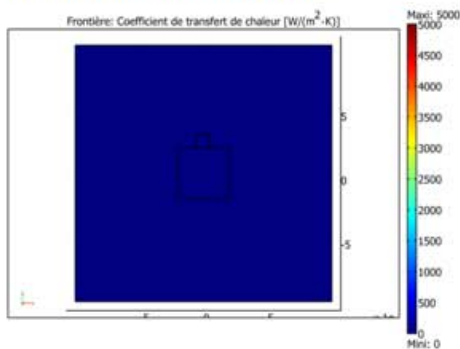
Vue de côté du modèle



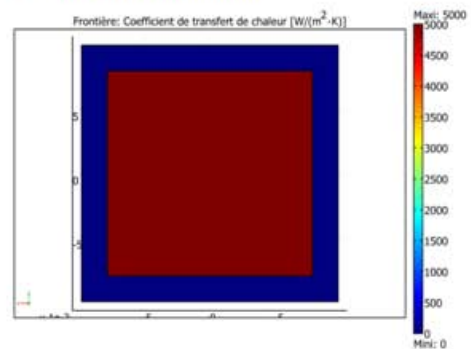
Vue en perspective du modèle



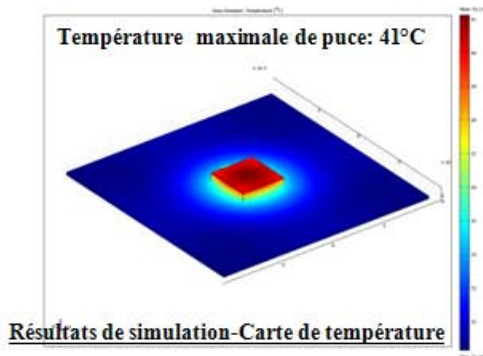
Coefficient  $h$  aux limite



Coefficient  $h$  Face avant



Coefficient  $h$  Face arrière



Résultats de simulation-Carte de température

#### Paramètres de la simulation

- Température initiale : 20 °C
- Température ambiante: 20 °C
- Température d'eau: 20 °C
- débit de circulation :1500 cm<sup>3</sup>/min
- Densité de puissance dissipation: 100w/cm<sup>2</sup>

# Publication Revues

1. Z, Zhang., H. Schneider, and P. Tounsi, *A promising solution using CVD diamond for efficient cooling of power devices*. Materials Science and Engineering: B, 2011.
2. CIVRAC Gabriel ; ZHANG Zhongda ; HUI Ding ; SCHNEIDER Henri ; LOCATELLI Marie-Laure; ISOIRD Karine ; TOUNSI Patrick, *The Use of Diamond for Power Electronics. Development of Associated Technologies*, in l'Electricité, de l'Electronique et des Technologies de l'Information et de la Communication (SEE),2009.



# Résumé

L'augmentation de la densité de puissance des convertisseurs d'énergie électrique nécessite une gestion thermique toujours plus performante. La thermique devient même l'élément dimensionnant de ces convertisseurs et est au centre des préoccupations des concepteurs.

Le diamant présente des propriétés physico-chimiques exceptionnelles particulièrement adaptées à la gestion thermique des composants semi-conducteurs de l'électronique de puissance. C'est en effet le meilleur matériau isolant et conducteur thermique connu à ce jour. La possibilité de réaliser du diamant polycristallin de manière reproductible par synthèse CVD ouvre aujourd'hui à ce matériau un grand champ d'applications industrielles. Nous avons étudié les potentialités d'applications au domaine particulier de l'électronique de puissance. Nous avons tout d'abord développé une plateforme de simulation COMSOL qui nous permette d'évaluer différentes structures pour optimiser le système de refroidissement des composants d'électronique de puissance. Nous avons alors étudié deux solutions, l'utilisation d'un substrat diamant épais pour reporter les composants ou le dépôt direct d'une fine couche de passivation sur les composants en fin de fabrication. Nous avons ainsi développé une structure à substrat diamant et micropoteaux en cuivre qui permet d'extraire jusqu'à  $800 \text{ W/cm}^2$  sous le composant pour un échauffement de  $120^\circ\text{C}$ . Cette structure a été réalisée technologiquement pour valider toute la démarche de simulation et conception. Ce prototype propose des performances particulièrement intéressantes pour l'intégration des convertisseurs d'électronique de puissance à haute densité de puissance.

Nous avons également étudié la passivation des composants avec du diamant CVD en lieu et place du  $\text{SiO}_2$ . L'intérêt d'une telle passivation est démontré en simulation et les différentes étapes de la réalisation technologique sont étudiées. Cette dernière partie met en évidence des difficultés qu'il faudra lever si l'on souhaite utiliser le diamant comme couche de passivation.