



**HAL**  
open science

# Contribution à la conception et mise en oeuvre de structures de packaging pour la montée en tension des modules de puissance : contraintes sur les isolants

Hélène Hourdequin

► **To cite this version:**

Hélène Hourdequin. Contribution à la conception et mise en oeuvre de structures de packaging pour la montée en tension des modules de puissance : contraintes sur les isolants. Electronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2018. Français. NNT : 2018TOU30357 . tel-02508007

**HAL Id: tel-02508007**

**<https://theses.hal.science/tel-02508007>**

Submitted on 13 Mar 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Hélène HOURDEQUIN**

**le** 15 Mars 2018

**Titre :**

Contribution à la conception et mise en œuvre de structures de packaging pour la montée en tension des modules de puissance : contraintes sur les isolants

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

ED GEET : Génie Electrique

**Unité de recherche :**

Laboratoire PLASma et Conversion de l'Energie (LAPLACE) – UMR 5213

**Directeur/trice(s) de Thèse :**

M. Lionel LAUDEBAT, Maître de conférences à l'Institut National Universitaire Champollion, Directeur  
Mme Marie-Laure LOCATELLI, Chargée de recherche CNRS, LAPLACE, Co-Directeur

**Jury :**

M. Olivier LESAIN, Directeur de recherche CNRS, G2ELAB, Rapporteur  
M. Cyril BUTTAY, Chargé de recherche CNRS, AMPERE, Rapporteur  
M. Fabrice ROSSIGNOL, Directeur de recherche CNRS, SPCTS, Examinateur  
M. Pierre BIDAN, Professeur à l'Université Paul Sabatier, Encadrant  
Mme Marie-Laure LOCATELLI, Chargée de recherche CNRS, LAPLACE, Encadrant  
M. Lionel LAUDEBAT, Maître de conférences à l'Institut National Universitaire Champollion, Encadrant



## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mes directeurs de thèse Lionel LAUDEBAT, Marie-Laure LOCATELLI et Pierre BIDAN pour m'avoir fait confiance, comprise, encouragée et conseillée durant ces trois années.

Je remercie vivement les membres de mon jury. Je souhaite remercier Fabrice ROSSIGNOL de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je souhaite également remercier Olivier LESAIN et Cyril BUTTAY d'avoir accepté d'être rapporteurs de mes travaux de thèse.

Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe MDCE, qui ont également contribué au bon déroulement de la thèse. L'équipe m'a permis de disposer de tous les moyens techniques nécessaires pour le bon déroulement de mes travaux.

Je remercie grandement mes collègues doctorants pour tous ces moments de grande complicité et d'entraide qui me manquent déjà...

Ces remerciements sont également destinés à toutes les personnes du laboratoire avec qui j'ai pu également partager des moments très agréables et qui m'ont apporté une aide précieuse au quotidien.

Enfin, je remercie infiniment ma famille et mes amis, pour m'avoir aidée tout au long de cette aventure.



# SOMMAIRE

|   |               |
|---|---------------|
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>   | <b>- 5 -</b>  |
| <b>CHAPITRE I - partie A : ÉVOLUTION DES MODULES DE PUISSANCE.....</b>  | <b>- 7 -</b>  |
| <b>I.1. Évolution de l'électrification dans différents domaines d'application .....</b>   | <b>- 7 -</b>  |
| <b>I.2. Évolution des composants de puissance.....</b>  | <b>- 9 -</b>  |
| I.2.1. Évolution des semi-conducteurs : composants 'grand gap'.....   | - 9 -         |
| I.2.2. Synthèse des modules SiC disponibles sur le marché .....   | - 11 -        |
| <b>I.3. Packaging des modules de puissance.....</b>   | <b>- 13 -</b> |
| <b>CHAPITRE I - partie B : CONTRAINTES ÉLECTRIQUES LIÉES A LA MONTÉE EN TENSION.....</b>  | <b>- 17 -</b> |
| <b>I.1. Conséquences sur les isolants.....</b>  | <b>- 17 -</b> |
| I.1.1. Phénomènes de rupture dans les isolants solides .....  | - 17 -        |
| I.1.2. Phénomène de décharges partielles .....  | - 18 -        |
| I.1.3. Phénomènes de contournement et de cheminement en surface .....   | - 20 -        |
| <b>I.2. Principal point faible électrique du module : le point triple .....</b>   | <b>- 20 -</b> |
| <b>I.3. Synthèse des pistes envisagées pour l'atténuation du phénomène au point triple ..</b>                                   | <b>- 23 -</b> |
| I.3.1. Modifications des propriétés des matériaux isolants .....  | - 23 -        |
| I.3.2. Modifications géométriques.....  | - 27 -        |
| I.3.3. Conclusion .....   | - 31 -        |
| <b>Synthèse du Chapitre I .....</b>   | <b>- 32 -</b> |
| <b>CHAPITRE II - SIMULATION D'UNE SOLUTION ORIGINALE POUR ATTÉNUER LE RENFORCEMENT DE CHAMP ÉLECTRIQUE AU POINT TRIPLE.....</b> | <b>- 33 -</b> |
| <b>II.1. Contexte .....</b>   | <b>- 33 -</b> |
| <b>II.2. Présentation de l'étude par simulation numérique.....</b>  | <b>- 33 -</b> |
| II.2.1. Principes de l'outil et de la méthode utilisée .....  | - 33 -        |
| II.2.2. Etude par éléments finis du module de puissance .....   | - 36 -        |
| <b>II.3. Étude d'une structure avec mesa pour la réduction du champ au point triple sous 15 kV .....</b>                        | <b>- 43 -</b> |
| II.3.1. Définition de la structure de référence.....  | - 43 -        |
| II.3.2. Proposition d'une solution par structure de type mesa.....  | - 46 -        |
| <b>II.4. Comparaison avec différentes solutions proposées dans la littérature.....</b>  | <b>- 56 -</b> |
| II.4.1. Solution par augmentation de l'épaisseur de la céramique.....   | - 56 -        |

|  |                |
|--|----------------|
| II.4.2. Solution par augmentation de la permittivité du gel.....   | - 57 -         |
| II.4.3. Solution par film semi-résistif .....  | - 59 -         |
| <b>Synthèse du Chapitre II .....</b>   | <b>- 63 -</b>  |
| <b>CHAPITRE III - RÉALISATION DE SUBSTRATS CÉRAMIQUES MÉTALLISÉS EN FORME DE MESA ....</b>                 | <b>- 65 -</b>  |
| <b>III.1. Introduction .....</b>   | <b>- 65 -</b>  |
| <b>III.2. Les substrats céramiques.....</b>  | <b>- 65 -</b>  |
| <b>III.3. La métallisation des substrats céramiques pour l'électronique de puissance .....</b>             | <b>- 67 -</b>  |
| III.3.1. Procédés de métallisation DBC et AMB.....   | - 67 -         |
| III.3.2. Réalisation des pistes et électrodes – Profil de gravure du métal.....                            | - 68 -         |
| <b>III.4. Mise en forme du substrat céramique.....</b>   | <b>- 69 -</b>  |
| III.4.1. Techniques de fabrication massive des céramiques.....   | - 69 -         |
| III.4.2. La fabrication additive .....   | - 71 -         |
| III.4.3. Tableau récapitulatif des techniques de fabrication additive pour la céramique                    | - 76           |
| <b>III.5. Les technologies envisagées pour la réalisation du substrat avec structure en mesa</b>           | <b>- 78</b>    |
| III.5.1. La gravure : fraisage et carottage.....   | - 79 -         |
| III.5.2. Le laser.....   | - 79 -         |
| III.5.3. Les ultrasons .....   | - 81 -         |
| <b>III.6. Synthèse des technologies écartées et de celles retenues.....</b>                                | <b>- 85 -</b>  |
| <b>III.7. Fabrication des prototypes de la structure MESA en AlN .....</b>                                 | <b>- 86 -</b>  |
| III.7.1. Dimensionnement des électrodes .....  | - 86 -         |
| III.7.2. Préparation des échantillons.....   | - 87 -         |
| III.7.3. Usinage par ultrasons .....   | - 88 -         |
| III.7.4. Analyse des échantillons usinés.....  | - 91 -         |
| <b>Synthèse du Chapitre III .....</b>  | <b>- 96 -</b>  |
| <b>CHAPITRE IV - PROTOTYPES ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX.....</b>   | <b>- 97 -</b>  |
| <b>IV.1. Introduction .....</b>  | <b>- 97 -</b>  |
| <b>IV.2. Preuve de concept par voie PCB .....</b>  | <b>- 97 -</b>  |
| IV.2.1. Mise en œuvre des échantillons avec et sans mesa .....   | - 97 -         |
| IV.2.2. Tests électriques des échantillons réalisés par la technologie PCB .....                           | - 100 -        |
| <b>IV.3. Tests électriques des échantillons céramiques réalisés par gravure ultrasonique</b>               | <b>- 104 -</b> |
| IV.3.1. Seuil d'apparition des décharges partielles des échantillons usinés par technologie ultrasons..... | - 105 -        |

|  |                |
|--|----------------|
| IV.3.2. Rupture diélectrique des échantillons usinés par technologie ultrasons ..... | - 111 -        |
| <b>Synthèse du Chapitre IV .....</b>   | <b>- 119 -</b> |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>   | <b>- 121 -</b> |
| <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>  | <b>- 123 -</b> |
| <b>ANNEXE 1.....</b>   | <b>- 131 -</b> |
| <b>ANNEXE 2.....</b>   | <b>- 143 -</b> |





## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'électronique de puissance est à l'aube d'une importante évolution grâce à l'introduction dans les systèmes de nouveaux composants de puissance à semi-conducteur « grand gap ». En effet, l'évolution de la filière technologique à base de carbure de silicium (SiC) permet le développement de puces capables de fonctionner à plus haute fréquence de commutation et de supporter des tensions supérieures aux tensions actuelles, restreintes depuis quelques années par les propriétés physiques du silicium. L'introduction de ces composants impose par conséquent d'adapter leur environnement pour prendre en compte ces nouvelles performances. D'un point de vue électrique, les contraintes imposées aux matériaux isolants deviennent proches de leurs limites admissibles, notamment dans les configurations de packaging des modules de puissance actuellement utilisées.

L'objectif de cette thèse est de proposer une solution originale permettant d'intégrer les composants de tenue en tension 15 kV, actuellement en phase de développement, dans une structure telle que le module de puissance. Après avoir analysé différentes solutions de packaging, l'étude s'est notamment focalisée sur une zone particulière, appelée zone de point triple située à l'intersection entre le substrat isolant, la métallisation et l'encapsulation. Nous proposons, à partir de simulations par la méthode des éléments finis, une nouvelle géométrie du substrat céramique métallisé capable de réduire l'intensité du champ électrique au point triple.

Ce manuscrit s'organise ainsi en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons la tendance générale à l'électrification dans de nombreuses applications industrielles et qui a conduit à une évolution des composants de puissance pour répondre aux nouveaux besoins. Nous présenterons les contraintes électriques liées à la montée en tension permise par cette génération de composants. Nous détaillerons les différentes approches qui ont été proposées ces dernières années pour atténuer ce renforcement de champ électrique.
- Le second chapitre sera consacré à la simulation numérique par éléments finis permettant l'analyse du champ électrique dans le module de puissance. Nous proposerons une nouvelle structure géométrique comme solution pour l'abaissement de la contrainte électrique.
- Le troisième chapitre présentera toutes les techniques envisagées pour la réalisation des échantillons en céramique. La méthode de gravure par ultrason sera la technique choisie afin de permettre de répondre aux exigences sur la forme géométrique voulue.

- Le dernier chapitre présentera les caractérisations électriques des échantillons à travers des mesures de seuil d'apparition de décharges partielles et de rigidité diélectrique. Par ces résultats, nous analyserons le réel potentiel de la nouvelle géométrie de substrat céramique métallisé.

Enfin, nous présenterons nos conclusions sur les résultats obtenus et les perspectives ouvertes par ces travaux.

## **CHAPITRE I - partie A : ÉVOLUTION DES MODULES DE PUISSANCE**

L'électronique de puissance est au cœur de nombreuses applications, partout où il est nécessaire de modifier la forme de l'énergie électrique. Grâce à ces évolutions, de nouvelles applications voient le jour et d'autres sont en pleine mutation. Actuellement les modules de puissance offerts sur le marché par les fabricants couvrent une plage de tension inférieure à une dizaine de kilovolts. Comme nous l'aborderons dans ce chapitre, les besoins en packaging vont évoluer dans les années à venir, du fait de l'avènement sur le marché de puces à semi-conducteur à large bande d'énergie interdite (à grand gap). La multiplication des domaines d'applications de ces dernières années (HVDC, énergies renouvelables, véhicules électriques, etc.) impose à l'industrie de l'électronique de puissance des systèmes toujours plus intégrés et / ou plus puissants, utilisables dans des environnements parfois sévères (température, pression, etc.). La performance des modules de puissance est un véritable enjeu économique et cela passe par le développement de packagings fiables et robustes, permettant d'exploiter tous les atouts de cette nouvelle génération de composants, en haute fréquence, haute tension et haute température. Nous détaillerons l'un des points faibles électriques majeur des modules de puissance actuels, à savoir le renforcement de champ électrique, qui est une des origines de leurs limitations. Ce phénomène de renforcement de champ est amplifié par l'arrivée des semi-conducteurs à grand gap capables de fonctionner à des niveaux de tension supérieurs à ceux autorisés par le silicium. Dans la dernière section de ce chapitre, nous présenterons les différentes approches qui ont été proposées ces dernières années pour atténuer ce renforcement de champ électrique : amélioration des propriétés diélectriques des isolants ou ajout de particules dans les isolants, ou modifications géométriques purement structurelles.

### **I.1. Évolution de l'électrification dans différents domaines d'application**

Le marché des modules de puissance est actuellement en fort développement [1], favorisé par la croissance de l'utilisation de l'énergie électrique. En effet, cette énergie constitue un élément clé de la transition énergétique en étant la principale alternative aux énergies fossiles au travers du développement des énergies renouvelables, mais étant aussi une énergie performante en ce qui concerne la maîtrise de son utilisation. Cette évolution du marché et la

tendance à l'électrification des systèmes se manifestent dans de nombreuses applications industrielles.

Dans le secteur de la distribution de l'électricité, les réseaux HVDC (*High Voltage Direct Current*) se développent pour le transport de courant continu à haute tension sur de longues distances [2]. Ils constituent la meilleure solution pour l'intégration des énergies renouvelables (plus intermittentes) ainsi que l'interconnexion de plusieurs réseaux électriques. Cette nouvelle génération de réseau plus efficace, plus fiable et plus « intelligente » se déploie équipée de technologies d'instrumentation, d'information et de commutation. C'est un véritable concept de réseau « intelligent » que cherchent à développer les industriels.

Au niveau des transports, l'automobile aussi tend vers le « tout électrique » et constituera la plus grosse part du marché des modules de puissance d'ici à 2020 [1]. La plupart des constructeurs automobiles disposent déjà ou préparent leurs modèles de véhicules électriques pour l'avenir<sup>1</sup>. Quant à l'aéronautique, elle vise le remplacement des systèmes hydrauliques, mécaniques et pneumatiques par des systèmes électriques afin obtenir des gains de poids importants et donc une baisse de la consommation de carburant et d'émissions polluantes. Enfin, le ferroviaire qui est déjà en grande partie électrique évolue, bénéficiant des nouveaux modules de puissance disponibles dans le but d'améliorer les performances de la chaîne de traction (rendement et rapport puissance / volume).

D'ici 2020, le marché des modules de puissance aura doublé comme le montre la Figure 1 et deviendra très concurrentiel, grâce notamment à l'industrie automobile qui joue le rôle d'accélérateur sur l'investissement et par conséquent sur la conception de ces modules.

---

<sup>1</sup> Nicolas Hulot, ministre de la transition écologique et solidaire, a annoncé jeudi 6 juillet 2017 que la France interdira d'ici à 2040 la commercialisation des véhicules thermiques.

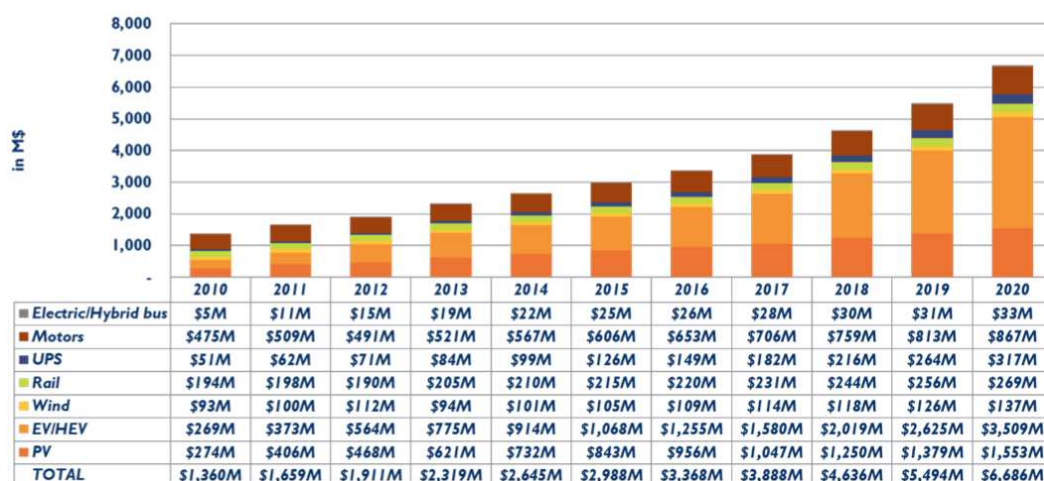


Figure 1 : Évolution du marché des modules de puissance par application industrielles [1]

## I.2. Évolution des composants de puissance

### I.2.1. Évolution des semi-conducteurs : composants 'grand gap'

Aujourd'hui les limites des puces en silicium et de leurs packagings sont atteintes. Le développement récent de composants en carbure de silicium, permet de repousser les limites d'utilisation des composants de puissance à des tensions et des températures encore plus élevées. De ce fait, l'environnement de ces nouveaux composants doit également évoluer pour s'adapter à leurs nouvelles contraintes de fonctionnement. En effet, les composants haute tension en silicium fonctionnent à des températures de jonction limitées entre 125 et 175°C et depuis plus de 15 ans, le niveau de tension pour les modules constitués d'une association de puces stagne à 6,5 kV. Dorénavant, les applications nécessitant de hautes températures ou de hautes tensions pourraient dépasser les 200°C et atteindre des tensions bien supérieures à 6,5 kV grâce à l'utilisation de matériaux semi-conducteurs à large bande d'énergie interdite (WBG), tels que le carbure de silicium (SiC), le nitrure de gallium (GaN) ou le diamant.

## Caractéristiques physiques des semi-conducteurs

| Propriétés                       | Si   | SiC-4H | GaN  | Diamant |
|----------------------------------|------|--------|------|---------|
| Bande d'énergie interdite (eV)   | 1,12 | 3,26   | 3,46 | 5,5     |
| Conductivité thermique (W/m · K) | 150  | 450    | 130  | 2000    |
| CTE (10 <sup>-6</sup> /K)        | 4    | 2,6    | 2,5  | 1,2     |
| Rigidité diélectrique (kV/mm)    | 30   | 300    | 500  | 1000    |

**Tableau 1 : Caractéristiques physiques à 300 K de semi-conducteurs à grand gap**

Le carbure de silicium (SiC) est le matériau le plus prometteur pour la réalisation de composants de puissance haute tension. Sa large bande d'énergie interdite, son excellente conductivité thermique et son champ critique élevé lui permettent de fonctionner à très haute température (supérieure à 400°C) et à très haute tension (en théorie jusqu'à une centaine de kilovolts) [3]. Le nitrure de gallium (GaN) est également un matériau adapté pour la conception de composants de puissance, cependant il ne permet pas pour le moment de faire des composants verticaux [4], ce qui le limite à l'utilisation pour des tensions plus faibles, inférieures à 1 kV. Quant au diamant synthétique, il est en théorie le matériau qui affiche les meilleures performances électriques et thermiques. Mais c'est un matériau dont le développement n'est pas encore maîtrisé, sa synthèse est très délicate et son dopage représente un problème partiellement résolu. Le SiC demeure donc le seul matériau qui puisse répondre actuellement aux besoins de l'électronique de puissance pour la haute tension et la haute température [5]. Très prochainement, **Wolfspeed** (CREE) lancera de composants SiC IGBT, MOSFET et GTO de 15kV et l'arrivée de modules de puissance en SiC de 10 kV. La société détient également des démonstrateurs record de tension présentés en Figure 2 avec des IGBT en SiC capables de fonctionner à une tension de 27,5 kV.

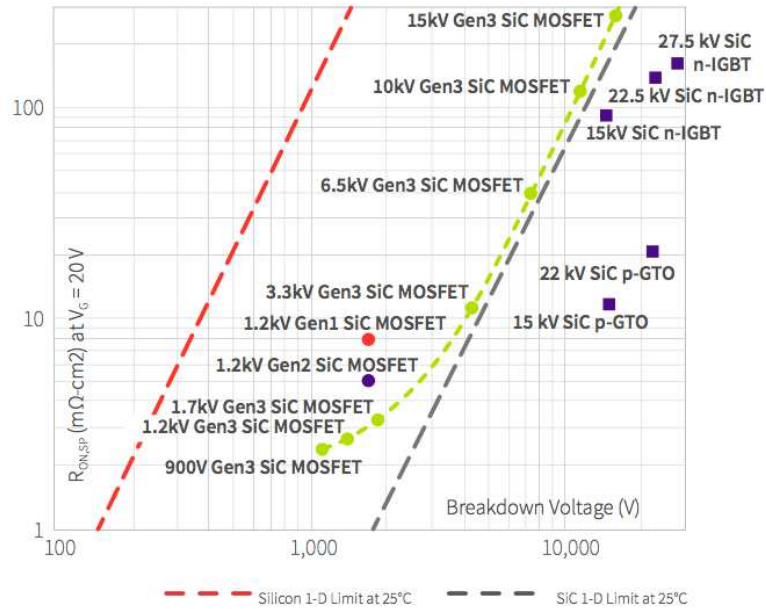


Figure 2 : Performance de conduction de dispositifs SiC haute tension [6]

En plus de fonctionner à des températures et tensions très élevées, le composant en SiC est de plus petite dimension par rapport à son prédécesseur en silicium, ce qui favorise la tendance à la miniaturisation des systèmes électriques mais complexifie encore davantage la gestion de la densité de puissance, d'extraction de la chaleur et des connexions électriques au sein du module de puissance notamment en haute tension.

### 1.2.2. Synthèse des modules SiC disponibles sur le marché

Les semi-conducteurs à grand gap nécessitent des solutions de packaging spécialement adaptées. Aujourd'hui, l'électronique de puissance en carbure de silicium SiC est dominée par les composants discrets mais les modules de puissance appelés « hybrides » comportant des diodes en SiC et des transistors en Si (principalement IGBT) sont actuellement utilisés dans certaines applications notamment en photovoltaïque. Les modules de puissance utilisant exclusivement la technologie SiC apparaissent également sur le marché ces derniers temps, composés de diodes et de transistors MOSFET en SiC, comme présenté sur la figure 3. Dans les catalogues constructeurs, les calibres en tension disponibles sont au maximum de 1,7 kV. Des calibres de 3,3 kV vont être prochainement disponibles et sont déjà utilisés dans les applications ferroviaires [7].





Figure 3 : Exemples de quelques modules de puissance hybrides ou tout SiC commerciaux [8]

Parmi les fabricants de modules représentés en Figure 3 :

- **CREE** propose depuis peu à son catalogue des modules de puissance tout SiC et notamment un caractérisé à 1700 V, 225 A et  $R_{ds(on)}$  de 8 mΩ (équivalent au modèle 1200 V, 120 A, 13 mΩ (Figure 3), précisant que le substrat est en AlN et la semelle en cuivre. Un autre modèle est proposé (1200 V, 325 A, 3,6 mΩ) avec un substrat en  $Si_3N_4$  métallisé de type **AMB** et d'une semelle en AlSiC (module en haut de la Figure 3).
- **GeneSiC** et **Infineon** proposent des modèles aussi bien hybrides que tout SiC.
- **Fuji Electric** ne dispose que de modules hybrides (1700 V de 400 A à 1200 A).
- **Mitsubishi Electric** annonçait sur son site un module tout SiC 1200 V, 800 A en MOSFET remontant à janvier 2013.
- D'autres fabricants sont également sur le marché, comme **RHOM**, **Hitachi**, **Semikron**, ou **Microsemi** et proposent un catalogue similaire aux fabricants précédents.

Actuellement, la fabrication industrielle d'IGBT en SiC rencontre quelques difficultés, sur la fiabilité liée à l'oxyde de grille et sur le matériau de type P et N qui doit être de très bonne qualité. Mais des démonstrateurs existent (par **Wolfspeed** en Figure 2) et leur intégration dans des modules de puissance devrait pouvoir se réaliser prochainement.

### I.3. Packaging des modules de puissance

Comme nous l'avons expliqué précédemment l'évolution des composants permise par l'émergence des semi-conducteurs « grand gap » impose de nouvelles contraintes sur l'environnement des isolants, des contraintes électriques mais aussi d'autres contraintes vis-à-vis desquelles le packaging doit assurer différents rôles de :

- Tenue mécanique : Maintenir les puces et les connexions entre les puces mais également avec les parties externes du boîtier.
- Protection : contre l'humidité, la poussière, l'électricité statique...
- Gestion thermique : Évacuer la chaleur causée par les pertes en commutation et en conduction des puces lors de leur fonctionnement.
- Isolation électrique interne et externe : Assurer l'isolation entre les différents potentiels du circuit.

Jusqu'à présent, les puces étaient principalement en silicium (Si), packagées soit de façon individuelle formant ainsi un composant discret (mono-puces), ou multiple formant un module multi-puces.

Les packagings n'ont cessé d'évoluer au fil des années pour s'adapter à la fois aux spécificités techniques des composants de puissance, notamment l'augmentation des calibres en courant autorisés par l'amélioration des performances thermiques des boîtiers, mais aussi pour répondre aux exigences de leurs applications. En effet, dans certains secteurs comme celui du transport, notamment aérien et ferroviaire, les conditions environnementales des composants embarqués sont parfois très sévères (température ambiante élevée (200°C) ou très basse (- 55°C), cyclages thermiques, basse pression, vibrations et chocs...). La prise en compte d'un environnement de plus en plus sévère s'ajoute alors à une exigence de réduction de poids et de volume des systèmes électriques.

Pour résumer, le packaging est en perpétuelle évolution, avec des objectifs de miniaturisation et d'augmentation de densité de puissance, de rendement et d'efficacité du système global. La Figure 4 donne un aperçu de l'ensemble des puces avec leur packaging et de leurs évolutions au cours des dernières décennies.

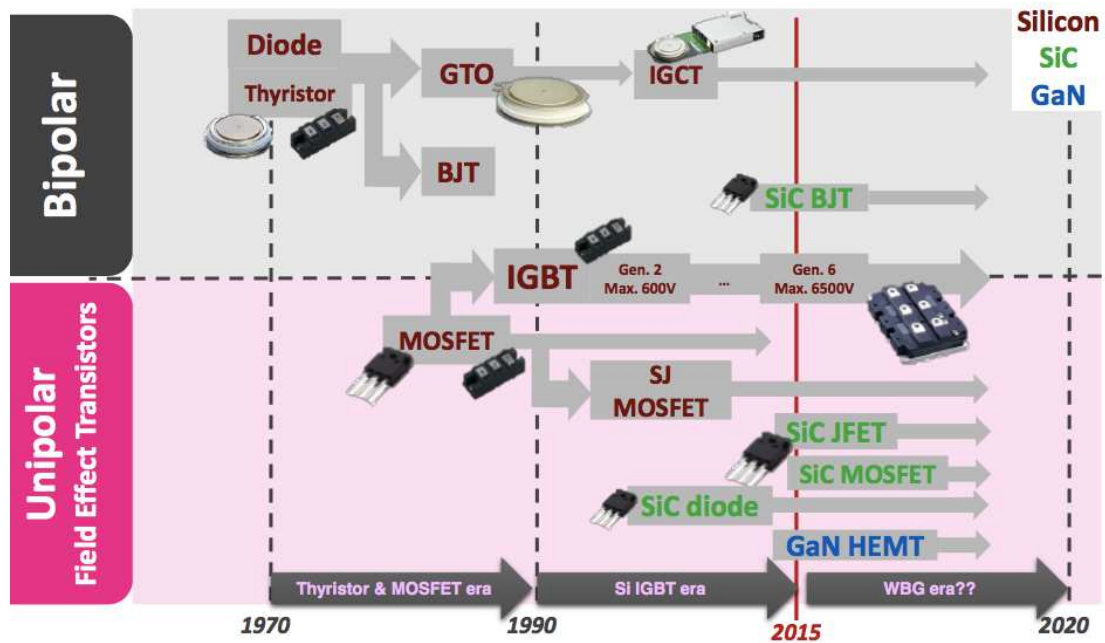


Figure 4: évolution des boîtiers de puissances sur 50 ans [1]

Parmi les technologies des modules de puissance haute tension, il existe deux grands types de boîtiers (Figure 5) pour les semi-conducteurs de forte puissance : le boîtier isolé et le boîtier pressé.

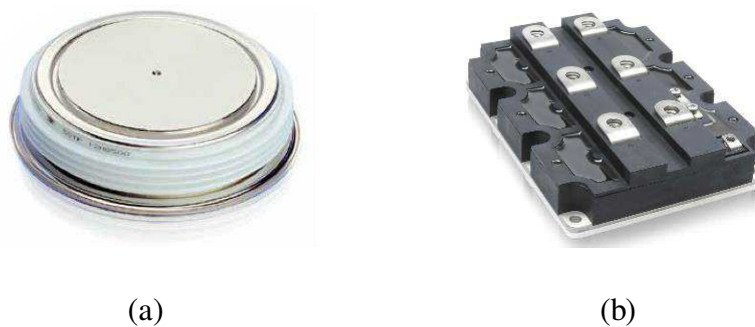


Figure 5 : Deux grands types de boîtiers : le boîtier pressé et le boîtier isolé [2]

Dans un boîtier pressé (Figure 5 (a)), les pièces sont flottantes, le composant semi-conducteur sous forme de *wafer* (plaquette) est pris entre deux disques de molybdène (Mo) et le tout est mis en pression mécanique dans une bride. Les contacts électriques sont réalisés par les pôles d'anode et de cathode et leur isolation est faite par un anneau en céramique. A l'origine, ce type de boîtier est utilisé pour packager des composants de très fort calibre en courant, tels que des diodes, thyristors et GTO (de section égale à celle du *wafer*), nécessaires

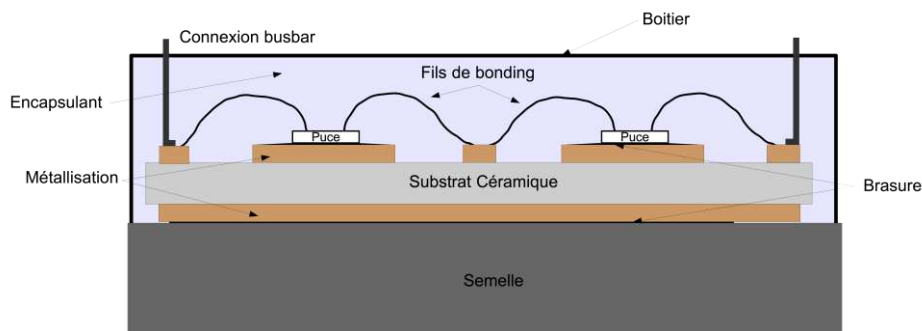
pour les applications de très forte puissance (HVDC classique, réseaux points à points), car la forme même du boîtier permet une connexion en série de plusieurs modules par simple empilage avec semelles interposées ainsi qu'un refroidissement double face (c'est la cas, par exemple, des stations de conversion HVDC classique (point à point) qui peuvent associer jusqu'à 200 modules en série [9]). Un avantage du boîtier pressé est qu'il peut assurer la continuité du courant en cas de défaillance, ce qui est intéressant pour certaines applications où de nombreux composants sont mis en série. En cas de défaillance du semi-conducteur, les pièces fondent permettant au courant de continuer à circuler (*fail to short*). Quant au boîtier isolé, qui package généralement des transistors IGBT, il est préféré dans les systèmes de plus faible puissance comme le ferroviaire. Mais depuis les années 90, il est employé dans les nouveaux réseaux de transport appelé « HVDC Light » pour **ABB**, « HVDC Maxsine » pour **Alstom** ou « HVDC Plus » pour **Siemens**, dans lesquels les thyristors (HVDC classique) laissent place à des transistors plus contrôlables pour le déploiement des réseaux multi-terminaux. Mais en cas de défaillance d'un module isolé, à l'inverse de la technologie pressée, le circuit est le plus souvent ouvert. C'est pourquoi **ABB** a proposé une variante de boîtier pressé contenant des IGBT, par le lancement du module « StakPak » (Figure 6). Par exemple, une installation de 300 MW nécessite 6 000 modules StakPak connectés en série, employant quelques 200 000 IGBT [9]. Cette technologie de contact par pression permet aux puces semi-conductrices une liaison électrique par ressort individuel sur chaque puce et ce même en cas de défaillance. On retrouve alors les mêmes avantages (notamment la connexion en série) qu'un boîtier pressé à l'exception du refroidissement double face.



Figure 6 : Boîtier pressé « StakPak » de chez ABB

Pour la majorité des autres applications industrielles, notamment dans le transport, on retrouve les modules de puissance isolés dit « classiques » (Figure 5 (b)) et qui feront l'objet de cette thèse. La Figure 7 représente une vue en coupe de l'assemblage d'un module de

puissance classique. A l'intérieur d'un module, les puces semi-conductrices sont brasées sur un substrat céramique métallisé, le substrat céramique est ensuite fixé sur une semelle (principalement alliage en aluminium-carbure de silicium AlSiC) qui assure le maintien mécanique de l'assemblage et le transfert thermique vers la source froide. Les connexions électriques à l'intérieur du module de puissance sont assurées par des fils de câblage (fils de *bonding*) et des amenées de tension permettent la liaison vers l'extérieur du boîtier. Cet assemblage est encapsulé le plus fréquemment par un gel silicone et contenu dans un boîtier pour protéger l'assemblage des agressions externes, mais aussi assurer un niveau de tenue en tension.



**Figure 7 : Coupe schématique d'un module de puissance « classique », avec puces brasées et connexions par fils de bonding.**

## CHAPITRE I - partie B : CONTRAINTES ÉLECTRIQUES LIÉES A LA MONTÉE EN TENSION

Aujourd'hui les modules de puissance classiques en silicium peuvent atteindre des tensions de 6,5 kV (IGBT). Or, comme nous l'avons évoqué, l'intégration de composants en carbure de silicium va amener une évolution du calibre en tension de ces modules. Actuellement les principaux fabricants proposent des modules SiC inférieurs à 3,5 kV mais des tensions de fonctionnement bien supérieures sont à venir et notamment des modules de plus de 10 kV. Cette montée en tension des semi-conducteurs va imposer de nouvelles contraintes sur les isolants et notamment au niveau des renforcements de champ électrique localisés.

### I.1. Conséquences sur les isolants

#### *I.1.1. Phénomènes de rupture dans les isolants solides*

Les phénomènes conduisant à une rupture irréversible du matériau sont l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. On distingue le claquage intrinsèque du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques, thermiques ou mécaniques et le claquage « pratique » qui survient au voisinage d'un défaut ou par suite d'une dégradation progressive du matériau. Assez souvent, l'un des phénomènes est prédominant. Quant au facteur temps, il complique davantage les phénomènes de pré-rupture. La suite de ce paragraphe fait un rapide point sur les différents processus de rupture.

- Claquage électronique :

Le claquage électronique est susceptible d'intervenir à des champs très élevés. Seul le champ électrique est déterminant. Plusieurs théories ont été proposées dans lesquelles les électrons acquièrent des énergies considérables ou se multiplient par avalanche [10]. De tels mécanismes n'ont pas reçu de validation expérimentale, aucune de ces théories ne permet d'expliquer toutes les constatations expérimentales.

- Claquage thermique :

Lorsque l'on applique un champ électrique à un matériau isolant, un courant (généralement très faible) circule entre les électrodes. En champ continu, ce courant est lié à la conduction tandis qu'en champ alternatif, se superpose à ce courant de conduction, des pertes diélectriques qui entraînent un échauffement du matériau. Cet échauffement doit être évacué par conduction de la chaleur dans le matériau pour qu'un

état d'équilibre soit atteint. En l'absence d'une dissipation thermique suffisante, un emballement thermique a lieu. Ce type de claquage est souvent rencontré à haute température, en particulier sur les céramiques.

- **Claquage électromécanique :**

Le claquage électromécanique est provoqué par l'effort électrostatique qui tend à rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cet effort comprime l'isolant solide placé entre les deux électrodes. Le claquage survient lorsque cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module d'Young. Ce type de claquage est rencontré principalement dans les polymères thermoplastiques, notamment lorsque l'on se rapproche de la température où leur module d'Young baisse significativement.

Le claquage intrinsèque du matériau est toujours extrêmement difficile à atteindre et les processus sont difficilement dissociables. Dans la pratique, le claquage diélectrique des isolants solides survient le plus souvent à des valeurs de champ électrique inférieures à celles prévues par les théories précédentes.

- **Claquage pratique :**

En pratique, le claquage se produit toujours au point le plus faible du volume de l'isolation soumis au champ électrique. Dans le module, ce point correspond généralement à la présence de défauts comme des inclusions gazeuses, des irrégularités de la gravure en cuivre (en forme de pointe) et des inclusions solides.<sup>[11]</sup> Le claquage peut également se produire à partir de dégradations progressives des matériaux sous l'action des décharges partielles et d'arborescences électriques.

### *1.1.2. Phénomène de décharges partielles*

La notion de décharges partielles est essentielle en ce qui concerne la fiabilité des modules. Dans cette partie, nous évoquons la notion de décharges partielles, qui sera utile pour la phase expérimentale présentée au Chapitre 4 de cette thèse. Les méthodes de détection sont, elles, présentées en annexe (Annexe 1).

#### *a. Nature et Classification des décharges partielles*

Une décharge partielle est une décharge électrique locale apparaissant sous l'application d'une tension élevée. Elle ne court-circuite que partiellement le milieu dans lequel elle se déclenche. Les décharges sont classées d'après Kreuger [11] en fonction de leur localisation, définissant ainsi quatre catégories :



- Les décharges internes (voir Figure 8 (a)), qui apparaissent dans l'isolant aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple une vacuole dans un solide ou une bulle dans un liquide ;
- Les décharges de surface (Figure 8 (b)), qui sont des décharges prenant naissance à la jonction d'au moins deux matériaux lorsqu'il y a un défaut (goutte d'eau, pollution, poussière, etc.) et se développent en surface de l'isolant. Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique ;
- Les décharges couronne (Figure 8 (c)) qui prennent naissance dans le matériau aux endroits où le champ électrique est très renforcé (par exemple par un effet de pointe). La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe ;
- Les arborescences dans les solides (Figure 8 (d)) : un « arbre électrique » prend naissance sur un défaut de l'isolation. Il y a ensuite croissance d'une structure ramifiée comprenant différentes branches qui sont le siège de décharges. Les arborescences constituent le phénomène de claquage à long terme.

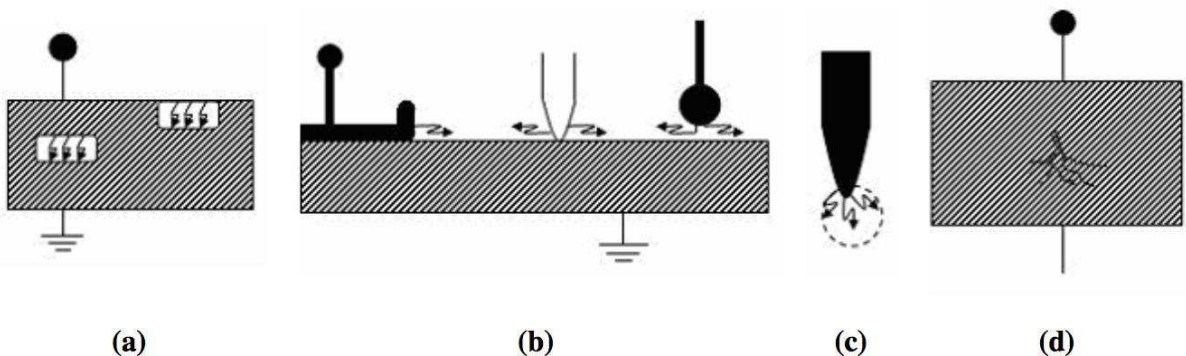


Figure 8 : Différents types de décharges [12] d'après Kreuger

### *b. Conséquences des décharges partielles*

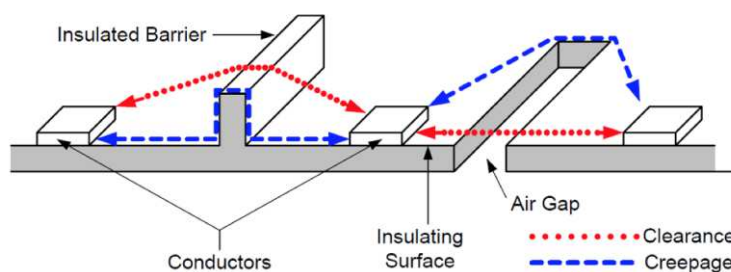
L'effet des décharges partielles est variable selon leur intensité et le milieu dans lequel elles apparaissent. Elles peuvent déclencher la dégradation des matériaux (en particulier les solides) sous l'action d'une contrainte thermique locale (carbonisation), ou chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (ozone ou acide nitrique), ou d'une érosion mécanique suite au bombardement par des espèces chargées. Un milieu fluide (gaz ou liquide) est moins affecté par une dégradation car ce court-circuit est libre de circuler. En milieu fluide, les contraintes thermiques et produits de dégradation sont rapidement dispersés



dans le volume, alors que dans le cas d'un solide, la dégradation est localisée et irréversible [13].

### *1.1.3. Phénomènes de contournement et de cheminement en surface*

Il existe des phénomènes de surface pour lesquels un courant de conduction apparaît sous l'effet d'un fort champ électrique (Figure 9). Le cheminement ou « creepage » survient le long de la distance la plus courte à la surface d'un matériau entre deux parties conductrices et le contournement ou « clearance » est la distance la plus courte dans l'air. Ces phénomènes mettent en jeu deux aspects : le désordre et les pièges qui sont dus à la fois à la microstructure du matériau et à l'injection de charges induites par un fort champ électrique au contact (la rugosité joue également un rôle, qui par effet de pointe rehausse sensiblement le champ électrique au contact). Il peut s'établir une accumulation dans certaines régions de densité volumique de charges appelées charges d'espace qui modifie localement le champ électrique et accélère le claquage [14].



**Figure 9 : Distance d'isolement à la surface du matériau « Creepage » et dans l'air « Clearance » [15]**

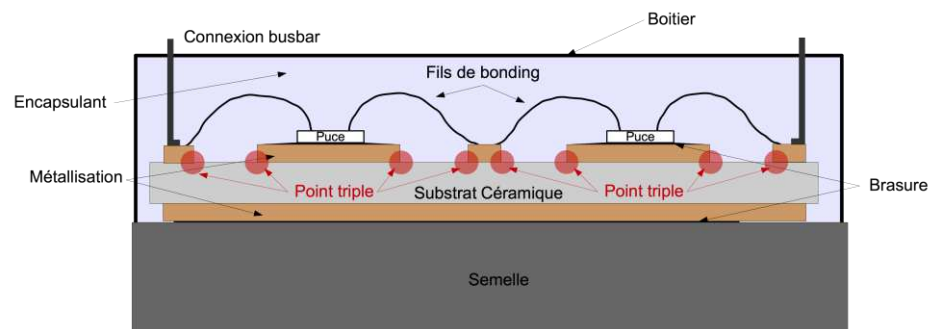
La détermination des distances d'isolement minimales pour l'isolation est établie à partir de normes en fonction de l'application visée. Par exemple, pour les modules de puissance IGBT destinés aux applications ferroviaires, la norme généralement utilisée est EN 50124-1 « Applications ferroviaires - Coordination de l'isolement - Partie 1 : prescriptions fondamentales - Distances d'isolement dans l'air et lignes de fuite pour tout matériel électrique et électronique ».

## **1.2. Principal point faible électrique du module : le point triple**

Les modules de puissance pour la haute tension à base de composants en silicium (Si) sont environnés de deux principaux isolants qui sont le substrat céramique et le gel silicone utilisé comme agent d'encapsulation. Dans les faits, la céramique est actuellement la seule à offrir un bon compromis thermique et électrique. La fonction encapsulation est généralement

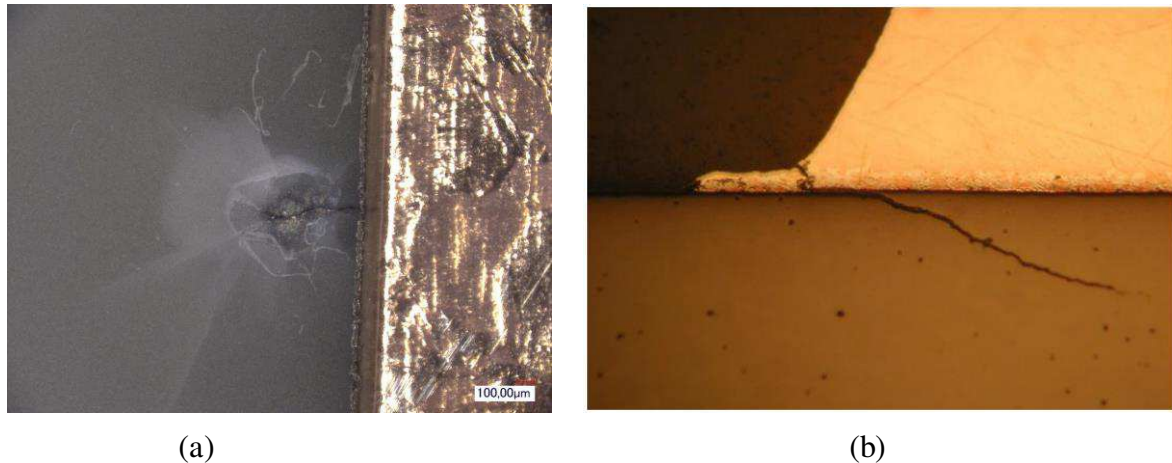
assurée par un gel silicone en raison de sa plus grande facilité de mise en œuvre par rapport aux résines (notamment en matière de retrait lors de la réticulation) et sa plus grande souplesse (tolérance vis-à-vis des contraintes électro-thermo-mécaniques).

Une zone particulière, à la jonction entre le substrat, la métallisation et l'encapsulation (point triple), est un point faible majeur du module de puissance. Cette région, qui se situe au bord de la métallisation du substrat, est une zone de renforcement du champ électrique. Ces zones sont repérées par des points rouges sur la Figure 10. Lors du fonctionnement électrique du module de puissance, le champ dans cette zone peut entraîner l'apparition des décharges partielles (au-delà d'une tension seuil appelée TADP), aboutissant avec le temps à une usure de l'encapsulation pouvant mener à la rupture de l'isolation. La Figure 11 (a) montre le résultat de la rupture diélectrique d'un substrat céramique par la formation d'un canal de court-circuit à travers celle-ci. On constatera également à partir de nos simulations au Chapitre 2, que la valeur maximale du champ électrique se situe principalement dans le substrat céramique. De telles contraintes électriques localisées ont pour conséquence un vieillissement électrique prématuré des isolants et une limite à la tenue en tension du module.



**Figure 10 : Coupe schématique d'un module de puissance avec la localisation des points triples**

Le module de puissance n'est pas seulement sujet à des problèmes électriques mais également à des problèmes thermiques et thermo-mécaniques qui impactent les éléments constituant le module de puissance que sont les puces, semelle, substrat, brasures, fils de câblage et encapsulant. Les cyclages thermiques éprouvent ces éléments et la différence de coefficient de dilatation thermique (CTE) entre les matériaux provoque des dommages irréversibles (craquelures, fissures, délaminations, etc.) (Figure 11 (b)). Nous n'aborderons pas ces problématiques dans ce manuscrit, mais elles doivent être prises en compte à terme.



**Figure 11 : (a) Rupture diélectrique du substrat AlN métallisé dans la zone du point triple ; (b) Fissuration de la métallisation et du substrat Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> suite à un cyclage thermique [16]**

Le renforcement de champ électrique au point triple peut de manière radicale conduire à la rupture diélectrique de l'un des isolants. Dans ce cas, il constitue une limitation à la montée en tension. Ce renforcement peut entraîner des processus de vieillissement électrique prématurés pour des tensions inférieures à la tension de rupture. Ils sont causés par l'apparition d'une activité de décharges partielles et la formation de charges d'espace notamment dans le matériau encapsulant. Cette activité de décharges partielles peut se localiser un peu partout dans le module en fonction de la mise en œuvre de celui-ci. Des inclusions gazeuses peuvent s'insérer dans le volume suite à un mauvais dégazage mais également aux interfaces. Une zone particulièrement exposée est le bord extérieur de la métallisation [17], [18] comme le montre la Figure 12, où on peut observer des spots lumineux lorsqu'une tension est appliquée. C'est une zone dans laquelle les imperfections sont fréquemment liées à la mise en œuvre des pistes conductrices. Une activité de décharges partielles est également présente à l'interface de la métallisation et de la céramique [17], [19] du fait de la présence de microcavités, lié à la technique de gravure du cuivre. Ces localisations ont été clairement identifiées dans les travaux de Berth [19] par le couplage de deux méthodes de détection de décharges, électrique et acoustique. Fabian et *al.* ont abouti au même constat par une expérimentation de couplage de détection électrique et optique. Cependant, Berth conclut que le principal point faible du système d'isolation est dû au phénomène de décharges partielles localisées à l'interface gel / métallisation qui réduit la capacité d'isolation par la décomposition du gel (génération de gaz) ces décharges étant plus intenses qu'à l'interface métallisation / céramique.

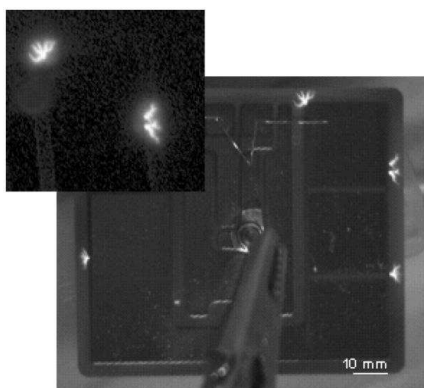


Figure 12 : Localisation optique des Décharges Partielles sur un substrat AlN plongé dans un gel de silicone [17]

### **I.3. Synthèse des pistes envisagées pour l'atténuation du phénomène au point triple**

Le point de départ de notre étude est la constatation de renforcements de champ électrique à l'intérieur des modules de puissance, notamment dans les zones de point triple situé à la jonction entre le substrat, la métallisation et l'encapsulation. Au-delà des propriétés intrinsèques des isolants et des compromis sévères qui en résultent déjà, le facteur haute tension des composants à venir (SiC) va contraindre encore plus fortement l'isolation. Afin d'assurer la fiabilité des systèmes, il est devenu primordial d'axer les recherches sur des moyens pour réduire l'impact des contraintes électriques élevées à l'intérieur des packagings.

Nous présentons, dans cette partie, différentes approches qui ont été proposées ces dernières années dans les domaines du génie électrique pour atténuer ce renforcement de champ électrique, à savoir :

- Amélioration des propriétés diélectriques de l'isolant d'encapsulation en volume.
- Amélioration des propriétés diélectriques de l'isolant d'encapsulation localement.
- Ajout de matériaux gradateurs de potentiel dans le système d'isolation sous forme de films minces.
- Modifications géométriques structurelles.

Nous avons classé les différentes solutions en deux parties, les approches par action sur les matériaux et les approches par action sur la géométrie.

#### ***1.3.1. Modifications des propriétés des matériaux isolants***

Dans une approche visant à améliorer la tenue en champ électrique ou aux décharges partielles des matériaux isolants, beaucoup de travaux portent sur l'isolant d'encapsulation et très peu sur le substrat céramique. En effet, en première approche, si on raisonne sur une

répartition des équipotentiels sous champ électrique homogène comme dans le cas d'électrodes plan / plan, le renforcement de champ électrique intervient préférentiellement dans le matériau de plus faible permittivité diélectrique relative. Le matériau polymère constituant l'encapsulant possède des valeurs de permittivité comprises entre 2 et 4 (pour des fréquences et des températures usuelles) alors que les matériaux céramiques utilisés pour le substrat ont des valeurs de permittivité comprises entre 6 et 10. D'où des contraintes plus sévères avec ce raisonnement (champ homogène perpendiculaire aux interfaces) sur l'isolant d'encapsulation (nous verrons ensuite par des simulations, que suivant les configurations les contraintes maximales peuvent se reporter sur la céramique).

Une première stratégie consiste à améliorer les propriétés du matériau encapsulant (gel silicone, résine époxy etc.) **dans son volume** et une autre, consiste en **l'ajout d'une couche**, pouvant avoir diverses propriétés, située entre la métallisation et l'encapsulant de volume.

- Ajout d'une couche en surface

L'amélioration des propriétés peut être obtenue par l'ajout d'un film mince (quelques dizaines de micromètres) comme le polyimide (PI), ou le polyamide-imide (PAI) [20] à l'endroit même où les contraintes électriques sont les plus intenses et devant assurer la tenue à ces contraintes. Ces dépôts isolants, de faible épaisseur et de faible permittivité, réduisent un peu la contrainte électrique à leur interface avec le gel. Une autre stratégie consiste à réduire le champ électrique dans les zones de renforcement par l'emploi d'une couche aux propriétés de conductivité électrique ou de permittivité relative modifiée, par exemple, l'emploi de vernis semi-résistifs, comme étudié par Mitic et *al.* [21]. Ces auteurs ont fait l'expérimentation de déposer par plasma un film mince de vernis semi-résistif à base de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) entre les électrodes haute tension et de masse (Figure 13 (b)). Cette couche de vernis est ensuite recouverte par le gel encapsulant. Les tests de ce vernis dans les modules de puissance, montrent une augmentation de la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) comparée à des modules non vernis. La répartition du potentiel électrique s'avère efficace. Cependant, ce type de dépôt par procédé plasma reste difficile à industrialiser et il peut y avoir des pertes supplémentaires par effet Joule dans ces couches semi-résistives.

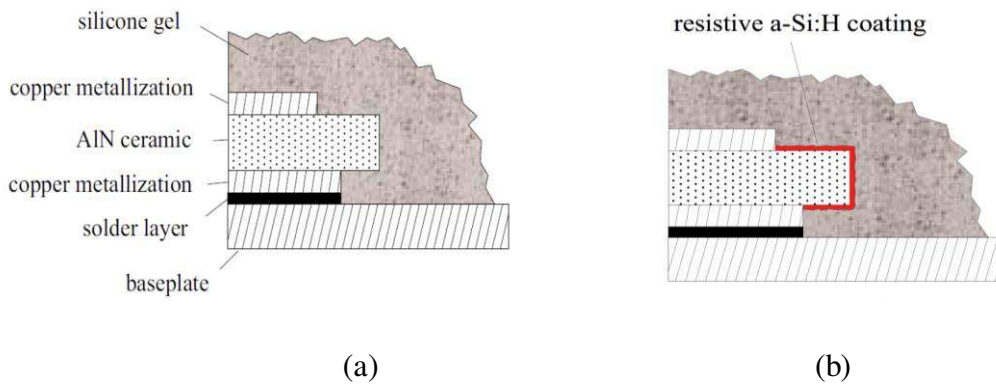


Figure 13 : (a) Substrat DBC encapsulé par un gel silicone et (b) incorporation d'un film mince de vernis semi-résistif a-Si:H sous le gel silicone [21]

Un autre type de vernis semi-résistif composite en polyimide chargé en micro-particules d'oxyde de zinc (ZnO) a été étudié par Donzel et *al.* [22]. Ce vernis à résistivité non linéaire conférée par le ZnO est destiné à diminuer le renforcement de champ électrique aux bords de métallisation de substrats brasés (*Active metal brazing – AMB*). La Figure 14 (b) montre par simulation la réduction du pic de champ électrique dans la zone du point triple contenant une protrusion métallique grâce au dépôt de polyimide / ZnO par rapport à un gel silicone classique (Figure 14 (a)).

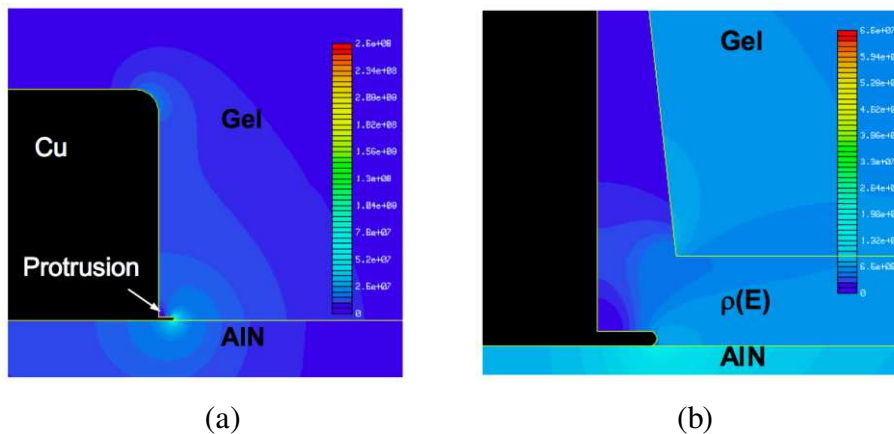


Figure 14 : (a) Répartition du champ électrique (V/m) en dégradé de couleur dans une structure substrat AMB (application de 6,5 kV, 50 Hz sur l'électrode supérieure), (b) dépôt d'un matériau semi-résistif de polyimide chargé en ZnO sur la métallisation pour la réduction du champ électrique [22]

L'équipe MDCE du laboratoire LAPLACE [23] [24] [25] travaille depuis plusieurs années, sur une solution alternative et qui doit faire ses preuves : la fabrication de matériaux isolants à propriétés anisotropes et à gradient de propriétés (*Field Grading Materials - FGM*). C'est une approche de gradation de potentiel pour minimiser les renforcements de champ à travers une structuration locale du matériau composite sous forme d'un gradient de

permittivité auto-adaptatif localisé là où les contraintes sont les plus intenses. Cette structuration est réalisée via l'application d'un champ électrique DC lors du procédé d'élaboration du matériau composite, permettant le déplacement par électrophorèse des particules en matériau à forte permittivité. L'action d'un champ électrique DC sur la résine liquide chargée en particules engendre leur accumulation vers l'électrode de plus forte tension, formant ainsi une **couche** fortement chargée, qui confère à cette région une permittivité plus élevée. Cette nouvelle approche a le double avantage d'atténuer l'intensification du champ uniquement là où cela est nécessaire (par exemple à proximité des électrodes de haute tension) et de garder les autres régions du matériau faiblement affectées (à savoir celles qui sont moins stressées par le champ).

- Action dans le volume

L'amélioration de la capacité de l'encapsulant à supporter des valeurs de champ électrique élevées peut également passer par la modification de ses propriétés diélectriques globales en **volume**, dans le but de lui conférer par exemple une permittivité plus élevée. En effet, le matériau d'encapsulation lui-même peut être utilisé pour contribuer à la gradation du potentiel. Une étude menée par Wang et *al.* [18] a mis en œuvre un gel silicone chargé par des particules de titanate de baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ) dans des modules IGBT. Le  $\text{BaTiO}_3$  est un matériau ferroélectrique rendant non linéaire en champ sa permittivité sous tension appliquée alternative. Les résultats publiés (tests sous 50 Hz), montrent une augmentation de la tension seuil d'apparition des décharges partielles de 60 % pour un gel chargé en  $\text{BaTiO}_3$  (15 % en volume), par rapport à des modules encapsulés avec un gel silicone classique non chargé, par l'effet de l'augmentation de la permittivité en fonction du niveau de champ. Cette solution est très encourageante, notamment dans une mise en œuvre industrielle puisque la modification se fait dans le gel silicone même (aucun ajout de film supplémentaire). Mais ce chargement global en volume entraîne une augmentation des pertes diélectriques. De plus une étude du comportement du gel chargé en température doit être effectuée.

Les solutions technologiques présentées précédemment apportent de manière générale une contribution à l'atténuation du champ électrique au point triple et / ou sur l'augmentation du seuil de la tension d'apparition des décharges partielles (TADP). Les techniques qui consistent en l'ajout de films minces apportent une complexité lors de la mise en œuvre du système d'isolation. De plus, l'ajout d'une couche de matériau supplémentaire dans le système augmente le nombre d'interfaces entre matériaux avec pour conséquence la possible diminution de la fiabilité du système tout entier. Enfin, dans le cas de l'utilisation des



matériaux composites comme utilisés dans les travaux de Wang et *al.*, la modification des propriétés électriques de l'encapsulant chargé est réalisée de manière homogène (propriétés isotropes) alors que le renforcement de champ électrique est local.

### *1.3.2. Modifications géométriques*

Nous avons présenté précédemment des solutions visant à améliorer la partie encapsulant du module pour mieux limiter les renforcements de champ électrique. Une autre voie qui peut avoir des impacts positifs par une réduction de la contrainte électrique, est une action sur la géométrie de l'un des éléments constituant le module de puissance. Une première solution logique pour la réduction des contraintes électriques, serait d'augmenter les distances d'isolement, par l'augmentation de l'épaisseur du substrat céramique et de l'espacement inter-électrodes, et ainsi atténuer les pics de champ électrique pour une tension donnée par l'augmentation de la distance. Mais cette solution s'avère pénalisante pour l'évacuation vers la semelle, de la chaleur émise par les puces lors de leur fonctionnement, et se révèle également peu compatible avec un objectif de miniaturisation des systèmes pour les distances d'isolement entre les pistes. L'accroissement de l'épaisseur de la céramique pose aussi un problème quant à sa faisabilité technique, surtout pour garder les caractéristiques électriques telles qu'un champ de rupture du matériau élevé (du fait de l'augmentation de la probabilité d'avoir un défaut en volume). De plus la diminution du champ électrique par l'éloignement est une solution issue d'une réflexion en champ homogène. Or comme nous l'avons vu, la structure dans un module de puissance induit des renforcements de champ pour lesquels l'éloignement peut ne pas s'avérer efficace (une épaisseur de céramique doublée ne divise pas le champ électrique au point triple par deux).

Des méthodes purement géométriques ont été étudiées comme l'optimisation des profils des bords de métallisation [26]. En effet, le profil d'un bord de métallisation, réalisé soit par le procédé de gravure DBC (*Direct Bond Copper* – DBC) ou AMB, a une allure en arc avec un rayon de courbure plus ou moins marqué, le pied de sa métallisation se terminant en forme de pointe (Figure 15 (a)). Cette forme pointue a pour effet de renforcer localement le champ électrique et seule une forme arrondie du pied de la métallisation permettrait sa réduction (Figure 15 (c)). Ce type de métallisation est difficile à réaliser par les procédés de gravure chimique actuels. De plus, il est possible que le matériau encapsulant ne parvienne pas à remplir complètement la zone du point triple et que des vacuoles de gaz s'y installent (Figure 15 (c)).





(a) 5  $\mu\text{m}$

(b) 10  $\mu\text{m}$

(c) 150  $\mu\text{m}$

Figure 15 : Répartition du champ électrique (kV/mm) en dégradé de couleur dans une structure substrat DBC (application de 5 kV sur l'électrode supérieure et l'électrode inférieure à la masse – substrat 635  $\mu\text{m}$ ). Pour trois rayons de courbure : (a) 5  $\mu\text{m}$ , (b) 10  $\mu\text{m}$  et (c) 150  $\mu\text{m}$  [26]

Une étude par simulation a été menée sur la répartition du potentiel le long de la distance inter-électrodes à l'interface entre la céramique et l'encapsulant [27] (Figure 16). Cette technique s'inspire de celles des 'anneaux de garde' de la micro-électronique qui consiste à utiliser des lignes à des potentiels flottants dans l'espace inter-électrodes (Figure 17 (b)) pour linéariser le potentiel (Figure 17 (a)) et en atténuer le pic de champ électrique. Mais il est technologiquement difficile de pouvoir incorporer un grand nombre de pistes métalliques dans l'espace inter-électrodes avec les procédés de gravure actuels.

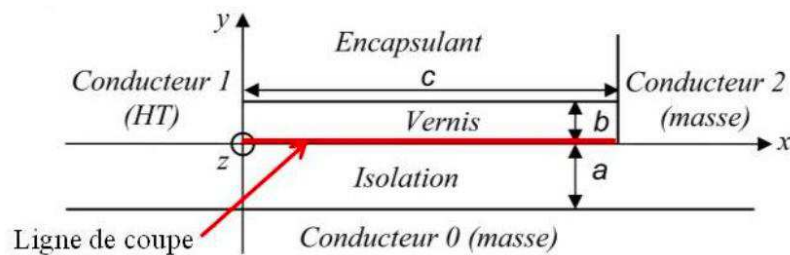


Figure 16 : Géométrie d'un DBC, tension d'alimentation sur le conducteur 1 = 6,5 kV, espacement inter-électrodes 2 mm [27]

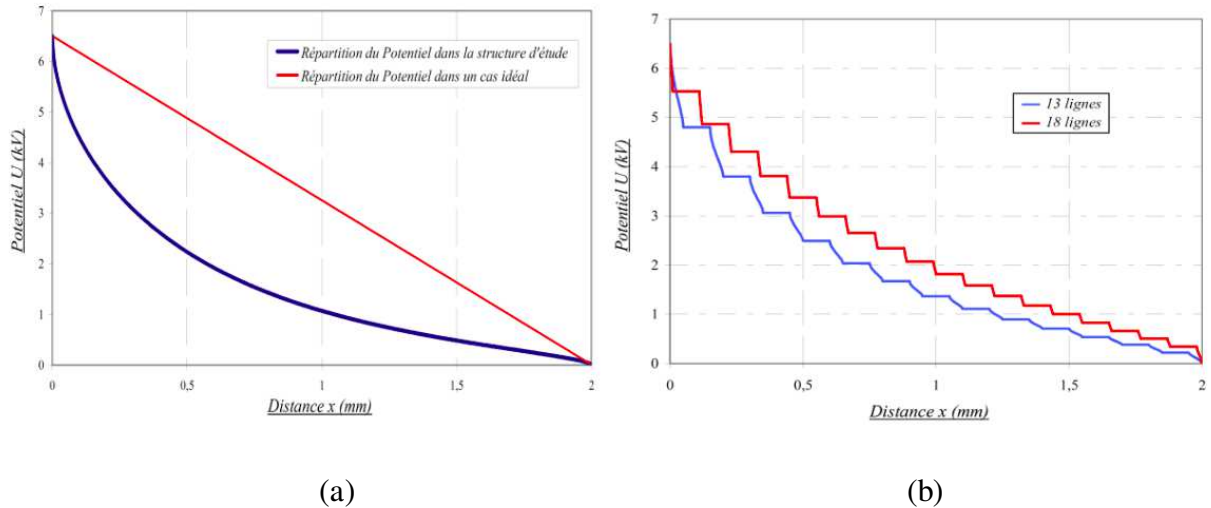


Figure 17 : (a) Répartition du potentiel  $U$  (kV) entre les conducteurs 1 et 2 en AC 50 Hz calculée par simulation, (b) répartition du potentiel entre les conducteurs 1 et 2 en AC 50 Hz calculée par simulation pour 13 et 18 lignes flottantes de 100  $\mu\text{m}$  de largeurs et positionnées entre elles à 25  $\mu\text{m}$  [27]

Une alternative de métallisation a été envisagée par l'incorporation de celle-ci dans le substrat céramique [28] comme représenté en Figure 18 (b). Cette solution permettrait d'avoir une métallisation aux profils de bords arrondis (Figure 18 (b)) et de localiser le champ électrique maximal à l'intérieur du substrat, dont les caractéristiques, notamment de rigidité électrique ou de seuil d'apparition de décharges partielles, peuvent être mieux maîtrisées que celles de l'encapsulant. Cependant, cette étude en est restée à un stade de simulation, sans faire la preuve d'une faisabilité technologique.

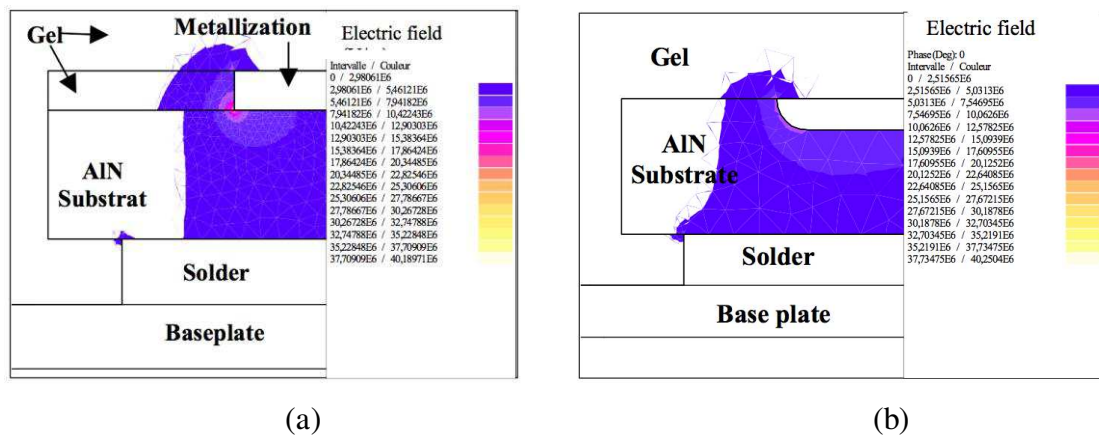
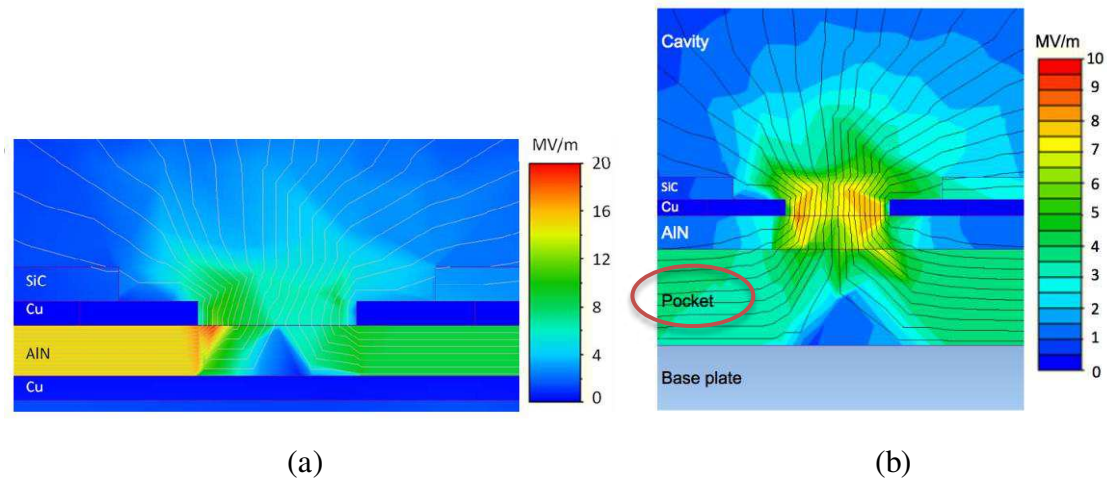


Figure 18 : (a) Répartition du champ électrique (kV/mm) en dégradé de couleur dans une structure substrat DBC (application de 5 kV sur l'électrode supérieure et l'électrode inférieure à la masse), (b) modification de la géométrie au bord de la métallisation [28]

Les travaux portant sur la modification géométrique du substrat pour l'atténuation des contraintes sur l'isolation sont plus rares. Ils sont principalement orientés sur l'amélioration du comportement thermo-mécanique du module de puissance ou bien sur l'abaissement des inductances parasites. Pourtant un changement de structure par l'ajout d'une « poche » (cercle en rouge sur la Figure 19 (b)) sous le substrat céramique proposé par Wesley Tipton *et al.* [29]), a montré en simulation une amélioration en terme d'isolation électrique, par la réduction de l'intensité du champ électrique au point triple.



**Figure 19 : Répartition du champ électrique (kV/mm) en dégradé de couleur dans une structure substrat DBC (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche et électrodes supérieure droite et inférieure à la masse – substrat 635  $\mu\text{m}$  – espacement inter-électrodes 2 mm), sur une structure (a) sans poche et (b) avec poche [29]**

La présence sous la céramique d'une poche d'un isolant gazeux et donc avec une permittivité très faible, proche de 1, va modifier la répartition des équipotentielles. En effet, les équipotentielles vont se concentrer dans la poche (Figure 19 (b)) et par conséquent relâcher les contraintes de champ sur le substrat (qui apparaît de couleur jaune en Figure 19 (a) égal à environ 15 kV/mm contre environ 5 kV/mm avec la poche). Mais l'ajout d'une couche supplémentaire d'isolant gazeux augmente de ce fait l'épaisseur de la distance entre les électrodes en face supérieure et face inférieure, ce qui ne permet pas de conclure directement sur l'efficacité de l'effet poche. Cette structure a aussi des inconvénients, d'une part, le gaz de la poche va dégrader la conductivité thermique de l'ensemble du système (il faudrait aussi se poser la question sur l'aspect mécanique), mais surtout, la présence d'un gaz dans la structure pourrait poser des problèmes quant à la détection des décharges partielles. Même si dans la zone de la poche ces décharges partielles pourraient ne pas être destructrices pour le système, la détection de celles-ci dans un module contenant cette solution pourrait questionner quant à leur localisation.

### *1.3.3. Conclusion*

Suivant l'état de l'art présenté ci-dessus, les solutions de modification géométrique au niveau de la métallisation par un arrondissement ou bien même par leur enfouissement semblent déjà représenter une première solution pour l'atténuation du champ électrique au point triple, en particulier dans la partie encapsulation. Mais le verrou commun à ces solutions reste leur faisabilité technologique. La solution de l'intégration d'une poche de gaz sous le substrat céramique semble radicalement efficace pour relâcher les contraintes aussi bien dans le gel silicone encapsulant que dans le substrat céramique mais présente l'inconvénient d'augmenter la distance entre les électrodes et une difficulté de maîtrise de l'isolation électrique et de la dissipation thermique au niveau de la poche.

De manière générale, les solutions géométriques précédentes présentant des résultats issus de simulations comme preuve sur l'atténuation du champ électrique sont à prendre avec précaution. Les valeurs de champ électrique qui ont été présentées sont directement liées au maillage appliqué et à sa résolution. Si des dispositions sur le maillage ne sont pas prises (blocage du maillage par exemple), celui-ci évolue en fonction des formes géométriques simulées et par conséquent ne permet pas de comparer quantitativement les solutions entre elles.

Néanmoins, la voie proposant des solutions géométriques pour l'atténuation du renforcement de champ électrique au point triple semble pertinente et peu exploitée dans la littérature. Nous allons présenter une solution originale par la proposition d'une nouvelle structure permettant de réduire l'intensité du champ électrique à la fois dans la partie substrat et encapsulant, en s'appuyant sur une modification géométrique du substrat métallisé.

## Synthèse du Chapitre I

Dans ce chapitre, nous avons exposé la tendance des ces dernières années à la multiplication des applications industrielles qui impose à l'industrie de l'électronique de puissance des modules plus performants à plus haute tension, plus haute fréquence, voire plus haute température. Cela implique le développement de packagings fiables et robustes, permettant d'exploiter tous les atouts de la nouvelle génération de semi-conducteurs à large bande d'énergie interdite (grand gap).

Nous avons détaillé un point faible électrique majeur auquel sont confrontés les modules de puissance actuels à savoir le renforcement de champ électrique dans la zone particulière du point triple (jonction entre substrat / métallisation / encapsulation), qui est à l'origine de nombreuses défaillances.

Enfin nous avons présenté des solutions issues de publications proposées ces dernières années pour atténuer ce renforcement de champ électrique au point triple. Elles se partagent en deux catégories, par actions sur les matériaux ou sur la géométrie de l'assemblage. Nous en avons conclu qu'une action sur la géométrie, notamment du substrat céramique pour atténuer l'intensité des pics de champ électrique à la fois dans la partie encapsulation mais également dans la partie substrat céramique, était une voie à explorer. L'atout majeur d'une action géométrique est la diminution de la contrainte sur les deux principaux matériaux isolants du module et non un report de contrainte sur l'un ou l'autre. Nous avons donc décidé de conduire une étude de modification des géométries de la métallisation et du substrat céramique.

# CHAPITRE II - SIMULATION D'UNE SOLUTION ORIGINALE POUR ATTÉNUER LE RENFORCEMENT DE CHAMP ÉLECTRIQUE AU POINT TRIPLE

## II.1. Contexte

L'émergence des nouveaux composants en électronique de puissance, à base de semi-conducteur grand gap, va permettre l'arrivée de nouveaux modules de puissance très haute tension ( $> 10$  kV). La solution proposée dans cette thèse est une modification de la géométrie du substrat céramique métallisé permettant ainsi une diminution significative du renforcement du champ électrique au point triple. Une première partie du chapitre portera sur la méthode de simulation par éléments finis permettant d'analyser la répartition du champ électrique dans le module. À travers la simulation, nous analyserons la zone du point triple, là où le renforcement de champ électrique est maximal dans un module et sur la manière dont se répartit le champ entre les différents matériaux isolants. Nous proposerons une nouvelle structure géométrique en mesa comme solution pour l'abaissement de la contrainte électrique, en vue de l'obtention d'un module de tenue en tension visée égale à 15 kV. Enfin, nous définirons l'influence des paramètres géométriques de la structure mesa sur la valeur du champ électrique calculée par simulation. Nous déduirons une géométrie optimale de cette nouvelle structure en prévision de la fabrication d'échantillons.

## II.2. Présentation de l'étude par simulation numérique

### *II.2.1. Principes de l'outil et de la méthode utilisée*

L'outil numérique Comsol Multiphysics [30] va nous permettre de simuler la répartition du champ électrique à l'intérieur d'un module de puissance afin d'évaluer les effets des propriétés des matériaux et de l'architecture de la structure, en utilisant la méthode des éléments finis (FEM). La FEM permet la résolution des équations différentielles par approximation numérique sur un domaine avec des conditions aux limites définies pour ce domaine. Cela implique de discrétiser l'espace simulé en sous-domaines (éléments) par un maillage afin de déterminer la répartition du champ électrique. La simulation fournira notamment des résultats quantitatifs sur le champ électrique et permettra d'étudier différentes géométries, avec des sous-domaines représentant des matériaux différents.

### a. La modélisation en mode « electrostatics »

Les équations utilisées pour générer toutes les simulations à venir reposent sur les équations de Maxwell. Ces équations dans le vide sont les suivantes :

- Équation de Maxwell-Ampère :  $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B} = \mu_0 \left( \vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$
- Équation de Maxwell-Faraday :  $\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
- Équation de conservation ou Maxwell-Thomson :  $\text{div} \vec{B} = 0$
- Équation de Maxwell-Gauss :  $\text{div} \vec{E} = \frac{\rho_v}{\epsilon_0}$

Où  $\mu_0$ ,  $\epsilon_0$  représentent respectivement la perméabilité et la permittivité du vide.  $\rho_v$  représente la densité volumique de charges électriques,  $\vec{E}$  est le vecteur de champ électrique,  $\vec{B}$  est le vecteur d'induction magnétique,  $\vec{J}$  est le vecteur de densité de courant électrique.

Dans le cas du régime stationnaire, les sources et champs associés ne dépendent plus de la variable temps, le champ électrique et le champ magnétique sont alors totalement découplés et peuvent alors être calculés séparément. Le champ électrique  $\vec{E}$  apparaît seul dans les équations de Maxwell-Gauss et de Maxwell-Faraday tandis que le champ magnétique  $\vec{B}$  ne figure que dans les équations du flux magnétique et de Maxwell-Ampère. L'étude électrostatique et l'étude magnétostatique sont donc indépendantes et chacun des deux champs peut exister en abstraction de l'autre.

Une partie de notre étude est réalisée en mode dit « electrostatics » par le logiciel, permettant d'analyser uniquement la partie champ électrique sur la structure simulée. L'équation de Maxwell-Gauss peut être réécrite en introduisant les propriétés diélectriques (permittivité  $\epsilon$ ) du matériau avec le vecteur déplacement électrique  $\vec{D}$  ( $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ ). Enfin l'insertion du potentiel électrique  $V$  ( $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$ ), permet d'obtenir l'équation de Poisson utilisée en pratique directement pour la résolution du problème :

$$\nabla V = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

Pour la prise en compte de la conductivité  $\sigma$  des matériaux, il faut également analyser la partie densité de courant, et pour cela introduire la forme locale de la loi d'Ohm intégrant les courants de déplacement :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Dans ce cas, les simulations sont réalisées en mode dit «electric currents».

### *b. Principe de discrétisation et conditions aux limites*

La résolution analytique des équations aux dérivées partielles (EDP) n'est souvent pas possible et la simulation numérique devient alors incontournable. L'approche numérique de la résolution des EDP passe par un maillage de la structure.

Le maillage correspond à une discrétisation de l'espace et donc à un découpage par morceaux de la structure, ce qui peut parfois nécessiter une simplification de la structure réelle. Le maillage peut être constitué de structures élémentaires triangulaires, carrées ou sous forme de polygones plus complexes. Le problème étant interpolé sur les éléments, on pressent que le nombre d'éléments va jouer sur la qualité de cette approximation de la solution. On se doute également que, comme on résout un problème comportant des dérivées, c'est plutôt dans les endroits où la solution va évoluer rapidement qu'il sera nécessaire de «resserrer» le maillage. Il faut en outre veiller à ce qu'il n'y ait pas de variation brusque de maillage dans la structure afin que les éléments ne soient pas distordus [31].

Les équations aux dérivées partielles (EDP) présentées plus haut sont alors approximées par un système d'équations linéaires discret basé sur le maillage. Nous avons un système matriciel global prenant en compte l'ensemble des EDP et les conditions aux limites. La définition des conditions sur notre structure ne pose pas de problème au vu de la géométrie utilisée et se fait de manière classique. Les conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) seront appliquées aux potentiels imposés dans la structure, typiquement le potentiel sur les électrodes du système. Sur les frontières extérieures de la structure, des conditions de Neumann, conditions naturelles de l'équation de Poisson avec la conservation de la valeur sur le gradient de la composante normale, seront appliquées. Les équipotentielles seront imposées normales à la surface du bord et physiquement cela revient à le « repousser » à l'infini (exemple Figure 22). La solution approchée peut alors être calculée aux nœuds du maillage par différentes méthodes variationnelles ou de minimisation de l'énergie.



### *c. Paramètre à maîtriser d'une simulation à l'autre : le maillage*

Le champ électrique a la particularité, contrairement au champ magnétique, d'être divergent (cf. équations de Maxwell-Gauss), ses lignes de champ ne sont pas fermées, elles divergent tout autour des sources. La valeur du champ peut en théorie tendre vers l'infini. D'un point de vue pratique, au-delà d'une certaine valeur, il faudrait prendre en compte d'autres phénomènes physiques comme l'injection de porteurs et la présence de charges d'espace qui limitent la valeur effective du champ.

Pour une même structure et de mêmes conditions d'application de potentiels, le paramètre principal influant sur la valeur calculée du champ électrique proche des zones de divergence est donc le maillage. En partie déterminées par les choix du concepteur, et en partie déterminées automatiquement par l'outil de simulation (maillage auto-adaptatif notamment aux frontières entre les sous-domaines), les caractéristiques du maillage (en particulier la taille minimale des mailles aux interfaces, aux points triples, ...) dépendent aussi de la géométrie de la structure. Par exemple, toute modification géométrique d'un angle et / ou d'une arête entraîne la génération d'un maillage qui sera différent d'une simulation à l'autre dans la zone où il y a eu cette modification. Pour contourner le problème et permettre une étude comparative de différentes structures, nous avons focalisé notre étude sur un type de géométrie donné, et opté pour un maillage fixe et de dimension de maille identique en tout point, comme nous le détaillerons ci-après.

## *II.2.2. Etude par éléments finis du module de puissance*

### *a. Définition de la structure considérée pour la simulation*

Afin d'étudier l'isolation électrique, le module de puissance est schématisé en 2D de manière simplifiée intégrant le substrat métallisé, le gel silicone encapsulant l'ensemble du module et les métallisations en cuivre, et le choix est fait de ne simuler sous Comsol qu'une partie de la structure (Figure 20). La partie schématisée est encadrée en pointillé rouge sur la Figure 20.

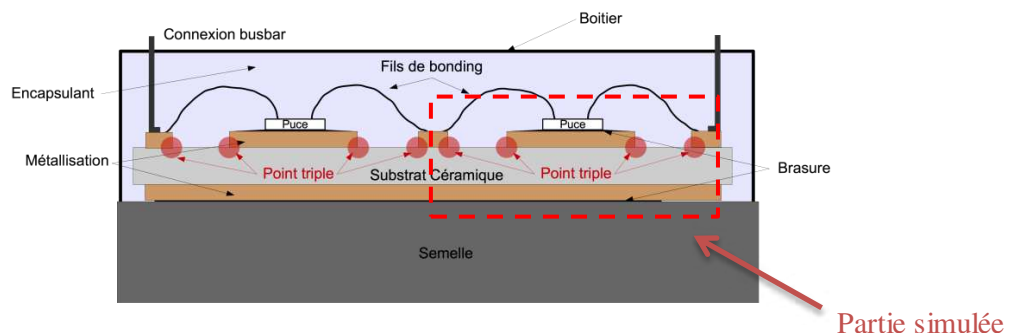
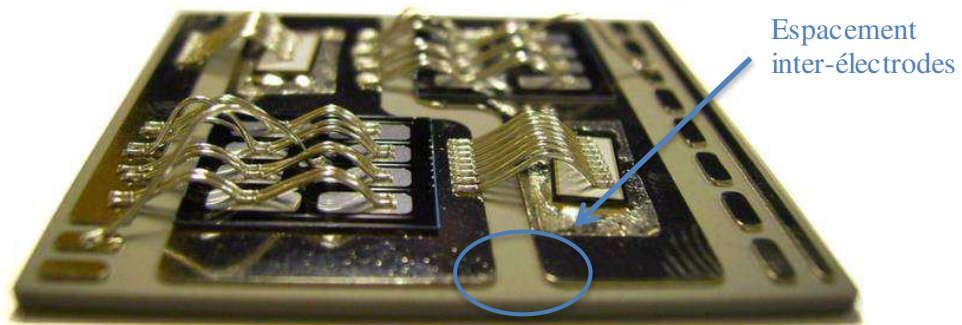


Figure 20 : Coupe schématique du module de puissance

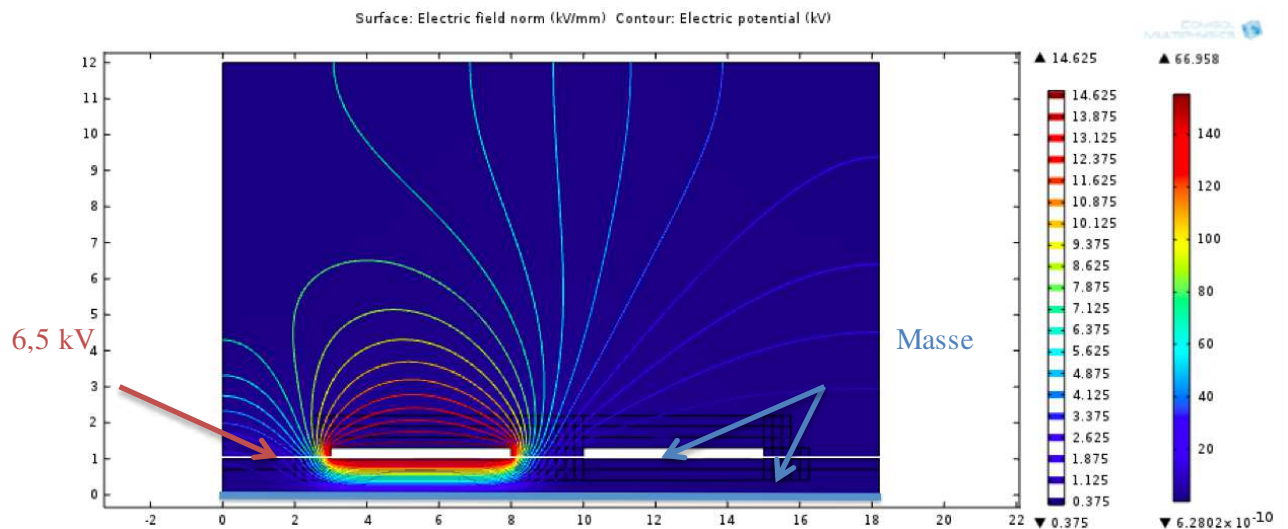
La distance entre les potentiels des émetteurs et les potentiels des collecteurs situés en face avant du substrat est généralement prise à 2 mm (Figure 21) pour les modules de puissance 6,5 kV [27]. Cet écartement inter-électrodes est suffisant pour ne pas induire plus de renforcement de champ électrique au niveau de la piste adjacente. En revanche, la distance entre les électrodes de la face inférieure et de la face supérieure est imposée par l'épaisseur du substrat céramique, qui est par exemple de 1 mm dans les modules de puissance 6,5 kV.



**Figure 21 : Image de deux ensembles de puces de puissance (transistors et diode) reportées sur un substrat AIN métallisé pour former un bras d'onduleur [32]**

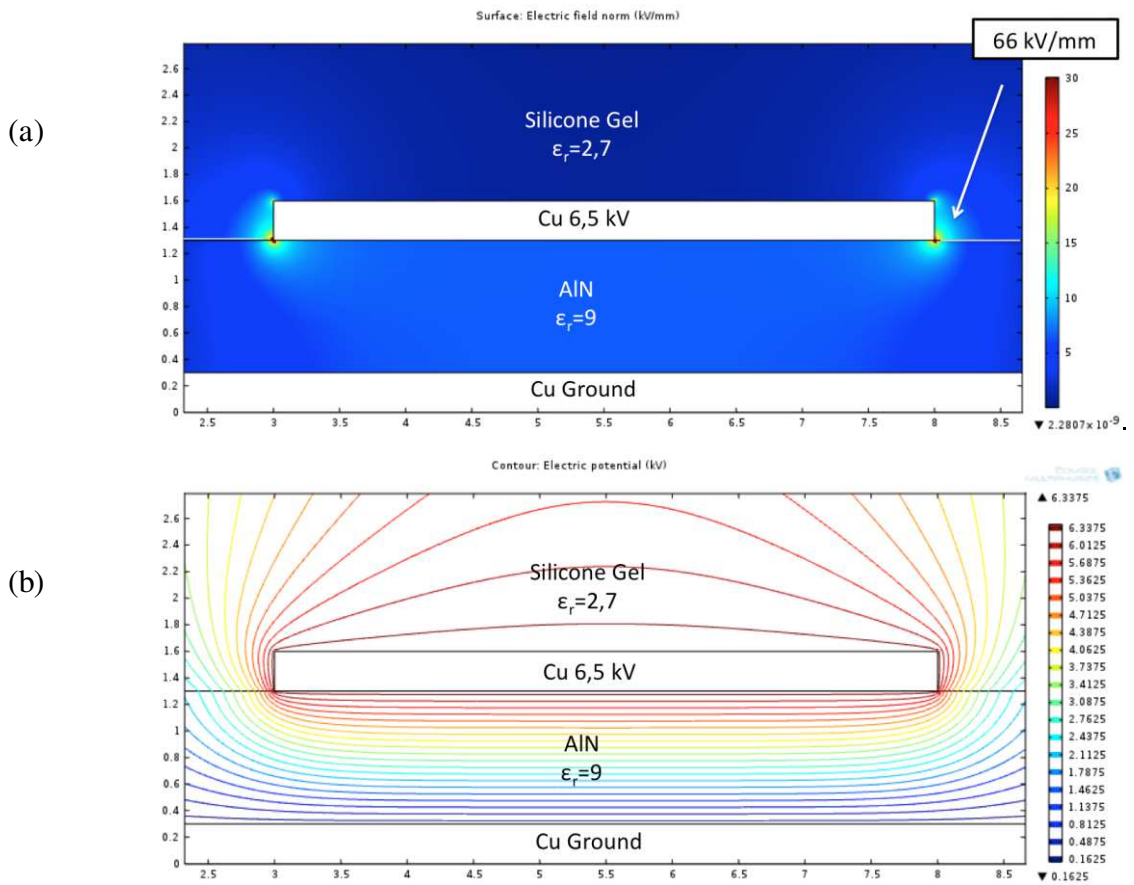
La Figure 22 représente un exemple de résultat de simulation montrant l'ensemble de la structure paramétrée sous Comsol. Cette « fenêtre » de simulation ( $18 \times 12 \text{ mm}^2$ ) est prise de manière suffisamment grande pour ne pas influencer les valeurs de champ électrique que l'on souhaite analyser par la suite. Les électrodes supérieures ont une longueur de 5 mm pour une épaisseur de 0,3 mm, l'espace inter-électrodes est de 2 mm et la distance entre les électrodes supérieures et le bord de la fenêtre de simulation est de 3 mm.

L'unique paramètre physique des matériaux pour cette étude en mode « electrostatics » est la permittivité relative de la céramique et du gel silicone, respectivement prise égale à 9 et 2,7.



**Figure 22 :** « Fenêtre » de simulation sous Comsol Multiphysics. Cartographie du champ électrique et des équipotentiels dans une structure substrat DBC (application de 6,5 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse – substrat de 1 mm)

Le champ électrique sera, dans la suite du manuscrit, cartographié en dégradé de couleurs sur l'ensemble de la structure comme le montre la Figure 23 (a), les champs électriques les plus élevés correspondent aux couleurs les plus chaudes et les plus faibles champs aux couleurs plus froides. Les lignes équipotentiels seront elles représentées par des lignes comme sur la Figure 23 (b). Et ces représentations du champ électrique et des lignes équipotentiels se trouvent superposées sur chaque simulation comme sur la Figure 22.

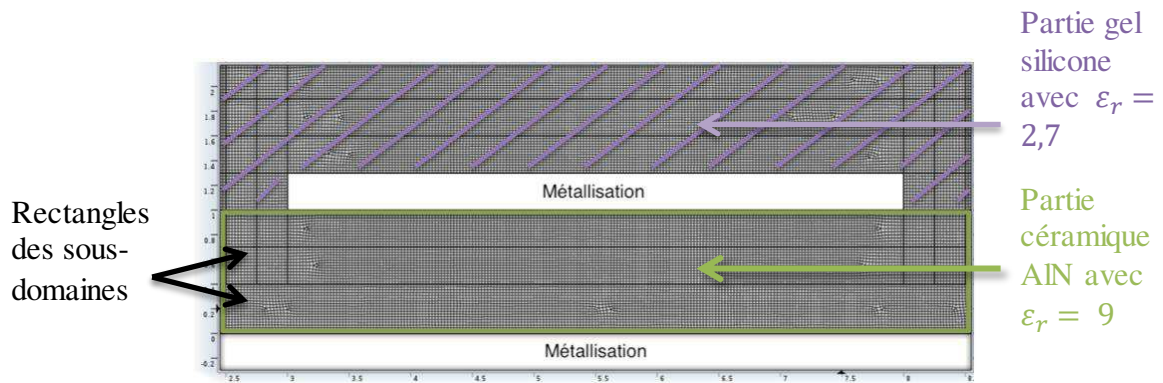


**Figure 23 : Simulation Comsol Multiphysics : (a) répartition du champ électrique (kV/mm) en dégradé de couleurs et (b) répartition des lignes équipotentielles (de 0 à 6,5 kV) dans une structure substrat DBC (application de 6,5 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure à la masse – substrat de 1 mm)**

### *b. Définition de la méthode et des paramètres du maillage retenus*

Le type de maillage choisi pour la simulation est construit à partir de plusieurs rectangles, lesquels sont discrétisés à l'aide d'éléments de forme quadrilatérale, comme le montre la Figure 24. La taille des mailles de type quadrilatère est fixe et constante dans toute la structure.

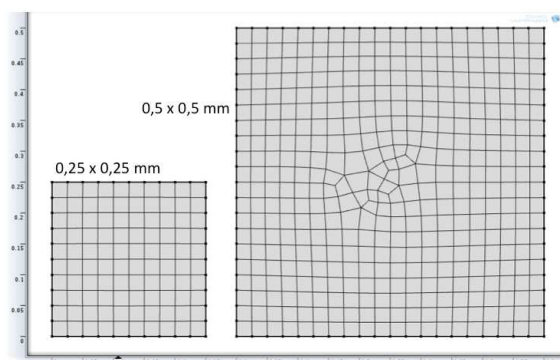
Les rectangles représentés en traits gras sont des sous-domaines permettant de fixer le maillage au préalable afin d'anticiper les différentes géométries qui seront simulées. Pour changer la géométrie, et en fonction de la structure voulue, chaque rectangle se verra donc attribuer une valeur de permittivité correspondant au type de matériau qui le compose (substrat AlN :  $\epsilon_r = 9$ , ou gel silicone :  $\epsilon_r = 2,7$ ).



**Figure 24 : Structure entièrement formée de rectangles et chaque rectangle se voit associer une permittivité relative. Maillage généré par le logiciel**

Dans le but de ne pas générer de calculs inutiles, les parties métallisées de la structure ne sont pas maillées puisqu'elles sont considérées comme parfaitement conductrices et sont donc des équipotentielles pour nos équations).

Remarque : malgré le contrôle de la séquence de création du maillage sur une structure uniquement composée de rectangles, des problèmes de distorsions apparaissent qui ressemblent à des « nœuds » comme on peut l'observer sur la Figure 25. Ces distorsions sont d'autant plus visibles en mode quadrilatéral par la génération du maillage dans deux carrés de dimensions  $0,25 \times 0,25 \text{ mm}^2$  et  $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$ . Il est possible de contourner le problème en corrigeant localement ces distorsions par un mode spécifique (« *Copy domain* ») qui permet de copier une zone de maillage régulière sur une zone non régulière.



**Figure 25 : Exemple du maillage généré par le logiciel dans deux carrés de tailles différentes, avec présence d'une distorsion dans le carré le plus grand**

Nous avons donc fait le choix de générer un maillage carré fixe sur une structure construite de plusieurs rectangles permettant à la fois de modifier la géométrie de notre substrat, sans modifier le nombre et la taille des mailles et de pouvoir comparer le résultat du champ en tout point, en particulier au point triple (ces rectangles servant à la maîtrise du



maillage vont apparaître sur certaines figures par la suite). Dans cette première approche, nous considérerons donc des structures de métallisation et de substrat de forme idéalisée, parallélépipédique. Nous pourrions ainsi étudier le réel impact de toute modification du système d'isolation étudié sur l'intensité du champ électrique à l'emplacement même du point triple.

### c. Influence du maillage sur la valeur du champ électrique

La valeur du pic de champ électrique délivrée par le logiciel au point triple n'est pas représentative de la valeur du champ électrique maximal réel dans la structure. Elle est dépendante du maillage et à mesure que le maillage se resserre, cette valeur augmente, comme nous l'avons déjà évoqué, et comme illustré par la Figure 26 comparant le résultat obtenu pour deux finesses de maillage différentes. Les valeurs obtenues pour le champ maximal sont de 50 kV/mm et de 67 kV/mm, soit un écart relatif important entre les deux simulations (environ 30 %). Cependant, grâce à notre méthode qui fixe le maillage et à la géométrie des structures étudiées, l'évolution de la valeur simulée du pic de champ à l'endroit du point triple sera bien représentative de l'influence des différents paramètres variables étudiés. Nous avons choisi des mailles carrées de taille fixée à  $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ , car cette taille est suffisamment représentative pour notre géométrie.

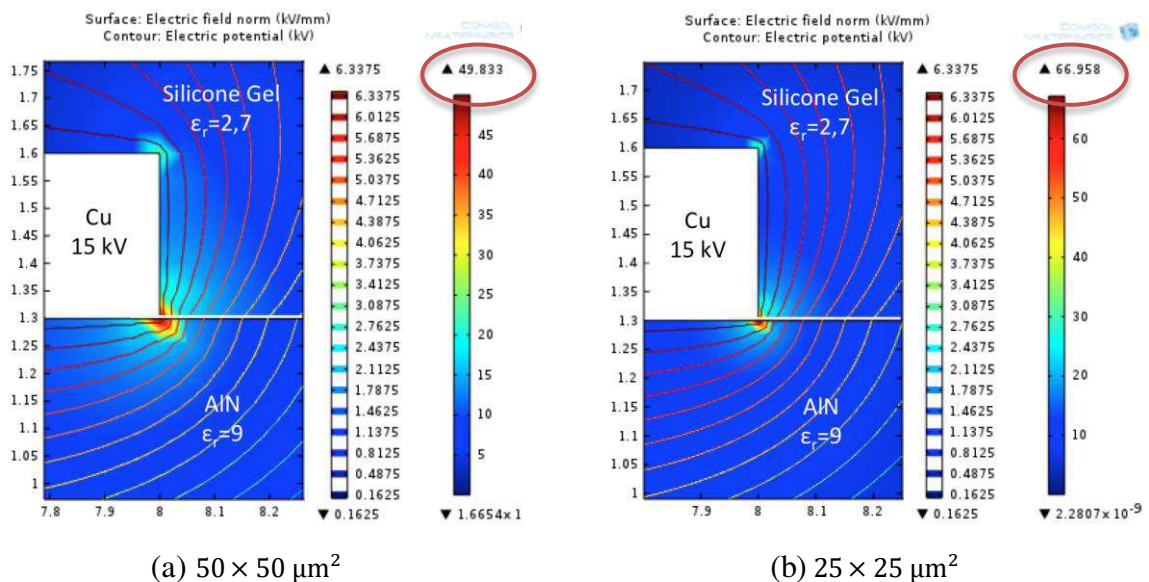


Figure 26 : Répartition du champ électrique (kV/mm) pour deux tailles de mailles : (a)  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  et (b)  $25 \times 25 \mu\text{m}^2$

Signalons pour complément que Bayer *et al.* proposent une autre stratégie, permettant de comparer des valeurs de champ de manière rigoureuse, laquelle consiste à « s'éloigner du point triple ». Cette étude présente une méthode d'évaluation du champ électrique indépendante du maillage par l'établissement de quatre points de mesure (MP1 à MP4), comme présenté en Figure 27. Ces points se trouvent suffisamment loin des arêtes pour que la résolution du maillage n'ait plus d'influence sur la valeur du champ électrique. Le niveau du champ électrique calculé par simulation a été relevé le long des lignes de mesures (ML1 à ML4) et ce pour trois différentes tailles de mailles. Bayer *et al.* concluent qu'à partir d'une certaine distance du point triple noté MP1 à MP4, la valeur du champ n'est plus dépendante du maillage. La Figure 28 représente les courbes du champ électrique figurant sur la ligne de mesure ML1 pour trois résolutions de maillages triangulaires. Dans ces conditions de simulation (pour une application de 10 kV sur l'électrode supérieure et l'électrode inférieure à la masse), un point de mesure ML1 se trouvant au delà de 25  $\mu\text{m}$  du point triple, garantit une valeur indépendante du maillage pour la géométrie et la gamme de maillage considérée (notamment la taille maximale de la maille utilisée pour la comparaison).

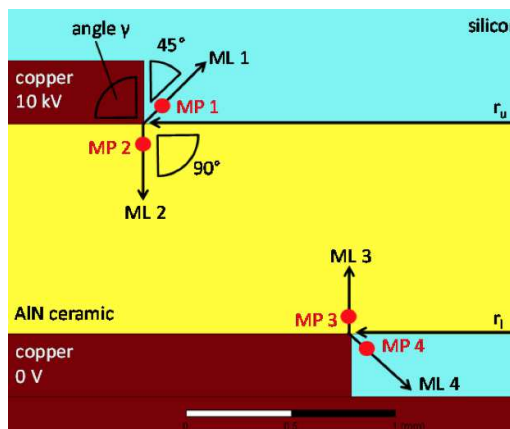


Figure 27 : Représentation schématique du bord du module, des 4 lignes de mesures (ML1 à ML4) et des 4 points de mesures (MP1 à MP4) [33]

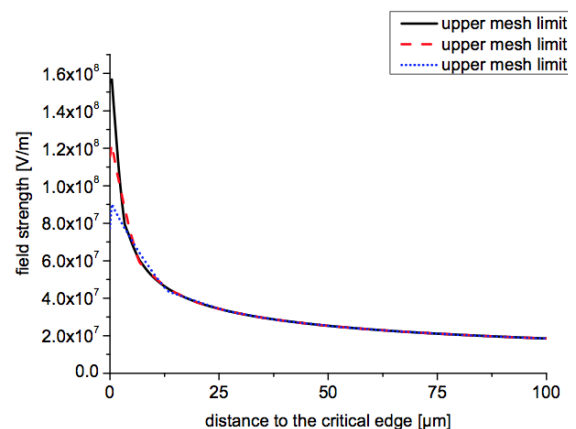


Figure 28 : Courbe du champ électrique le long de ML1 pour trois tailles de mailles triangulaires différentes [33]

Cette méthode est particulièrement intéressante pour s'affranchir du paramètre de résolution du maillage et pour réaliser une étude géométrique de la métallisation, par exemple, un profil de gravure spécifique, car elle permet de comparer l'intensité du champ électrique en plusieurs points donnés (ML1 à ML4 par exemple). Ainsi, si le point donné est suffisamment éloigné de la zone de modification, la valeur de la grandeur simulée n'est pas influencée.

## II.3. Étude d'une structure avec mesa pour la réduction du champ au point triple sous 15 kV

### II.3.1. Définition de la structure de référence

Nous avons focalisé notre travail sur la partie substrat céramique utilisé dans l'isolation des modules de puissance (cf. Chapitre I). L'épaisseur minimale du substrat est imposée par la tension d'isolation visée et dépend de la rigidité diélectrique du matériau. Pour les modules de forte puissance et de calibre en tension de 3,3 kV et plus, le nitrure d'aluminium (AlN) est le matériau qui offre le meilleur compromis de conductivité thermique [34] et d'isolation électrique. En pratique pour la plupart des fabricants, l'épaisseur du substrat employé est de 0,63 mm pour des tensions allant de 1,7 à 3,3 kV et de 1 mm pour les modules de 6,5 kV. Aujourd'hui, l'épaisseur maximale disponible aux catalogues pour le substrat AlN est de 1 mm [35], des épaisseurs plus importantes sont possibles mais cela dégraderait la conduction thermique de l'ensemble.

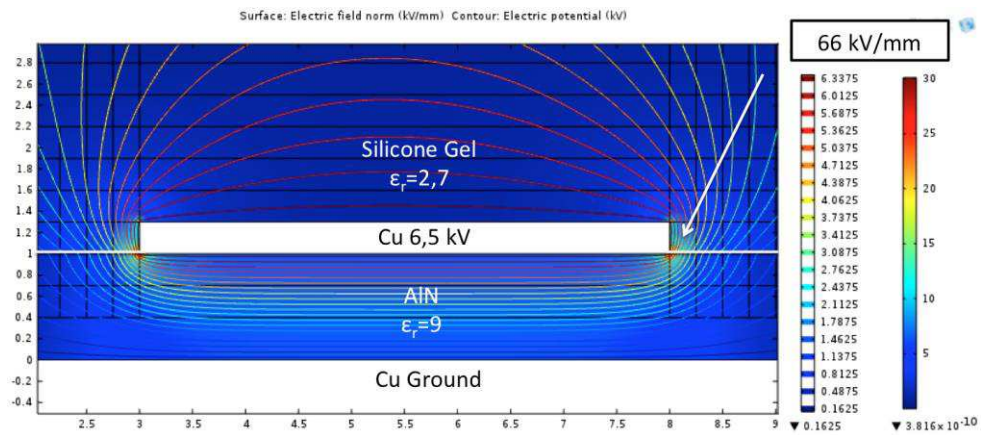
#### a. Simulation en mode « electrostatics »

Notre étude par simulation en éléments finis (en mode électrostatique avec un maillage fixé) d'un substrat AlN d'épaisseur 1 mm et de métallisation Cu de 300  $\mu\text{m}$  et polarisé sous 6,5 kV, révèle une valeur de champ électrique maximale dans la zone du point triple :

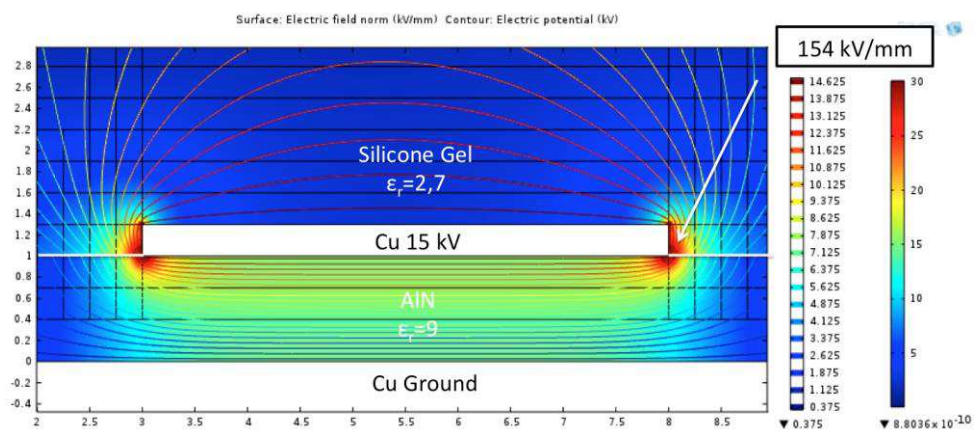
- de **66 kV/mm** (maximum indiqué en Figure 29) localisée dans la partie substrat
- et de **52 kV/mm** dans la partie gel silicone.

Ce sont **ces valeurs de champ électrique maximal que nous choisirons comme référence**, obtenues sur la structure usuelle d'un module de puissance de 6,5 kV à IGBT Si, dans nos conditions de simulation (géométrie et résolution du maillage).





**Figure 29 : Cartographie du champ électrique et des équipotentiels sur une structure conventionnelle (application de 6,5 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse – substrat de 1 mm)**



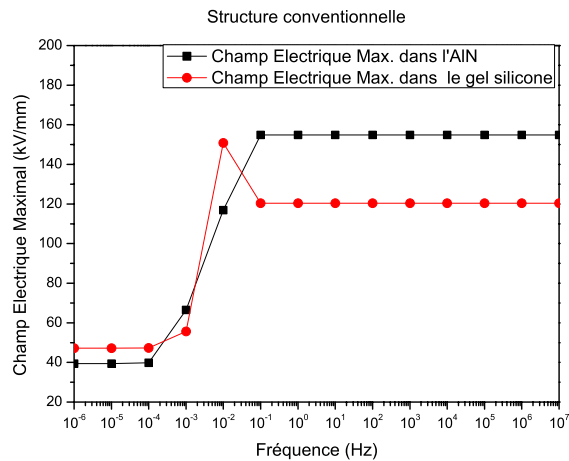
**Figure 30 : Cartographie du champ électrique et des équipotentiels sur une structure conventionnelle (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse – substrat de 1 mm)**

Si l'on applique à la structure conventionnelle de la Figure 29, un potentiel non plus de 6,5 kV mais de 15 kV, le champ électrique maximal obtenu dans la zone du point triple devient 154 kV/mm (Figure 30) localisé dans la partie substrat et de 120 kV/mm dans la partie gel silicone. Selon cette comparaison, le passage de 6,5 kV à 15 kV correspond à une élévation de + 130 % du champ électrique maximal par rapport à la référence pour un même maillage.

#### *b. Influence de la fréquence à permittivité et conductivité fixée*

Un facteur à considérer est la fréquence de la polarisation appliquée. Pour simuler l'influence de la fréquence sur les valeurs de champ électrique en structure conventionnelle, le paramètre conductivité électrique doit être pris en compte pour le matériau encapsulant et

le substrat. En considérant par exemple des valeurs de  $\sigma_{\text{Gel silicone}} = 10^{-12} \text{ S/m}$  et  $\sigma_{\text{AlN}} = 10^{-13} \text{ S/m}$  respectivement pour le gel et la céramique, les valeurs de champ électrique obtenues par simulation sont identiques à celles obtenues en mode électrostatique pour des fréquences supérieures à  $10^1 \text{ Hz}$  (respectivement 154 kV/mm dans la partie substrat et 120 kV/mm dans la partie gel silicone), tel que montré sur la Figure 31 où les résultats de simulation par éléments finis ont permis de relever les valeurs maximales des champs électriques dans la céramique et dans l'encapsulant.



**Figure 31 : Valeurs du champ électrique maximal dans la partie AlN et dans la partie encapsulant en fonction de la fréquence. Application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et l'électrode inférieure sont à la masse.**

Dans cette configuration, pour des fréquences basses inférieures à  $10^{-4} \text{ Hz}$ , seule la conductivité influe sur la répartition du champ électrique entre les différents matériaux. On observe une transition correspondant aux changements de valeurs du champ électrique sur une gamme de fréquence (allant de  $10^{-4} \text{ Hz}$  à  $10^{-1} \text{ Hz}$ ) qui implique que le paramètre conductivité n'entre plus en jeu pour des fréquences supérieures à  $10^{-1} \text{ Hz}$ , seule la permittivité compte dans la répartition du champ et les valeurs sont alors les mêmes que lorsque les simulations sont réalisées en mode électrostatique.

Cependant, ces simulations ne sont pas représentatives du comportement des matériaux en fréquence, car ils ont eux mêmes des paramètres variables (permittivités et conductivités) en fonction de la fréquence mais aussi en fonction du champ électrique, de la température, de la pression et ainsi que d'autres paramètres de moindre importance. Or dans le cas présent, les permittivités et conductivités ont été rentrées dans le logiciel de manière fixe.

### II.3.2. Proposition d'une solution par structure de type mesa

L'objectif est de créer une structure qui puisse améliorer la répartition du champ électrique au niveau du point triple. C'est pourquoi nous proposons une action sur le substrat par une modification géométrique de type mesa.

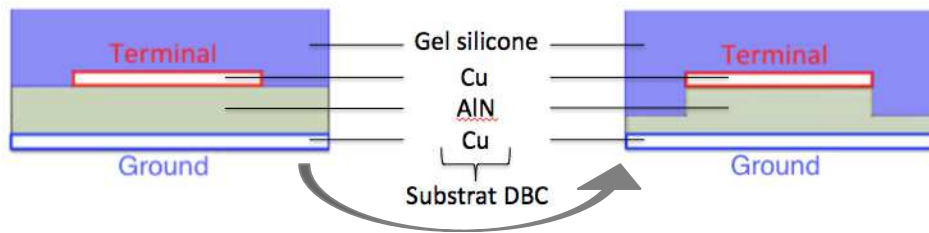


Figure 32 : Modification de la structure conventionnelle en structure mesa

La Figure 32 montre une modification de la structure par la création d'une géométrie mesa (en plateau), pour laquelle l'extrémité de la métallisation Cu affleure le flanc vertical formé dans la céramique. Pour cette nouvelle configuration, simulée avec les mêmes paramètres que précédemment et pour une tension de 15 kV, un champ électrique maximal de 65 kV/mm localisé dans la partie gel silicone (38 kV/mm dans le substrat) est par exemple obtenu pour une hauteur du flanc d'AlN de 0,6 mm, comme le montre la Figure 33. Ceci signifie que la contrainte au point triple est considérablement réduite (diminution du champ électrique maximal de 57 % dans cet exemple) par rapport à celle de la structure conventionnelle en Figure 30 (154 kV/mm). La localisation du champ électrique maximal est déplacée et sera étudiée par la suite.

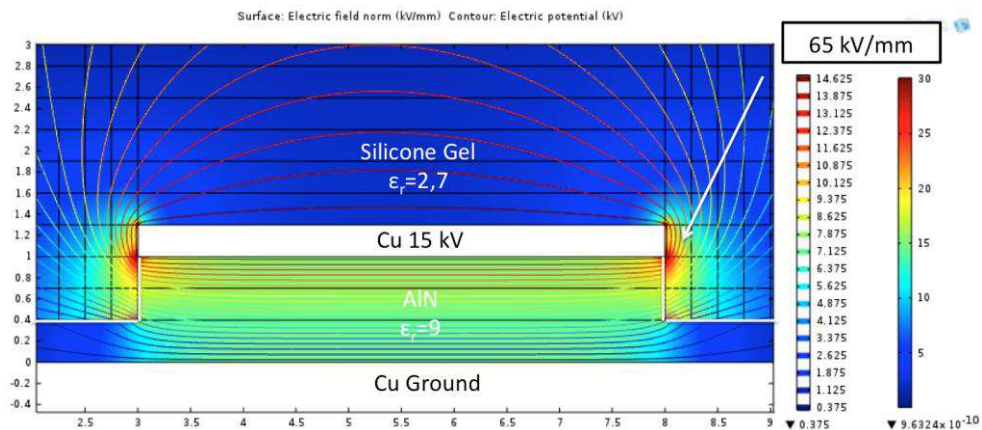
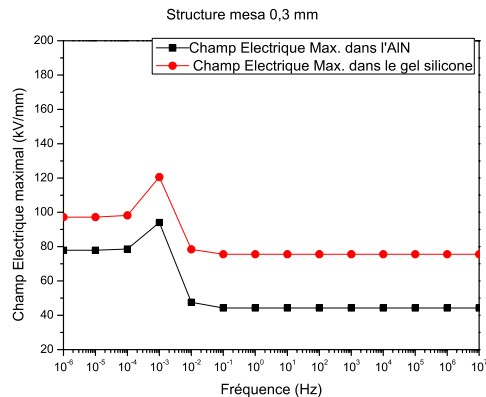


Figure 33 : Cartographie du champ électrique et des équipotentielles sur une structure substrat DBC de géométrie mesa 0,6 mm (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieures droite et inférieure sont à la masse – substrat de 1 mm)

Si l'on considère un balayage en fréquence pour la structure mesa avec des conductivités de mêmes valeurs que précédemment pour la structure conventionnelle ( $10^{-12}$  S/m pour le gel et de  $10^{-13}$  S/m pour la céramique), les valeurs de champ électrique obtenues par simulation sont identiques à celles obtenues en mode électrostatique pour des fréquences supérieures à  $10^{-1}$  Hz (Figure 34).



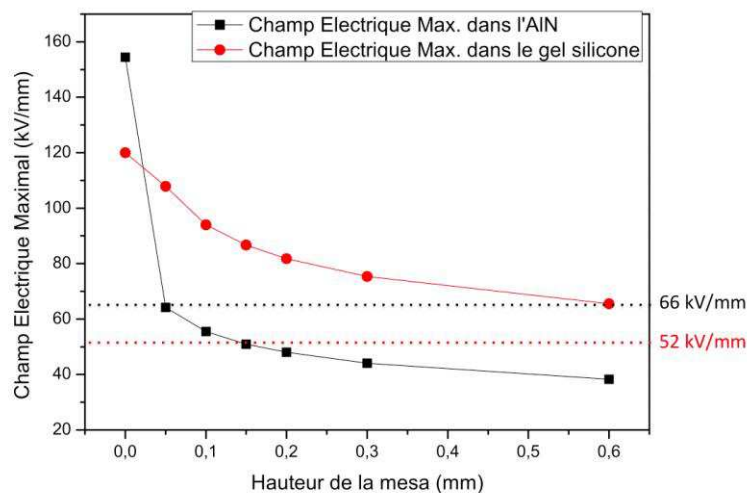
**Figure 34 : Simulation en fréquence des valeurs maximales du champ électrique maximal dans la partie AlN et dans la partie encapsulant en fonction de la fréquence (application de 15 kV)**

L'autre constatation de cette figure est que dans le cas de la structure mesa, on obtient des valeurs de champ électrique supérieures en continu par rapport aux hautes fréquences. Ce résultat est lié au déplacement de la contrainte maximale initialement au point triple et dans la céramique vers l'encapsulant qui a une meilleure conductivité. La structure mesa permet une contrainte en champ réduite sur les isolants à n'importe quelle fréquence (si on compare les Figure 31 et Figure 34) et améliore davantage cette réduction de champ pour des fréquences supérieures à  $10^{-1}$  Hz.

#### *a. Influence du paramètre hauteur de la mesa*

L'effet bénéfique apporté par une géométrie mesa sur l'intensité du champ électrique maximal de la structure étant montré dans l'exemple précédent, d'autres hauteurs de mesa ont été simulées, allant de 0 à 0,6 mm, dans l'épaisseur d'un substrat de 1 mm, afin d'évaluer l'effet de la hauteur de la mesa sur le pic champ au niveau du point triple. L'objectif étant de connaître la limite de réduction de l'intensité du champ électrique que nous pouvons obtenir sur une géométrie mesa. La Figure 35 représente deux courbes d'intensité de champ électrique maximal, l'une relevée dans la partie gel silicone (courbe en rouge) et l'autre dans la partie substrat AlN (courbe en noir) en fonction de la hauteur de la mesa. La tendance de ces deux courbes montre que la relation entre le champ électrique maximal au niveau du

point triple en fonction de la hauteur de la mesa est fortement décroissante pour les petites hauteurs de mesa (inférieures à 100  $\mu\text{m}$  et ce quel que soit le maillage), puis devient plus faiblement décroissante lorsque la hauteur de la mesa augmente. Ceci nous permet de montrer qu'une diminution du champ électrique au point triple peut être obtenue, et ce même avec une faible hauteur de mesa, en particulier pour la contrainte électrique sur la céramique. En effet, pour une géométrie conventionnelle, le pic de champ maximal au niveau du point triple se trouve être dans la partie substrat céramique. Dès qu'une géométrie de type mesa est mise en place, l'intensité du champ électrique que doit supporter le substrat chute considérablement. La contrainte maximale est alors reportée sur le gel mais cette contrainte sur le gel présente aussi une amplitude décroissante à mesure que la hauteur de la mesa augmente.



**Figure 35: Valeur du champ électrique maximal relevée dans le gel silicone et dans le substrat en fonction de la hauteur des mesas. Application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse**

Nous pouvons conclure que d'un point de vue électrique, la contrainte baisse significativement et très rapidement en fonction de la hauteur de mesa. Ceci est d'autant plus vrai dans la céramique où dès 50  $\mu\text{m}$ , le champ électrique avec une structure mesa est inférieur au champ simulé pour la structure de référence (66 kV/mm, indiqué par un trait en pointillé noir en Figure 35). Une hauteur optimale pour la structure mesa serait de 0,3 mm, ce qui permettrait un gain significatif sur la contrainte du champ électrique à la fois pour le matériau céramique comme pour le gel silicone. On peut supposer qu'au-delà de 0,3 mm, on augmenterait le risque de fragiliser mécaniquement la céramique, car elle constitue le socle sur lequel va reposer une association de métallisations / puces / fils de bonding.

Le corolaire à ce gain significatif dans la céramique est de disposer d'un matériau encapsulant à forte rigidité diélectrique. En effet, comme nous pouvons l'observer sur la Figure 35, la contrainte électrique s'est « reportée » sur l'encapsulant et le champ maximal dans l'encapsulant est toujours supérieur au champ de référence (52 kV/mm, voir trait en pointillé rouge) pour un module 6,5 kV. Mais comme nous le présentons dans la suite, cette contrainte maximale ne se situe plus dans la même configuration géométrique.

#### *b. Répartition du champ électrique pour une structure mesa*

La nouvelle géométrie du substrat permet une meilleure répartition des équipotentielles et modifie la localisation des points de contrainte. Sur une structure conventionnelle polarisée à 15 kV (Figure 36 (a)), la contrainte se situe au niveau des angles de l'électrode (cercles en rouge) et le plus grand renforcement de champ, 154 kV/mm, se situe au niveau du point triple dans la partie substrat (120 kV/mm dans la partie gel silicone), qui se situe elle-même au pied de l'électrode métallique. Quant au champ électrique à l'arrête haute de l'électrode, il est de l'ordre de 72 kV/mm. Dans le cas de la structure mesa (Figure 36 (b)), on observe trois points de contraintes (cercles en rouge) aux extrémités de l'électrode (A et B) et au pied de la mesa (congé en C). Pour cet exemple (hauteur de la mesa de 0,3 mm), on constate que la valeur du champ électrique à l'extrémité haute de l'électrode (A) est de 68 kV/mm, à l'extrémité basse (B), la valeur de champ maximal est de 75 kV/mm correspondant au point triple dans la partie gel silicone (44 kV/mm dans la partie AlN) et dans le congé au pied de la mesa (C), la valeur du champ atteint 41 kV/mm.



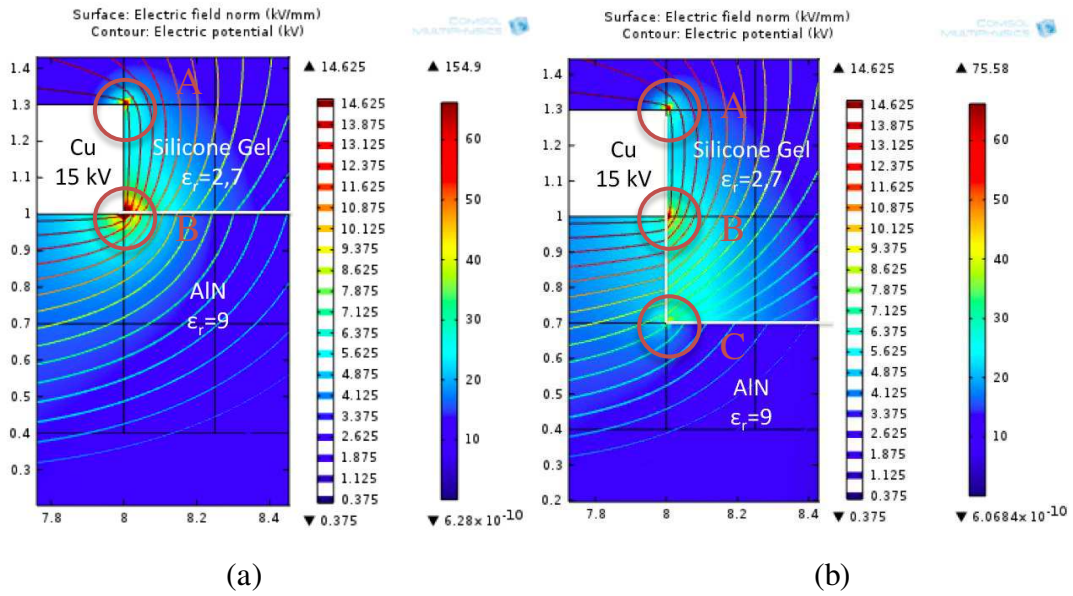


Figure 36 : Localisation des renforcements du champ électrique dans les (a) « Structure conventionnelle » et (b) « Structure mesa ». Application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse. En noir les rectangles servant à modifier la géométrie sans modifier le maillage

Pour mieux visualiser la manière dont se répartit le champ électrique tout au long du bord de la mesa, nous avons relevé les valeurs de champ sur une ligne de coupe verticale (représentée en noir (a), rouge (b) et bleu (c) sur la Figure 37) pour les différentes hauteurs de mesa (sans mesa (a), mesa hauteur de 0,3 mm (b), mesa hauteur de 0,6 mm (c)), commençant dans la partie substrat (axe x = 0), continuant le long de la mesa et finissant le long de l'électrode supérieure (axe y de 0 à 1,3 mm).

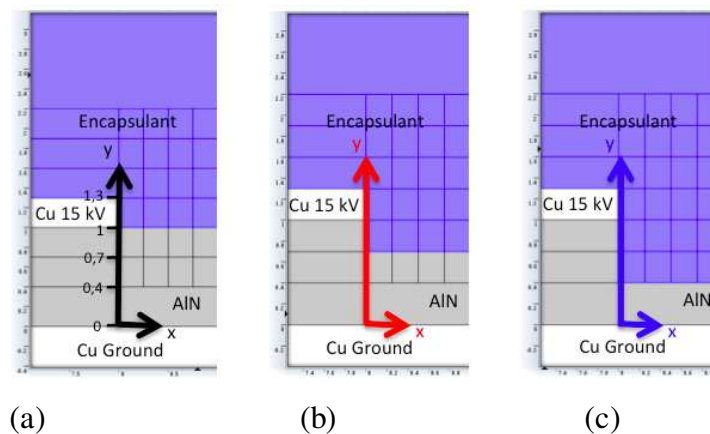
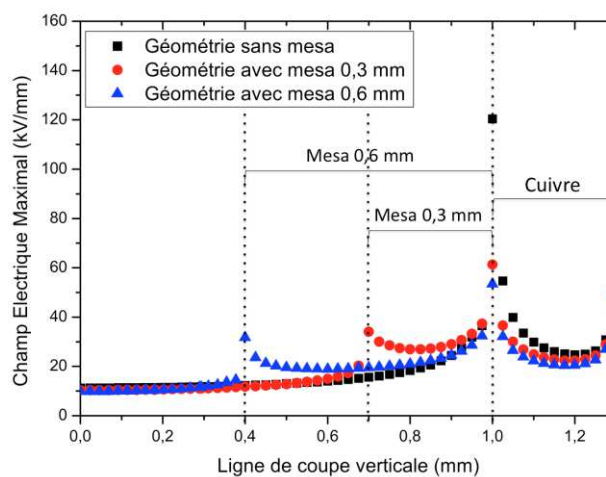


Figure 37 : Lignes de coupe suivant l'axe y prises pour 3 cas de configurations, (a) sans mesa, (b) avec mesa de 0,3 mm et (c) avec mesa de 0,6 mm

La Figure 38 représente les valeurs relevées par simulation de champs électriques sur les lignes de coupe (axe y) suivant ces trois configurations. On observe dans les trois cas de

figure des pics de champ qui correspondent à la jonction d'au moins deux matériaux. Le pic de champ correspondant à l'emplacement du point triple est évidemment le plus intense en configuration sans mesa mais il est atténué par le changement de géométrie en mesa. La configuration mesa permet une meilleure répartition du champ et par conséquent une atténuation de son intensité tout au long du bord de la mesa.

Remarque : les valeurs de champs de cette Figure 38 sont effectivement différentes des valeurs maximales annoncées précédemment (Figure 35, 154 kV/mm sans mesa, 75 kV/mm pour une mesa de hauteur 0,3 mm et 65 kV/mm pour une mesa de hauteur 0,6 mm) car elles sont prises le long des lignes de coupe or le maximum ne se trouve pas sur les lignes mais à proximité en fonction des sommets des polygones du maillage.



**Figure 38 : Variation du champ électrique relevé sur les lignes de coupes pour 3 cas de configurations, sans mesa, avec mesa de 0,3 mm et avec mesa de 0,6 mm**

La structure mesa abaisse la contrainte électrique au niveau de la céramique et déplace la contrainte sur l'encapsulant. Néanmoins, le champ maximum dans l'encapsulant (Figure 36, cercle B) ne se situe plus dans des zones où risquent d'être présents des défauts tels que des bulles d'air formées aux pieds des reliefs lors de l'élaboration de l'encapsulation. De plus, la réalisation de la structure mesa peut permettre de supprimer les protubérances métalliques en périphérie d'électrode. Ainsi, du point de vue des décharges partielles, la structure mesa devrait permettre d'augmenter leur seuil d'apparition, grâce à des champs électriques plus faibles dans les zones sensibles, ou grâce à la réduction des défauts au niveau de la zone du point triple (le cas échéant).



### c. Influence du paramètre largeur de la gorge autour de la mesa

Après avoir évalué la hauteur optimale, nous avons procédé à l'analyse de la largeur de la gorge de la structure mesa, dans le but d'optimiser sa forme géométrique. En effet, les bords de l'électrode peuvent être complètement dégagés jusqu'à l'électrode adjacente. Une autre solution est d'optimiser la largeur des gorges, permettant d'enlever moins de matière.

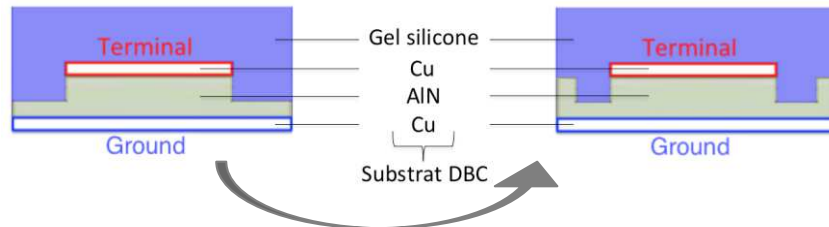


Figure 39 : Modification de la largeur de la gorge de la structure mesa

Toujours dans les mêmes conditions de simulation, si l'on applique un potentiel de 15 kV à la structure en mesa pour une hauteur de 0,3 mm, le champ électrique maximal obtenu dans la zone du point triple est de 75 kV/mm dans les conditions de bords dégagés. On constate que suivant la largeur de la mesa simulée en Figure 40, la répartition des équipotentiels n'est plus influencée au-delà d'une certaine largeur de gorge (Figure 41). Le champ électrique au niveau du point triple devient constant en fonction de la largeur de gorge à partir de 0,5 mm.

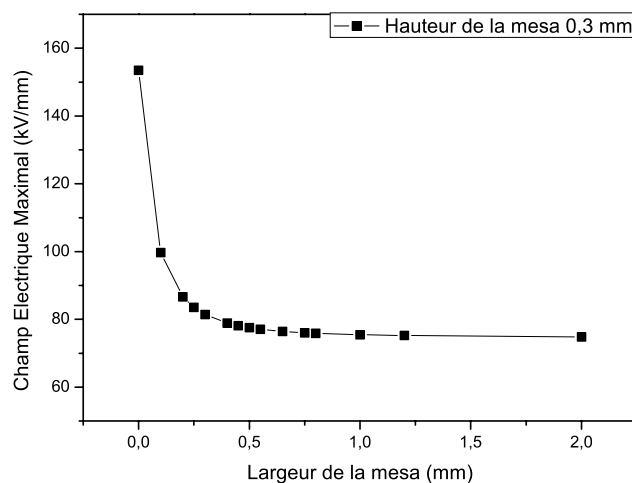
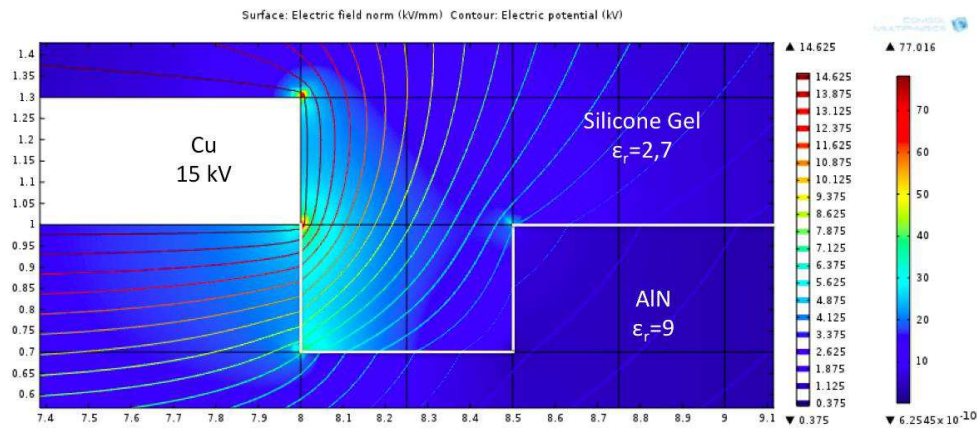


Figure 40 : Variation du champ électrique maximal au niveau du point triple en fonction de la largeur de la mesa – Mesa de hauteur 0,3 mm. Application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse



**Figure 41 : Cartographie du champ électrique et des équipotentiels sur une structure mesa de 0,3 mm en forme de gorge de largeur 0,5 mm (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse)**

#### *d. Influence des pentes des bords de la métallisation et de la mesa*

L'étude précédente a été réalisée dans le cadre d'une géométrie parfaite, avec l'électrode rectangulaire et les bords de mesa verticaux. Sachant que l'intensité du champ électrique peut être influencée par la variation de la pente du bord de la métallisation lors de la gravure ou de la mesa lors de la mise en œuvre, nous allons étudier l'influence de ces paramètres. Nous avons réalisé deux simulations, l'une pour laquelle l'angle de la pente de la métallisation en cuivre augmente tandis que la pente verticale de la mesa ne change pas et l'autre inversement, pour laquelle l'angle de la pente de la mesa croît tandis que la pente verticale de la métallisation reste inchangée.

La hauteur de la mesa choisie pour cette configuration est de 0,3 mm dans 1 mm d'épaisseur de substrat AlN. Le maillage généré dans ce domaine est cette fois triangulaire et de dimensions de mailles identiques, plus adapté à la géométrie proposée. Par conséquent, les valeurs de champ électrique générées dans ces conditions sont comparables uniquement entre elles et non avec les simulations précédentes. La tension d'application est la même que pour les simulations précédentes, de 15 kV sur l'électrode supérieure et avec l'électrode inférieure à la masse.

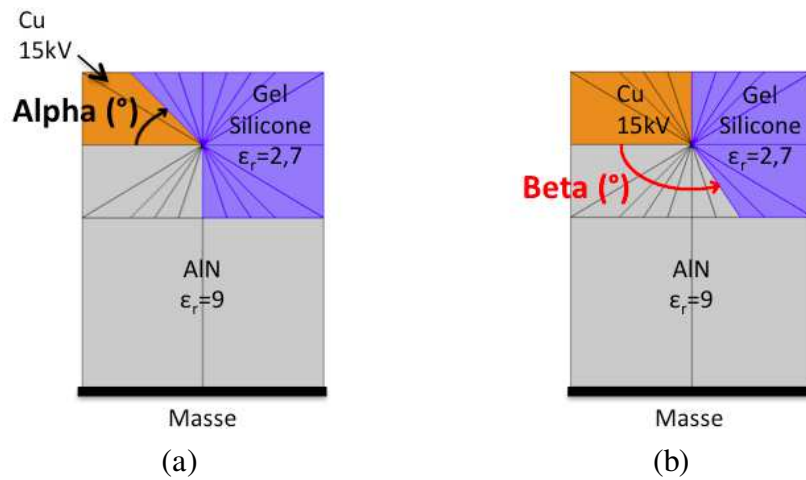
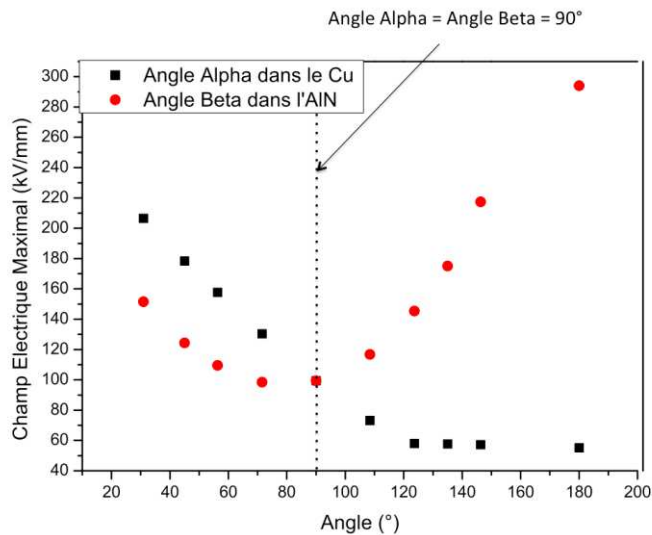


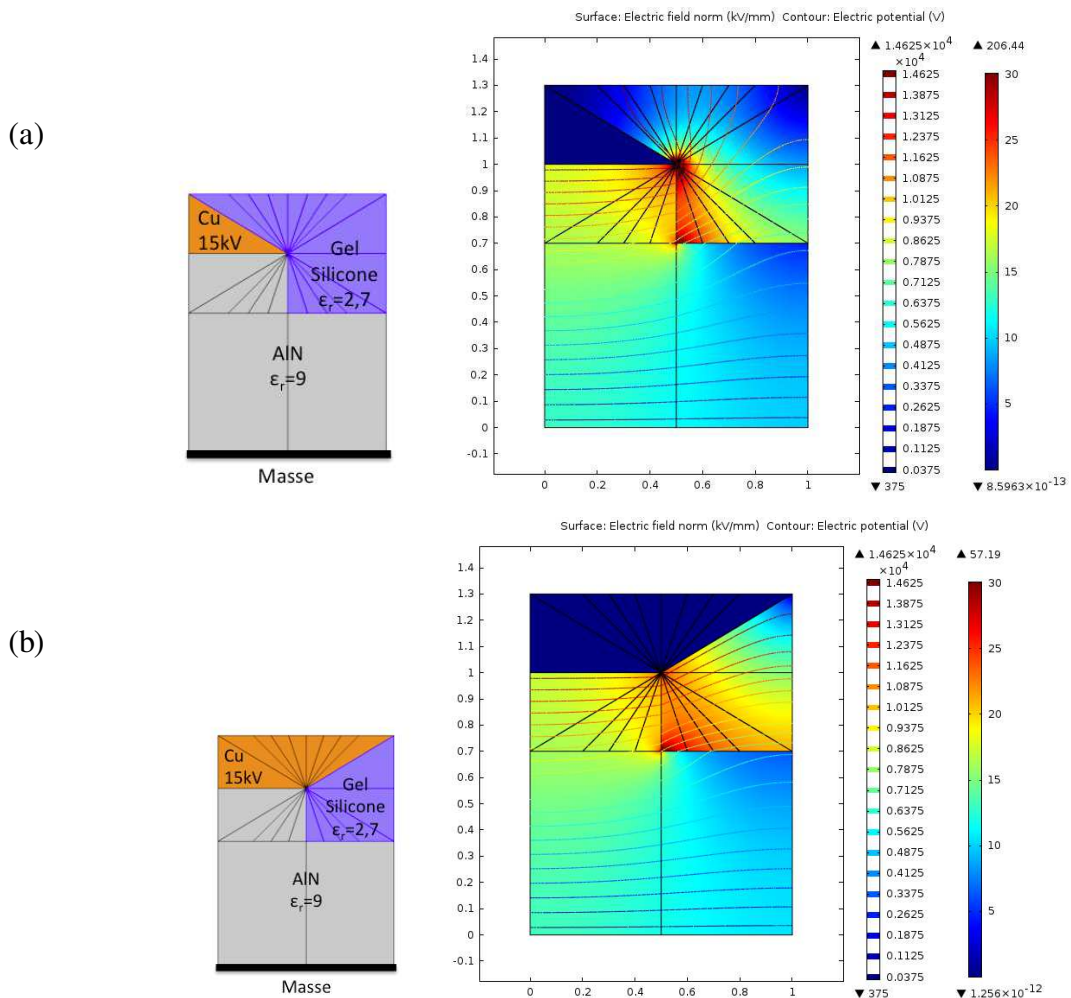
Figure 42 : Schéma de configuration des deux simulations : (a) l'angle de la partie cuivre croît tandis que le reste de la configuration est fixe, (b) l'angle de la partie mesa croît tandis que le reste de la configuration est fixe

Dans le premier cas de simulation, seul l'angle de la métallisation croît (en prenant 10 valeurs de  $20^\circ$  à  $180^\circ$ ) (représenté en noir Figure 42 (a)) et la pente de la mesa est fixe à  $90^\circ$ . La valeur du champ électrique relevée pour les différentes valeurs de l'angle Alpha est représentée sur la courbe en noir de la Figure 43. Les premières valeurs d'angle Alpha donnent à la métallisation une forme de pointe, la valeur du champ électrique relevée est alors inévitablement forte. A mesure que l'angle Alpha augmente, cet effet de pointe diminue jusqu'à sa disparition totale et le champ électrique diminue jusqu'à une certaine valeur minimale qui est atteinte autour de la valeur Alpha  $120^\circ$ . On remarque en Figure 44 (a), que pour une valeur d'angle de métallisation Alpha de  $30,96^\circ$ , les lignes équipotentielles se resserrent par effet de contournement de la pointe ce qui implique une valeur de champ électrique maximale élevée. À mesure que la métallisation prend la forme d'un angle droit, les lignes de champ tendent vers un profil linéaire (Figure 44 (b)).



**Figure 43 : Valeur du champ électrique maximal, courbe noire lorsque l'angle du cuivre uniquement croît, courbe rouge lorsque l'angle de l'AlN uniquement croît – mesa de hauteur 0,3 mm (application de 15 kV sur l'électrode supérieure et l'électrode inférieure à la masse)**

Dans le deuxième cas de simulation, seul l'angle de la mesa Beta croît (10 valeurs choisies entre 30° et 180°) et l'angle de la métallisation Alpha est fixe à 90°. La courbe en rouge de la Figure 43 représente la valeur du champ électrique relevée pour différentes valeurs de l'angle Beta de la mesa. L'allure de la courbe observée est de forme parabolique. Les valeurs extrêmes de l'angle de la mesa Beta (0 ou 180°), induisent de forts champs électriques (effet de pointe). Aux valeurs Beta proches de 90°, l'intensité du champ électrique maximal diminue considérablement.



**Figure 44 : Exemple de deux simulations d'angle Alpha du cuivre. (a) Schéma de configuration pour l'angle Alpha du cuivre de  $30,96^\circ$  et sa simulation associée; (b) Schéma de configuration pour l'angle Alpha du cuivre de  $146,31^\circ$  et sa simulation associée**

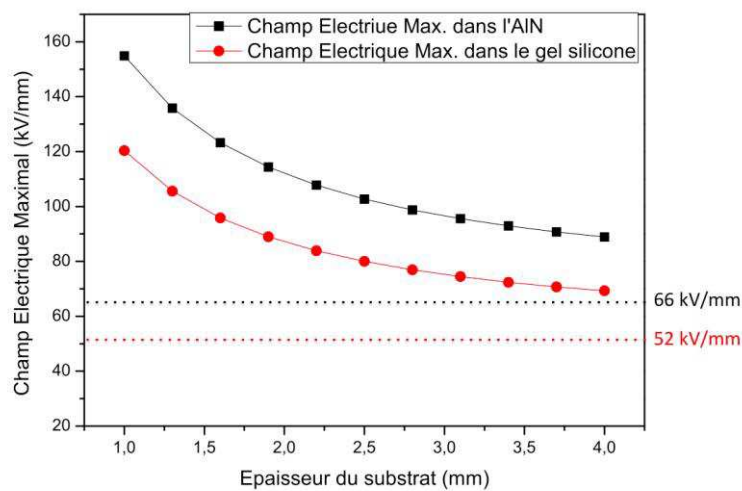
L'analyse de la géométrie des angles de la métallisation et du substrat a montré un très fort impact sur la valeur du champ électrique au niveau du point triple. Les valeurs optimales d'Alpha et Beta sont de  $90^\circ$  car les simulations d'ouverture et de fermeture de ces angles tendent à augmenter la concentration du champ au point triple. Ces simulations mettent en évidence l'importance d'avoir des flancs de métallisation et de la gravure alignés parfaitement verticaux lors de la mise en œuvre de la structure mesa.

## II.4. Comparaison avec différentes solutions proposées dans la littérature

### II.4.1. Solution par augmentation de l'épaisseur de la céramique

Une solution naturelle proposée pour réduire le champ électrique au point triple serait d'augmenter l'épaisseur du substrat céramique. Comme le montre la courbe en Figure 45, on

observe alors une décroissance du champ électrique au point triple avec l'augmentation de l'épaisseur du substrat. On constate que même avec une épaisseur de céramique de 4 mm, on n'atteint pas une valeur de champ s'approchant de celui obtenu sous un potentiel de 6,5 kV que ce soit dans la céramique ou dans l'encapsulant (pointillés Figure 45). Cette solution risque de plus d'être inenvisageable dans le cas d'un module de forte puissance, selon la chaleur à dissiper et la température de jonction maximale acceptable, elle dégraderait trop fortement la conduction thermique vers la semelle.

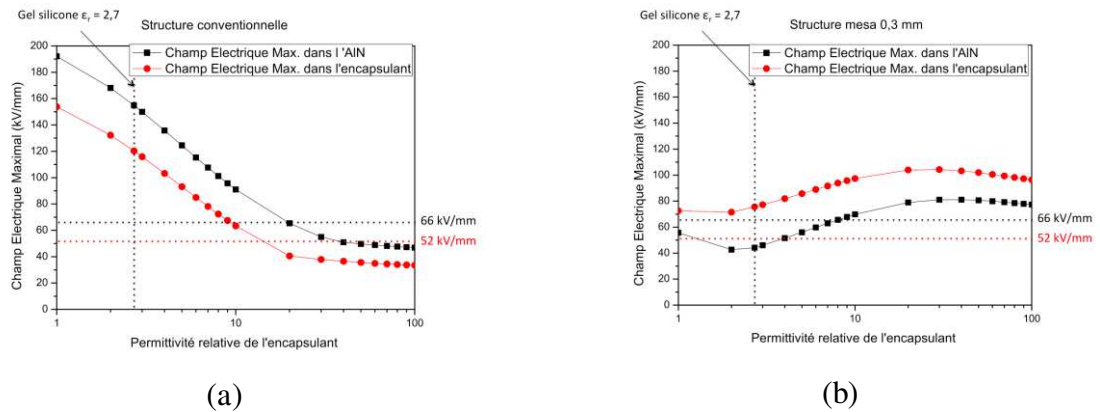


**Figure 45 : Variation du champ électrique maximal au niveau du point triple en fonction de l'épaisseur du substrat sur une structure conventionnelle (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse)**

#### *II.4.2. Solution par augmentation de la permittivité du gel*

Outre les variations de paramètres géométriques de la structure, il est possible de réduire les contraintes électriques au niveau du point triple par la modification de la permittivité des matériaux. On propose d'étudier l'influence d'une permittivité relative variant sur une large gamme de 1 à 100 pour la partie encapsulation d'une structure avec et sans mesa. Le but étant d'identifier son impact sur la contrainte maximale en champ électrique dans les structures. Les courbes en Figure 46 représentent les valeurs maximales des champs électriques obtenues sur une structure conventionnelle (Figure 46 (a)) et sur une structure mesa (Figure 46 (b)) d'une hauteur de 0,3 mm en fonction des valeurs de permittivité du matériau d'encapsulation. Les valeurs de champs électriques obtenues pour les deux structures dans la partie encapsulant sont représentées par les courbes en rouge et dans la partie substrat AlN par les

courbes en noir. La ligne verticale en pointillés représente la permittivité relative usuelle du gel silicone ( $\epsilon_{r\text{GelSilicone}} = 2,7$ ).



**Figure 46 : Valeur du champ électrique maximal dans la partie AlN et dans la partie encapsulant en fonction de la permittivité de l'encapsulant ; (a) en structure conventionnelle et (b) en structure mesa de hauteur 0,3 mm. Application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et l'électrode inférieure sont à la masse**

En structure conventionnelle (Figure 46 (a)), on observe de manière générale une allure décroissante de l'intensité du champ électrique à mesure que la permittivité de l'encapsulant augmente avec un gain maximal par rapport à la structure de référence pour des permittivités de l'encapsulant supérieures à 20. Dans le cas d'une structure mesa, l'intensité initiale (permittivité de 1) du champ électrique est déjà bien inférieure de par sa géométrie favorisant l'étalement de la répartition des lignes équipotentielles par rapport à la structure classique, et l'augmentation de la permittivité de l'encapsulant sur une telle structure n'apporte pas d'amélioration. En effet, seules les petites permittivités d'encapsulation (inférieures à 2) sont favorables à une diminution de la valeur du champ électrique maximal. La diminution obtenue dans une structure conventionnelle par modification de la permittivité est même plus intéressante dans la partie encapsulation pour une permittivité supérieure à 10 en comparaison avec une structure mesa.

Comme nous l'avons déjà observé, la localisation du maximum de champ électrique sur une structure conventionnelle se trouve toujours dans le substrat céramique (Figure 46 (a) courbe en noir). Quelle que soit la permittivité relative de l'encapsulant, l'AlN est le matériau qui subit l'intensité de champ électrique la plus élevée. Le contraire est également encore observé dans le cas d'une structure mesa, le champ électrique le plus élevé reste localisé dans la partie encapsulant (Figure 46 (b) courbe en rouge).



Sur le principe, les résultats de cette simulation permettent de conclure que si l'on dispose d'un matériau encapsulant de permittivité supérieure à 20 (Figure 47 (a)), la structure conventionnelle est préférable pour réduire le champ électrique maximal y compris dans l'encapsulant. En revanche si on ne dispose pas de matériau bon isolant à forte permittivité, la structure mesa est la meilleure solution pour atténuer le pic de champ électrique dans les deux matériaux (AlN et encapsulant) (Figure 47 (b)) et éliminer les risques de défauts dans les zones où la contrainte électrique est la plus élevée pour le gel (et donc les causes de décharges partielles).

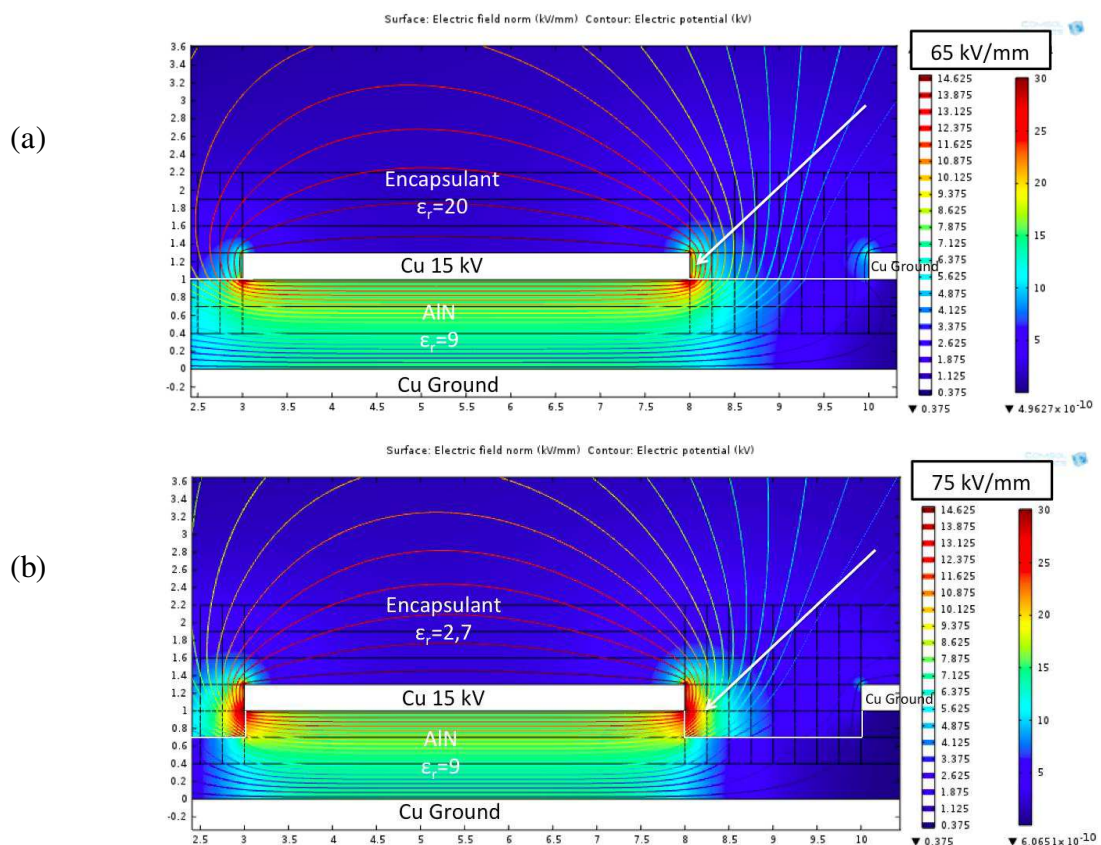


Figure 47 : Cartographie du champ électrique et des équipotentielles dans une (a) « Structure conventionnelle » de permittivité d'encapsulant de 20 et (b) « Structure mesa » de 0,3 mm de permittivité d'encapsulant de 2,7(application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse)

#### II.4.3. Solution par film semi-résistif

D'après l'étude précédente du comportement des paramètres des matériaux en fonction de la fréquence (page - 45 -), l'action sur la modification de la conductivité électrique d'un matériau pour la diminution du champ électrique peut être une solution appropriée pour les basses fréquences. Ce type de solution a également fait l'objet de travaux [21].



Prenons l'exemple d'une couche semi-résistive d'une épaisseur de 25  $\mu\text{m}$  déposée à la surface du substrat de la structure conventionnelle entre les électrodes (Figure 48), de conductivité électrique  $10^{-3} \text{ S/m}$  (valeur étudiée expérimentalement, issue de la référence [21]). La Figure 48 présente le résultat de la simulation de répartition du champ électrique et du potentiel pour une fréquence de 50 Hz.

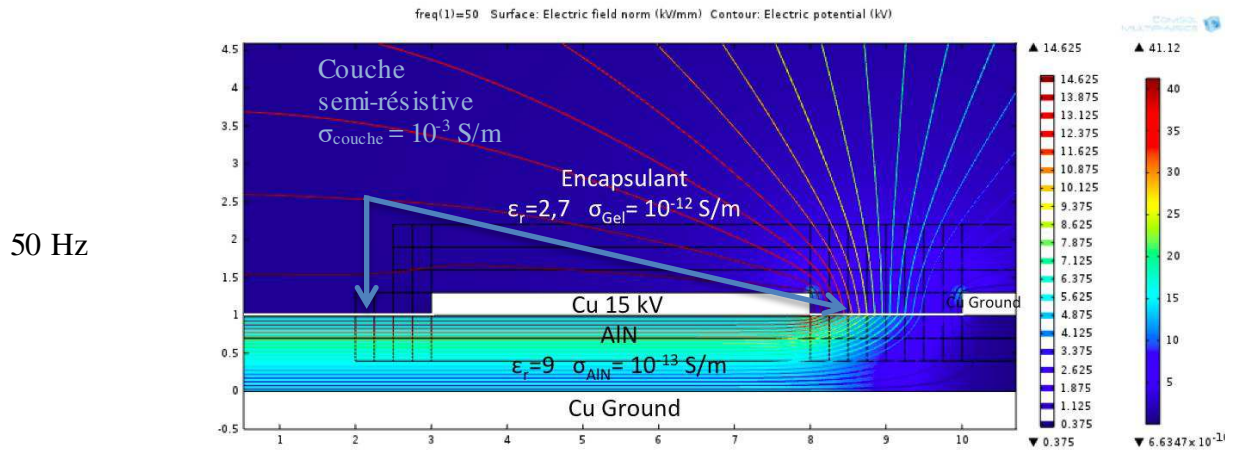


Figure 48 : Cartographie du champ électrique et des équipotentielles dans une structure substrat DBC, insertion d'une couche semi-résistive de  $\sigma = 10^{-3} \text{ S/m}$  d'épaisseur 25  $\mu\text{m}$  à une fréquence de 50 Hz (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse)

L'équation du calcul de la densité de courant dans la couche se réduit à une simple loi d'Ohm supprimant les courants de déplacement (avec  $\epsilon = 0$ ) :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Sur la Figure 48, on remarque l'influence de la conductivité sur l'étalement des lignes de champ entre les deux électrodes. La répartition des équipotentielles au niveau de la couche est indépendante de la fréquence (en négligeant les phénomènes à très hautes fréquences comme l'effet de peau influençant la valeur de la conductivité). Par contre, la cartographie du champ électrique au niveau du substrat céramique, qui peut être modélisé par le système de quadripôle classique à ligne répartie (Figure 49) est dépendante de la fréquence.

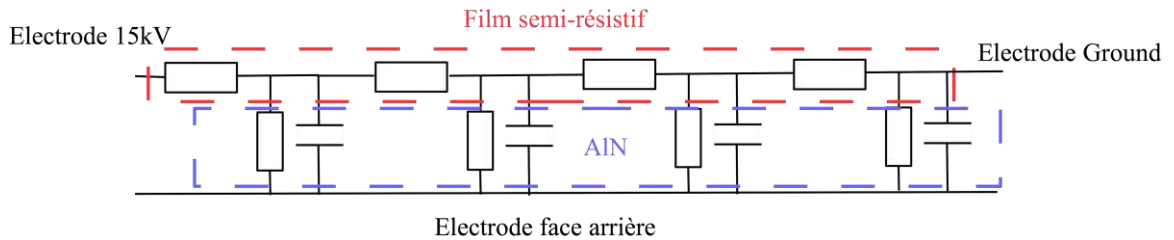


Figure 49 : modèle du comportement de la répartition du champ électrique dans la céramique

Lorsque la fréquence va augmenter, les premières cellules vont subir toute la contrainte. Alors, pour notre exemple avec une conductivité de la couche semi-résistive à  $10^{-3}$  S/m, en faisant varier la fréquence (Figure 50), on constate une gamme d'efficacité vis-à-vis de la réduction du champ électrique dans la céramique restreinte en fréquence. Dans le cas présent (pour les valeurs utilisées), cette solution n'est efficace que pour des fréquences inférieures à  $10^4$  Hz (nommée « fréquence limite » sur la Figure 50).

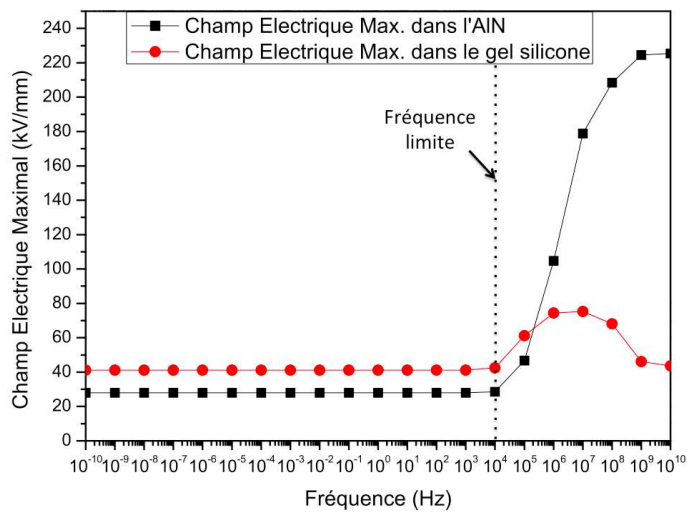
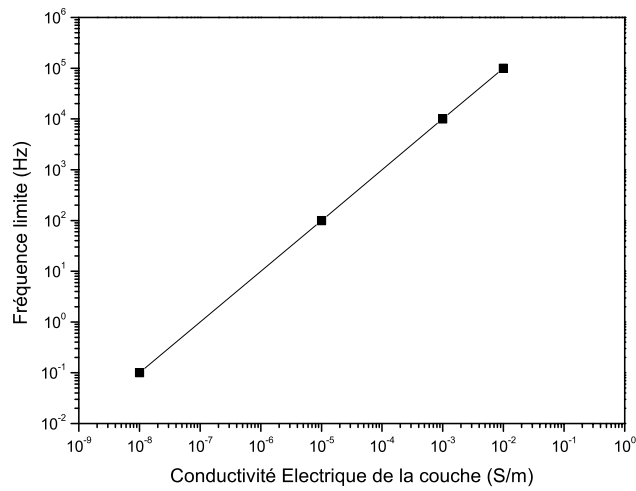


Figure 50 : Valeur du champ électrique maximal dans la partie AlN et dans la partie encapsulant en fonction de la fréquence. Application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, l'électrode supérieure droite et l'électrode inférieure sont à la masse

Si l'on souhaite augmenter la gamme de fréquence pour laquelle cette solution par couche semi-résistive diminue la contrainte de champ, il sera nécessaire d'augmenter davantage la conductivité de la couche. Comme le montre la Figure 51, la « fréquence limite » correspondant à la fréquence pour laquelle la solution par couche semi-résistive n'est plus efficace peut être repoussée par l'augmentation de sa conductivité.



**Figure 51 : Variation de la fréquence limite en fonction de la conductivité électrique de la couche**

Mais un compromis doit être trouvé avec une conductivité acceptable n'engendrant pas des pertes induites par un courant de fuite à travers la couche en basse fréquence trop importantes pour l'application visée. En effet, un calcul rapide pour cette conductivité résistive de  $10^{-3}$  S/m, pour une épaisseur de couche de 25  $\mu\text{m}$  sur un espacement inter-électrode de 2 mm, et pour une profondeur de 1cm, donne un courant de 1,875 mA sous 15kV, soit une puissance à dissiper de 28 W, et pour une efficacité de protection limitée aux fréquences de variation du potentiel inférieures à 10 kHz. Le dépôt d'une couche semi-résistive à la surface de la céramique pour l'atténuation du champ électrique sur l'ensemble de la structure classique, n'entraînant pas trop de pertes ne peut être une solution retenue que pour de relativement faibles fréquences.

## Synthèse du Chapitre II

Ce chapitre a présenté une étude réalisée en utilisant des simulations par éléments finis (FEM) qui permet de mieux comprendre la distribution du champ électrique à l'intérieur d'un module de puissance et d'évaluer l'effet des propriétés des matériaux. Dans cette partie, nous nous sommes focalisés sur le phénomène de renforcement de champ au point triple, avec pour objectif de minimiser l'intensité du champ électrique pour une polarisation de 15 kV, par l'optimisation de la géométrie du substrat métallisé à l'aide des éléments finis, comparée à la géométrie conventionnelle polarisée à 6,5 kV.

Les simulations ont permis d'étudier la répartition du champ électrique pour différentes configurations du substrat métallisé. Nous avons montré que la modification de la géométrie du substrat par la création d'une structure mesa (en plateau), pour laquelle l'extrémité de la métallisation Cu affleure le flanc vertical formé dans la céramique, permet une diminution significative de l'intensité de champ électrique maximale, jusqu'à plus de 50 % en fonction de sa géométrie.

Nous avons démontré qu'il était critique d'obtenir une gravure du cuivre et de l'AlN avec une pente verticale pour ne pas perdre le gain apporté par la structure proposée sur le champ électrique maximal. Cela va s'avérer être une véritable contrainte sur le choix de la technique de réalisation des échantillons, qui fait l'objet du prochain chapitre.

Enfin, nous avons fait une étude comparative de l'intérêt de la structure en mesa par rapport à d'autres solutions de réduction de la contrainte électrique au point triple, telles que proposées dans la littérature. La solution d'une encapsulation à permittivité relative supérieure à 20 (si un tel matériau suffisamment bon isolant existe) permettrait la réduction du champ électrique à la fois dans l'encapsulant et dans le substrat céramique, sans contraintes vers les hautes fréquences. La solution par emploi d'une couche semi-résistive en surface a, quant à elle, un domaine d'efficacité pouvant être limité aux cas de variations du potentiel à basses fréquences, selon la conductivité de la couche. La structure en mesa présente alors l'avantage de permettre d'atténuer significativement les contraintes électriques avec un matériau d'encapsulation à permittivité diélectrique « standard », sans perte d'efficacité à haute fréquence, ni accroissement des pertes électriques. Ce dernier doit cependant supporter, pour une tension appliquée de 15 kV, des champs électriques plus élevés comparés à ceux présents dans une structure conventionnelle polarisée à 6,5 kV. Mais la structure mesa permettant dans le même temps de réduire les causes majeures de génération de décharges partielles dans le module, telles que les protubérances de

métallisation ou la présence de bulles d'air au point triple (où règne le champ électrique maximal dans l'isolant), cette structure peut être une solution bénéfique pour la montée en tension des modules de puissance.

# CHAPITRE III - RÉALISATION DE SUBSTRATS CÉRAMIQUES MÉTALLISÉS EN FORME DE MESA

## III.1. Introduction

Ce chapitre décrira les techniques de métallisations existantes, les céramiques actuellement disponibles et les technologies envisagées pour la mise en forme de substrats céramiques ainsi que les avantages et inconvénients de chacune. Le procédé de mise œuvre qui sera sélectionné pour réaliser la géométrie mesa souhaitée, sera celui qui remplira le mieux les critères de facilité de mise en œuvre et de faisabilité géométrique, notamment pour l'alignement vertical de la métallisation avec la mesa. Enfin, nous présenterons les échantillons fabriqués et analyserons les performances de la technologie choisie par rapport aux critères qui étaient attendus.

## III.2. Les substrats céramiques

Dans les applications de fortes puissances, la fonction substrat isolant du module est assurée par des céramiques métallisées. Pour rappel, le rôle du substrat est d'intégrer les pistes conductrices et de permettre une isolation électrique entre les différents composants à semi-conducteur assurant des fonctions d'électronique de puissance (cellules élémentaires de commutation, hacheur, bras d'onduleur, onduleur complet...) et avec le support sur lequel le module de puissance est fixé. Il doit aussi permettre l'évacuation de la chaleur, issue des pertes des composants actifs, vers le système de refroidissement. C'est notamment pour cette fonction thermique que le substrat céramique est préféré à des solutions organiques telles que le PCB (« *Printed Circuit Board* ») au delà d'une certaine gamme de puissance. En effet, les céramiques ont des propriétés thermiques bien supérieures à celle du PCB (0,3 W/m.K pour le FR-4 contre 170 W/m.K pour l'AlN) et des températures de fonctionnement élevées (pour un laminé par exemple le 370HR [36], la température de fonctionnement maximale est de 130°C contre plus de 150°C pour les céramiques) bien que des technologies d'aide au refroidissement soient développées (comme l'insertion de via thermiques dans le substrat PCB) et sans doute plus de facilités technologiques pour obtenir des géométries originales. Les céramiques sont donc les matériaux de référence dans les applications d'électronique de puissance de moyenne et forte puissance par une meilleure gestion des flux thermiques que les substrats polymères. Les céramiques les plus utilisées sont l'alumine ( $Al_2O_3$ ), le nitrure

d'aluminium (AlN) et plus récemment, le nitrure de silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). On peut évoquer aussi l'oxyde de Béryllium (BeO) et le diamant qui possèdent certaines propriétés exceptionnelles.

Le tableau ci-dessous répertorie quelques caractéristiques physiques de ces matériaux céramiques [37] :

| Propriétés  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | AlN       | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | BeO       | Diamant |
|---|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|---------|
| Module d'Young (GPa)                                | 300 à 380                      | 300 à 310 | 300                            | 300 à 350 | 1140    |
| Contrainte à la rupture en flexion (MPa)            | 250 à 300                      | 300 à 500 | > 700                          | 170 à 250 | -       |
| Conductivité thermique (W/m.K)                      | 24                             | 170       | 90                             | 250       | 2000    |
| CTE (10 <sup>-6</sup> /K)                           | 6,8                            | 4,7       | 2,5                            | 6,8 à 7,5 | 1,2     |
| Rigidité diélectrique (kV/mm) pour 1 mm d'épaisseur | 15                             | 25        | 20                             | 10 à 14   | -       |
| Permittivité relative (ε <sub>r</sub> )             | 9,8                            | 9         | 7,6                            | 6,5       | 5,7     |

**Tableau 2 : Caractéristiques physiques de céramiques isolantes à 20°C (données expérimentales Laplace pour les rigidités diélectriques)**

On remarque que la céramique Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> a une meilleure tenue mécanique, ce qui lui confère une plus grande résistance aux contraintes cycliques d'origine thermomécanique et la possibilité d'amincir le substrat. En revanche, sa conductivité thermique est bien inférieure à celle de l'AlN. Concernant la céramique BeO, elle possède une aussi bonne conductivité thermique que celle de l'AlN, mais elle n'est que rarement utilisée, uniquement dans des applications spatiales en raison de sa toxicité sous sa forme poudreuse (en cas d'usinage). Quant aux substrats à base de diamant, ils commencent à voir le jour en laboratoire. Il serait le matériau le plus prometteur dans un futur proche de part sa très grande conductivité thermique, de 2 000 W/m.K pour le diamant naturel et entre 700 à 1 600 W/m.K pour le diamant synthétique CVD (dépôt chimique en phase vapeur), ce qui permettrait une évacuation de la chaleur bien supérieure à l'AlN [38], mais à des coûts très élevés. Le choix de la céramique sera ainsi déterminé par les contraintes de l'application finale en électronique de puissance [39], notamment financières.

Notre étude porte sur la montée en tension des modules de puissance pour des applications de fortes puissances et dans ce cadre la céramique AlN est actuellement le meilleur compromis du point de vue électrique et thermique par rapport à l'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ou le Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

### III.3. La métallisation des substrats céramiques pour l'électronique de puissance

#### III.3.1. Procédés de métallisation DBC et AMB

La métallisation des céramiques s'effectue à l'aide de feuilles métalliques généralement en cuivre, d'une épaisseur de plusieurs centaines de micromètres. Différents procédés de report sur le substrat céramique existent à l'heure actuelle. Les plus répandus sont le « *Direct Bonded Cooper* » DBC (ou DBA pour l'Aluminium) et l' « *Active Metal Brazing* » AMB.

La technique de métallisation DBC est une méthode qui permet de lier directement le cuivre à la céramique par la création de liaisons chimiques entre les deux matériaux. Ce procédé, consiste à oxyder une couche de cuivre afin d'obtenir une couche superficielle d'oxyde de cuivre. Sous certaines conditions de pression, de température et de milieu, le cuivre a un eutectique avec son oxyde. Pour une température inférieure à la température de l'eutectique (1065°C), le cuivre et son oxyde (CuO<sub>2</sub>) existent dans leurs phases solides. Si le pourcentage d'oxygène est augmenté, une transition apparaît pour une température comprise entre la température de l'eutectique (1065°C) et la température de fusion du cuivre (1085°C). Les céramiques AlN nécessitent une étape préalable d'oxydation par traitement thermique (1250°C) de la surface à métalliser afin de créer en surface une couche d'alumine (Figure 52).

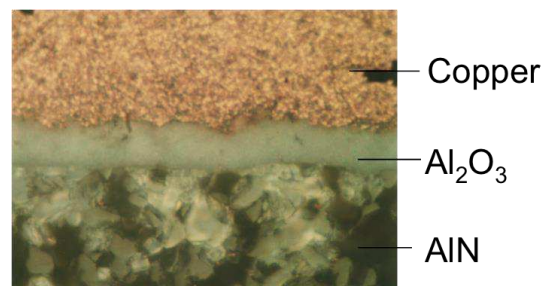


Figure 52 : Interface DBC [40]

La technique de métallisation AMB EST UNE alternative au DBC car elle élimine la nécessité d'une phase d'oxyde à l'interface céramique / métal. La liaison entre la céramique et le cuivre est réalisée par un alliage déposé par sérigraphie avec le motif des pistes finales souhaité, composé d'argent, de cuivre et de titane (le titane est un des rares métaux formant naturellement des intermétalliques avec les céramiques frittées grâce à sa grande réactivité à l'état divisé). Les plaques de cuivre sont rapportées de part et d'autre de la céramique et



l'ensemble est recuit à 900°C. Cette technique est utilisée sur des substrats céramiques en AlN et en Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Les méthodes de métallisation DBC et AMB sont plutôt réservées pour des couches métalliques épaisses, tandis que d'autres techniques existent plutôt réservées à des couches minces (inférieures à une dizaine de micromètres) comme le dépôt par évaporation « *Physical Vapor Deposition* » PVD ou la sérigraphie, mais ces faibles épaisseurs limitent l'intérêt de ces techniques pour les applications de puissance.

### *III.3.2. Réalisation des pistes et électrodes – Profil de gravure du métal*

Les pistes de cuivre et électrodes sont réalisées à partir d'une surface de cuivre pleine gravée par un procédé chimique. Un matériau photosensible est déposé en surface du cuivre et insolé localement par une lumière UV permettant sa polymérisation et conduisant après développement à la réalisation d'un masque de protection. Une gravure chimique au perchlorure de fer est alors effectuée, attaquant le cuivre dans les zones qui n'ont pas été protégées et dessinant ainsi pistes et électrodes.

Sur la Figure 53 sont représentées les images réalisées par microscopie optique de deux substrats cuivre /AlN / cuivre élaborés suivant les deux procédés de métallisation DBC et AMB. Les profils de gravure obtenus sont liés à leurs procédés respectifs de gravure chimique, notamment au temps d'exposition et aux caractéristiques du masque. On observe un profil en arc avec un rayon de courbure plus ou moins marqué et le pied de la métallisation se termine en forme de pointe. Pour l'AMB, une protubérance métallique correspondant à la brasure active (Ti / Ag / Cu) est observée à l'extrémité du pied de métallisation. Cette couche peut être gravée par un procédé supplémentaire.

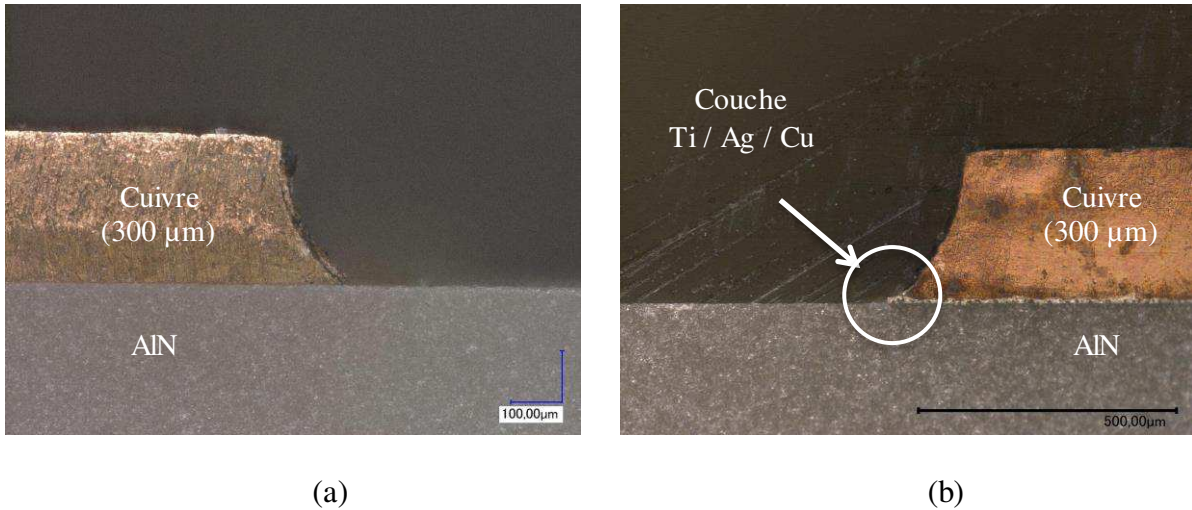


Figure 53 : Image microscope numérique d'une gravure (a) DBC et (b) AMB

A ce jour, les substrats DBC sont largement utilisés dans l'industrie de l'électronique de puissance par les pays occidentaux, et la technique AMB gagne petit à petit des parts de marché. Les substrats dits « *Direct Bonded Aluminium* » qui sont les versions en aluminium des DBC, sont plus largement utilisés dans les pays d'Extrême Orient [16]. Outre les protubérances qu'engendre la technique AMB, toute irrégularité en bord de métallisation peut favoriser une augmentation locale de champ électrique et par conséquent un abaissement du seuil d'apparition des décharges partielles [12].

### III.4. Mise en forme du substrat céramique

#### III.4.1. Techniques de fabrication massive des céramiques

Classiquement, le substrat est élaboré à partir de poudre mise en forme, puis consolidée et densifiée par un traitement thermique, correspondant à l'étape de frittage. Enfin, une opération de finition et de contrôle peut être nécessaire.

##### a. Mise en forme des poudres sous pression

Les poudres peuvent être mises en forme par différents procédés, certains étant bien connus et maîtrisés et d'autres plus innovants. La méthode est choisie en fonction des dimensions des pièces, de leur complexité et des caractéristiques du produit final.

Pour la fabrication de substrats notamment en AlN, elle s'effectue par moulage et pressage de plaques d'épaisseur variable entre 0,635 mm et 1 mm, et de dimensions en pouces autour de 5" × 7" [41]. C'est au cours de cette opération que l'on obtient la céramique crue (dite verte) qui consiste à un empilement granulaire contrôlé à l'échelle du grain et maintenu en place par un liant organique. La dernière étape est le frittage. Tant que la

céramique crue n'a pas été frittée, elle est friable et peut éventuellement être travaillée par des techniques d'usinage classiques comme le fraisage.

### *b. Frittage*

Le frittage est une étape importante de la fabrication des substrats céramiques. C'est de cette opération que le produit fini obtiendra ses caractéristiques en termes de porosité, de densité, de granularité, de pureté et de défauts, mais aussi ses propriétés macroscopiques électriques, thermiques et mécaniques. C'est pourquoi de nombreuses études portent sur le procédé de frittage et la maîtrise des conditions de frittage et des additifs utilisés. La température de frittage de la céramique AlN est élevée, se situant entre 1650 et 1800°C à une pression modérée (autour de 50 MPa) et sous atmosphère contrôlée (souvent de l'azote). L'emploi d'additifs va permettre d'améliorer les propriétés de la céramique comme par exemple l'oxyde d'yttrium qui permet de densifier le matériau et d'améliorer la conductivité thermique [42].

Parmi les techniques de frittage, il existe les techniques de frittage sous charge (pression mécanique au cours du chauffage). Ces techniques sont dites conventionnelles comme par exemple, la compaction isostatique à chaud (*Hot Isostatic Pressing* - HIP), ou le pressage uniaxial à chaud (*Hot Pressing* - HP). D'autres sont dites « non conventionnelles » comme le frittage « flash » par plasma (*Spark Plasma Sintering* - SPS).

Hormis la nature de la pression appliquée (uniaxiale ou isostatique), la principale différence entre les techniques de frittage conventionnelles et celles nommées « flash », se situe dans la manière de chauffer la matrice du système comme représenté en Figure 54. Typiquement, lors d'un frittage conventionnel sous charge (Figure 54 (a)), la mise en température du système matrice / poudre est assurée par un chauffage externe (rayonnement). La mise en température dans le cas d'un frittage « flash » (Figure 54 (b)) est assurée par un chauffage interne produit par effet Joule résultant du passage d'un courant électrique soit dans le matériau, soit dans le moule. Ce type de chauffage interne permet un temps de frittage plus court que ceux requis par les techniques de frittage conventionnelles.

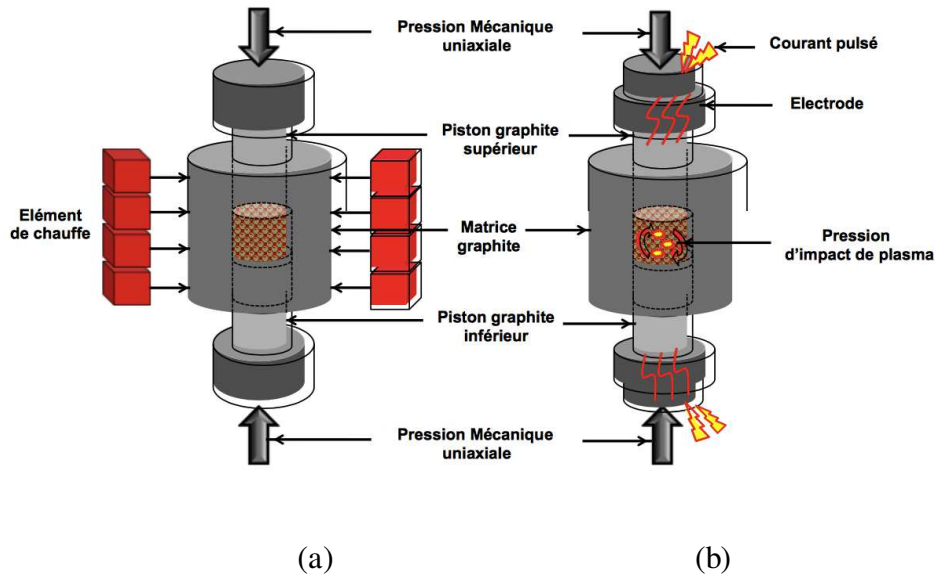


Figure 54 : Techniques de frittage (a) conventionnelle (*Hot Pressing*) et (b) non conventionnelle (*Spark Plasma Sintering*) [43]

Le frittage « flash », ou SPS, est la technique privilégiée de frittage pour obtenir des céramiques nanostructurées. Ce procédé s'apparente à un pressage à chaud conventionnel, auquel sont associées des séries d'impulsions de courant électrique de forte intensité ce qui permet d'atteindre de hautes températures très rapidement (quelques minutes au lieu de quelques heures). La densification des matériaux en poudre est alors rapide [44].

### III.4.2. La fabrication additive

De manière plus innovante, le substrat peut être élaboré par fabrication additive ou impression 3D. La fabrication additive est un procédé de mise en forme par ajout de matière. L'assemblage se fait couche par couche (allant de 10  $\mu\text{m}$  à quelques millimètres suivant la technologie) et la pièce finale doit être frittée ou non suivant la technique choisie. Cette technologie offre des possibilités qui vont au-delà des autres techniques car elle permet de réaliser des pièces de forme complexe. La fabrication additive de la céramique intéresse de nombreux domaines comme la joaillerie, le médical ou bien l'industrie aéronautique ou électronique comme décrit sur la Figure 55. Il existe différentes technologies d'impression dont certaines utilisent de la poudre céramique seule ou bien mélangée à un liant qui est éliminé après un traitement thermique (déliantage). Nous détaillerons par la suite les différentes techniques additives actuellement utilisées, quelques-unes de ces techniques ont déjà été utilisées avec de la poudre AlN. Les techniques ont été classées suivant la forme

initiale de la poudre à savoir solide, liquide ou en pâte. Un tableau final récapitulera les principales caractéristiques de l'ensemble des techniques (Tableau 3).



Figure 55 : Principaux marchés de la fabrication additive pour la céramique [45]

#### a. Fabrication additive par « voie poudre »

Il existe trois types de fabrication additive utilisant comme matériau de base la poudre :

- SLS : *Selective Laser Sintering*
- BJP : *Binder Jetting / Powder Bed 3D Printing*
- ADM : *Aerosol Deposition Method*

##### i. SLS : *Selective Laser Sintering*

Le frittage laser sélectif (*Selective Laser Sintering* - SLS) [45] est une technique de construction par laquelle les éléments sont fabriqués par couches successives d'environ 10  $\mu\text{m}$  et solidifiés par laser. Dans une enceinte préchauffée, des couches de poudre sont déposées les unes sur les autres. Après chaque couche, un faisceau laser contrôlé en puissance et suivant une trajectoire prédéfinie scanne la surface et fritte localement les particules de poudre (Figure 56). Au cours de l'exposition au laser, la température de la poudre dépasse celle de la transition vitreuse et les particules voisines s'assemblent. En se solidifiant, la strate supérieure se rattache à la couche inférieure, formant petit à petit la pièce. Le principal inconvénient de cette technologie est le choc thermique qu'engendre le processus de frittage pouvant provoquer des défauts au niveau microstructural de la pièce [46].

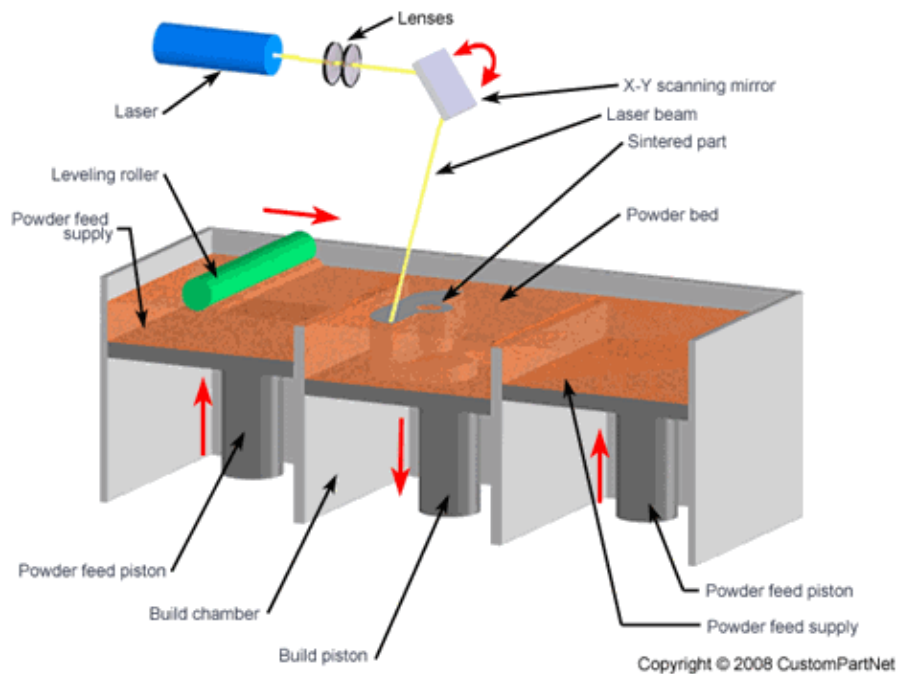


Figure 56 : Schéma du principe de fonctionnement de la technologie SLS [47]

### ii. BJP : Binder Jetting / Powder Bed 3D Printing

La technique d'impression par jet de liant nommée *Binder Jetting Printing* ou *Powder Bed 3D Printing* (BJP) [45], utilise un liant projeté sur un lit de poudre pour former une pièce solide. Un rouleau dépose une couche de poudre (de 50 à 300  $\mu\text{m}$ ). Le liant est ensuite déposé selon la pièce à imprimer à l'aide d'une buse. Le plateau descend ensuite pour la création d'une nouvelle couche. Une étape de frittage est nécessaire après réalisation de l'objet pour enlever toutes traces de liant et densifier la céramique. Le principal inconvénient de cette technologie est l'empilement granulaire qui n'est pas régulier et la pièce finale obtenue est d'aspect poreux et de faible densité [48].

### iii. ADM : Aerosol Deposition Method

Une nouvelle technique de déposition par aérosol froid (*Aerosol Deposition Method* - ADM) est apparue qui permet de faire un dépôt à température ambiante et sans frittage. Son principe repose sur la génération d'un aérosol sec d'une poudre qui est accélérée à travers une buse de projection pour se fragmenter en particules solides sur un substrat (Figure 57). Lors de la fragmentation, l'énergie cinétique est transformée en énergie de cohésion, permettant la densification du matériau sans qu'aucun frittage ne soit requis. Les couches obtenues par cette technique sont nanostructurées. L'ADM est particulière car elle permet de s'affranchir de l'étape de frittage et les poudres utilisées sont « pures », mais le comportement thermique et

électrique doit être étudié. Actuellement les couches de céramiques déposables avec cette technique ne dépassent pas la dizaine de micromètres et les différents substrats de dépôts sont limités au métal, verre et plastique.

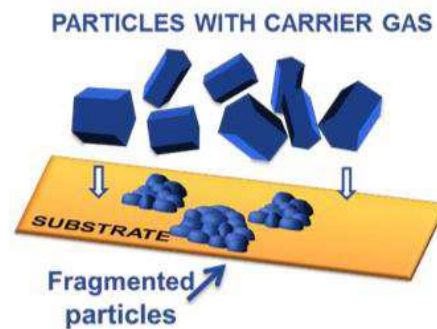


Figure 57 : Schéma de principe de la technique ADM [45]

### *b. Fabrication additive par « voie liquide »*

Il existe trois types de fabrication additive utilisant comme matériaux de base de l'encre ou bien de la pâte:

- SLA : *Stereolithography Apparatus*
- DLP : *Digital Light Processing*
- *Ink Jet Printing et Aerosol Jet Printing*

#### *i. SLA : Stereolithography Apparatus*

La stéréolithographie est la technique d'impression 3D la plus répandue. Appelée aussi SLA (*Stéréolithographie Apparatus*), cette technique consiste à solidifier un liquide photosensible par le biais d'un rayonnement ultraviolet. Un réservoir est rempli d'une résine photosensible chargée en céramique. Après dépôt de cette résine, un rayonnement ultraviolet va venir la balayer pour durcir couche par couche la pièce (Figure 58). Une étape de frittage est nécessaire après réalisation de l'objet, précédée par une étape de déliantage pour enlever toutes traces de résine photosensible. Cette technique apporte l'avantage de la maîtrise au micromètre de l'empilement granulaire de la pièce fabriquée.

#### *ii. DLP : Digital Light Processing*

Un autre procédé très similaire au SLA est la DLP (*Digital Light Processing* - DLP) qui utilise des fibres optiques et des micro-miroirs, pour projeter une image sur la surface du réservoir rempli de la résine photosensible, permettant ainsi de traiter une couche entière de la pièce. Les objets imprimés par ce procédé ont donc les mêmes caractéristiques que le SLA.



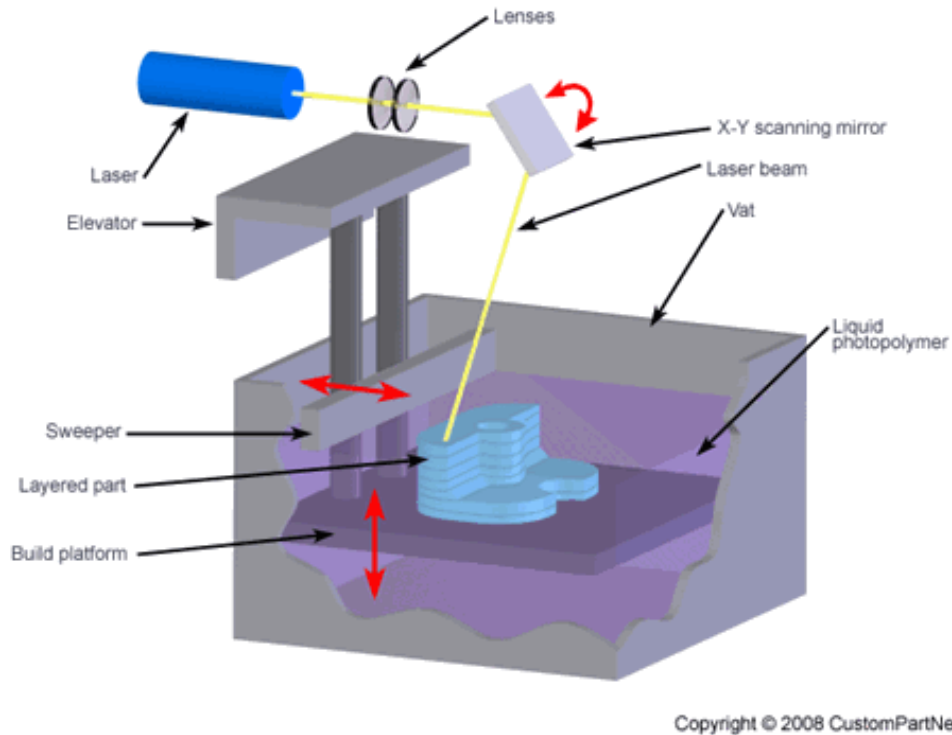


Figure 58 : Schéma de principe de la technique SLA [49]

### iii. Ink Jet Printing

Dans la technique de projection de matériau telles que les impressions jet d'encre ou jet d'aérosol (*Ink Jet Printing* et *Aerosol Jet Printing*), une ou plusieurs buses de projection se déplacent dans le même temps à travers une zone de construction et distribuent des gouttelettes de matériaux photopolymères. Dans le cas du jet d'encre, la goutte doit avoir une distance fixe par rapport à la zone de construction alors qu'en jet d'aérosol la goutte est projetée sur une surface, il n'y a plus besoin de maîtriser la distance (Figure 59). Une étape de frittage est nécessaire après réalisation de l'objet pour le durcir. Cette technique a l'inconvénient de perdre en résolution suivant la distance de projection [50].



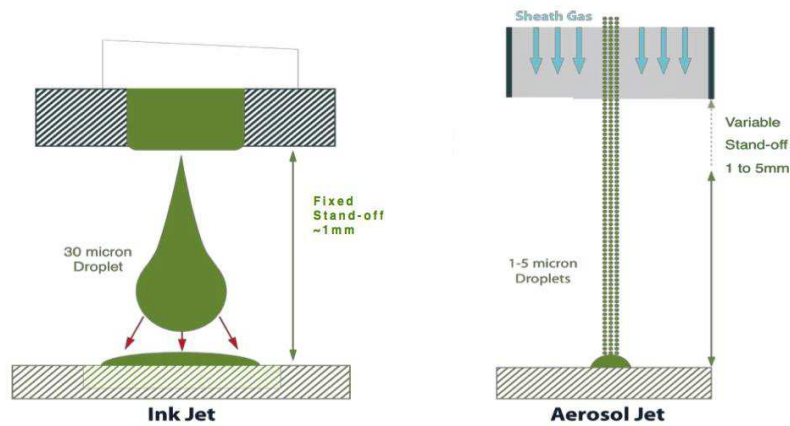


Figure 59 : Schéma de principe de la technique *Ink Jet Printing* et *Aerosol Jet Printing* [45]

### III.4.3. Tableau récapitulatif des techniques de fabrication additive pour la céramique

Les techniques de fabrication additive présentées précédemment sont relativement nouvelles. Elles ne sont pas forcément explorées pour la fabrication de céramiques dédiées à l'électronique de puissance et / ou non plus caractérisées pour ces applications. Nous pouvons établir un tableau de synthèse qui permet de classer les méthodes de fabrication additive pour la céramique selon la matière de base utilisée et le procédé de mise en forme apparenté (Tableau 3).

| Matière de base | Nom français / Nom anglais  | Matériaux céramiques   | Epaisseurs                            | Principe   | Principal avantage et / ou inconvénient  |
|-----------------|---|--|---------------------------------------|--|--|
| Poudre          | Frittage sélectif par laser :<br><b>SLS</b> : <i>Selective Laser Sintering</i>  | Alumine, zircone, HAP, nitrure d'aluminium, porcelaine...        | Couches successives de 10 µm          | L'impression se fait couche par couche. Un rouleau dépose une fine couche de poudre, un laser balaye chaque couche de poudre et le fritte localement.  | Pas besoin d'étape de frittage.<br>Tolérance des défauts.<br>❑ Chocs thermiques, cela génère des défauts au niveau microstructurel.                            |
|                 | Déposition par aérosol froid :<br><b>ADM</b> : <i>Aerosol Deposition Method</i>   | Possibilité de déposer dans une même couche différents matériaux | Couches successives de 1 µm           | Un aérosol est accéléré et projeté à travers une buse sur un substrat, les grains se fragmentent lors de l'impact et forment le dépôt.   | ❑ Pas besoin d'étape de frittage.<br>Matériaux denses (95 %).  |
| Jet de liant    | <b>BJP</b> : <i>Binder Jetting / Powder Bed 3D Printing</i>   | Alumine, zircone, HAP, nitrure d'aluminium, porcelaine...        | Couches successives de 50 µm à 300 µm | L'impression se fait couche par couche. Un rouleau dépose une fine couche de poudre. Le liant est ensuite déposé par une tête d'impression (buse).<br>Etape de frittage nécessaire après réalisation de l'objet pour enlever toutes traces de liant. | ❑ Fabrication de grandes pièces.<br>L'empilement granulaire n'est pas très bon.<br>Pièces poreuses.  |
| Liquide (pâte)  | Stéréolithographie :<br><b>SLA</b> : <i>Stereolithography Apparatus</i><br><b>DLP</b> : <i>Stereolithography : Digital Light Processing</i> | Alumine, zircone, HAP, nitrure d'aluminium, porcelaine...        | Couches successives de 30 µm à 100 µm | Photopolymérisation d'une résine photosensible chargée en céramique par l'action d'un rayonnement ultraviolet.<br>Etape de frittage nécessaire après réalisation de l'objet pour enlever toutes traces de polymères.                                 | Vitesse de construction lente.<br>❑ L'empilement granulaire est maîtrisé.<br>Coût de fabrication élevé.<br>Trouve sa place si la forme de l'objet est complexe |
| Liquide (encre) | Jet d'encre ou d'aérosol :<br><b>Aerosol Jet Printing</b><br><b>Ink Jet Printing</b>  | Possibilité de déposer dans une même couche différents matériaux | Couches successives de 0,1 µm à 10 µm | Projection de matériau par jet d'encre ou jet d'aérosol, la tête d'impression se déplace et distribue des gouttelettes de matériaux photopolymères. Etape de frittage nécessaire après réalisation de l'objet pour le durcir.                        | A l'inverse du jet d'aérosol, le jet d'encre doit avoir une distance de goutte fixe.   |

Tableau 3 : Tableau classant les méthodes de fabrication additive pour la céramique selon la matière de base utilisée et le procédé de mise en forme apparenté (❑ avantage / ❑ inconvénient)

### III.5. Les technologies envisagées pour la réalisation du substrat avec structure en mesa

La première voie possible pour la fabrication de substrat céramique de géométrie mesa, pourrait être par le procédé conventionnel de moulage et de pressage, à l'aide d'un moule de la géométrie voulue puis de procéder au frittage de la pièce. Ou bien avoir recours à un usinage à cru d'une plaque de substrat pour réaliser la géométrie.

La deuxième voie envisageable se trouve parmi les techniques de fabrication additive dédiées à la céramique présentées précédemment. Les procédés de fabrication qui semblent les plus appropriés pour la réalisation de substrat céramique et précisément AlN, sont la stéréolithographie SLA et la déposition par aérosol froid ADM. La méthode SLA est un procédé maîtrisé, alors que l'ADM nécessiterait une étude approfondie sur le comportement thermique des pièces fabriquées par cette technique. Ces deux techniques permettent la réalisation de pièces denses. Cependant nous n'avons pas identifié dans la littérature d'études concernant les comportements électriques des céramiques issues de la fabrication additive.

Le problème commun aux deux voies décrites précédemment est l'étape de métallisation qui constitue le principal verrou technologique. En particulier, le dépôt du cuivre sur toute la zone dédiée à l'électrode en forme de mesa (Figure 60) pose des problèmes de centrage de l'électrode, d'alignement vertical de la métallisation avec la mesa et de maîtrise de la géométrie des bords du dépôt (profil de gravure). Or cet alignement et ce profil vertical sont deux paramètres clés pour la réduction du renforcement de champ au point triple comme vu au chapitre précédent.

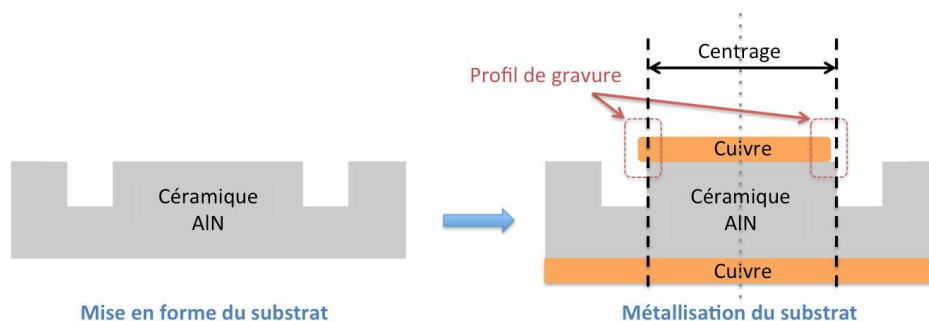


Figure 60 : Schéma descriptif des éventuelles difficultés rencontrées lors de la métallisation d'un substrat de type mesa

Finalement, la solution pour s'affranchir de ce problème serait de procéder à l'usinage d'un substrat déjà métallisé comme le montre la Figure 61. Plusieurs techniques d'usinages adaptées au travail de la céramique AlN existent, que nous allons développer dans la suite.

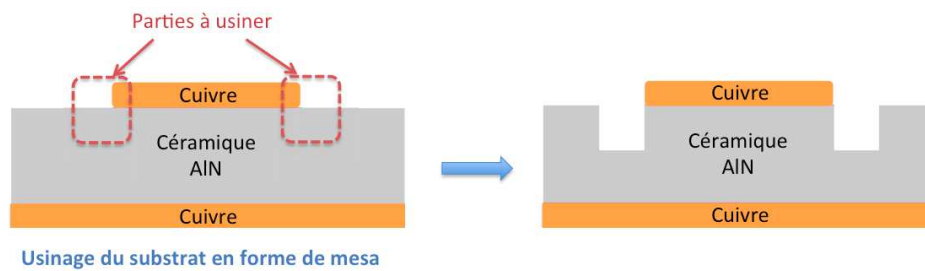


Figure 61 : Schémas de la solution par usinage envisagée pour la fabrication du substrat métallisé en géométrie mesa

### III.5.1. La gravure : fraisage et carottage

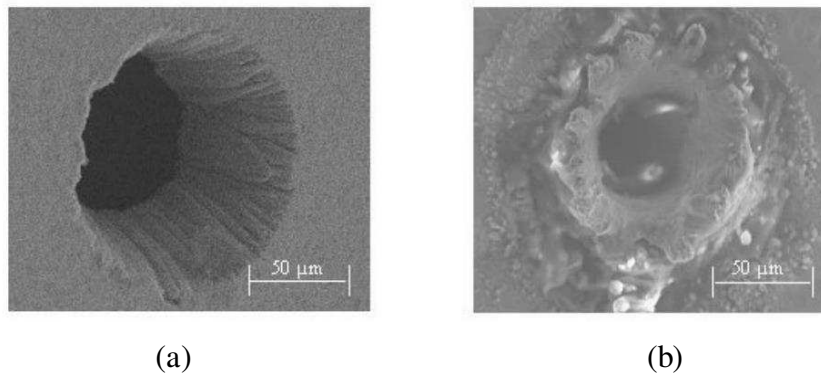
La céramique AlN métallisée peut être mise en forme par fraisage ou bien carottage, cette technique permet le retrait à la fois du cuivre et de l'AlN, garantissant ainsi la continuité des flancs cuivre et céramique. L'outil de coupe utilisé pour réaliser un carottage doit être fabriqué sur mesure, aux cotes spécifiques de l'empreinte voulue. Les principaux inconvénients de la gravure par fraisage ou par carottage sont la pression mécanique qu'exerce l'outil sur la pièce pouvant entraîner la destruction de celle-ci, et l'élévation de température lors de l'ablation mécanique notamment lors de la découpe de deux matériaux de dureté différente. Un système de refroidissement thermique durant l'usinage doit être mis en place. Enfin l'usure de l'outil est à prendre en compte au fur et à mesure de son utilisation, car elle impacte la répétabilité des empreintes à effectuer.

### III.5.2. Le laser

Parmi les nombreuses applications du laser, se trouve la réalisation d'usinage. Le choix du laser va dépendre du type d'interaction laser / matériau rencontré. Ces interactions vont dépendre à la fois de la source laser (sa longueur d'onde, le temps d'application et la densité de puissance délivrée) et du matériau même (sa nature : métal, semi-conducteur, diélectrique; ses propriétés physiques : optiques, thermiques et son état de surface : nature chimique, rugosité) [51]. Le laser possède l'avantage, par rapport aux techniques de gravure traditionnelles, de ne pas exercer de pression mécanique sur la pièce à usiner, puisque c'est une technique sans contact et par conséquent sans usure pour les outils.

Le principal point faible de cette technologie concerne l'effet thermique engendré par l'interaction laser / matière. La description d'une telle interaction nécessite la prise en compte

d'une part des caractéristiques du laser (énergie, longueur d'onde, ...) et d'autre part de celles de la matière ciblée par le laser. Le phénomène d'interaction laser / matière est une discipline à part entière de la physique. Néanmoins l'effet thermique peut être en partie pallié par l'utilisation d'un laser pico ou femto-seconde au processus quasi « athermique » (Figure 62 (a)). De ce fait, les effets thermiques sont réduits, ce qui permet d'obtenir une bonne qualité d'usinage en minimisant les projections, les bavures et le stress mécanique (Figure 62 (b)). Enfin, aujourd'hui le laser est sans doute la technique d'usinage la plus précise (de l'ordre du micromètre).



**Figure 62 : Image d'un micro-usinage laser sur des échantillons de cuivre de 100 µm d'épaisseur. (a) Usinage par laser "femto-seconde", impulsions de 180 fs; (b) usinage par laser « nanoseconde », impulsions de 8 ns. Densité d'énergie par unité de surface de 8 J/cm<sup>2</sup> [52]**

Pour l'usinage de la métallisation Cu et de la céramique AlN [53], le laser le mieux adapté est le Laser femto-seconde au processus d'ablation ultracourt et quasi athermique.

Un risque persiste par le fait d'usiner au laser deux matériaux de natures différentes, comme dans notre cas, notamment avec des interactions laser / cuivre différentes des interactions laser / AlN. En effet, lors d'une irradiation laser, une partie de l'énergie déposée dans le matériau sert à l'ablation de matière. La partie résiduelle de l'impulsion qui ne sert pas directement à l'ablation, demeure dans la matière et entraîne un échauffement localisé sur une certaine zone (appelé ZAT - Zone Affectée Thermiquement [52]). L'irradiation de deux matériaux différents conduit à des ablations différentes. Par conséquent, la jonction des deux matériaux voulue avec un alignement vertical de la métallisation et la mesa peut être compromise. Bien sûr ces risques peuvent être diminués par l'optimisation des conditions opératoires en inclinant de manière appropriée le laser. Enfin une analyse du matériau post-usinage doit être réalisée pour s'assurer que les propriétés physico-chimiques du substrat n'ont pas été modifiées notamment en surface [54].

### *III.5.3. Les ultrasons*

L'usinage par ultrasons est une technique utilisant l'abrasion par la vibration ultrasonore. Ce mode d'usinage, tout comme le laser, permet de pallier les difficultés que l'usinage traditionnel rencontre, comme la pression mécanique de l'outil sur la pièce. L'avantage de l'ultrason par rapport au laser est l'échauffement thermique qui est bien moindre.

Les ultrasons sont des vibrations engendrées à haute fréquence. Cette gamme de fréquence se situe entre 16 kHz et 10 MHz et peut être classée en deux catégories :

- Les ultrasons de puissance : compris entre 16 kHz et 1 MHz, utilisés pour de l'usinage pouvant entraîner des modifications physiques et chimiques (décapage, dégazage, modification de mécanisme réactionnel, production de radicaux libres...).
- Les ultrasons de diagnostic : compris entre 1 MHz et 10 MHz, utilisés en imagerie médicale et en contrôle non destructif de matériaux permettant de déterminer les caractéristiques physico-chimiques du milieu qu'ils traversent (échographies par exemple).

#### *a. Principe de fonctionnement*

L'usinage abrasif ultrasonore est un procédé de reproduction de forme par abrasion, particulièrement adapté à l'usinage de matériaux durs ou fragiles et cassants. Cette abrasion est réalisée par une sonotrode qui est un outil animé d'un mouvement longitudinal à une certaine fréquence. Cette vibration est transmise jusqu'à son extrémité et met en mouvement des particules abrasives très dures appelées aussi grains d'abrasifs. Ces grains d'abrasifs, accélérés par la vibration de l'outil, viennent arracher la matière sur la pièce à usiner. L'outillage ne rentre pas en contact direct avec la pièce à usiner. Un espace (Figure 63) est laissé entre la pièce et l'outil correspondant à la zone de travail dans laquelle les grains circulent librement à travers un liquide porteur. Un flot constant de ce liquide assure l'évacuation des résidus de matières appelés « copeaux », ainsi que le renouvellement des grains d'abrasifs.

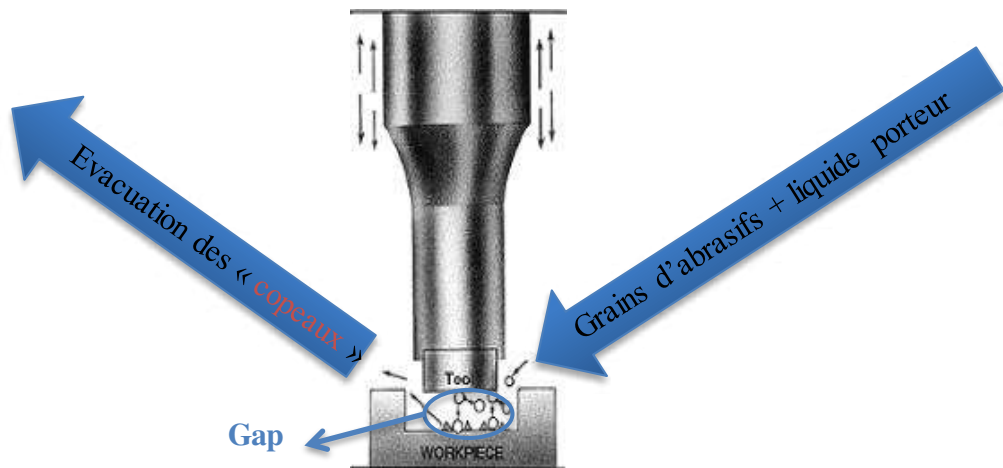


Figure 63 : Principe de l'usinage abrasif par ultrasons

Plusieurs phénomènes participent à l'enlèvement de matière, comme le cisaillement correspondant à une action mécanique, l'érosion de cavitation due aux variations de pression au sein du liquide porteur engendrées par les vibrations de la sonotrode (matériaux poreux) et enfin une action chimique qui pourrait être due au fluide porteur des particules.

Finalement ce procédé n'est efficace que sur des matériaux durs et cassants, fragiles ou composites comme les céramiques, il est sans échauffement pour la pièce à usiner. Les véritables outils de coupe sont les grains d'abrasifs qui, en contact avec la matière, viennent l'arracher de manière très localisée. C'est l'origine du faible échauffement de cette technique car le refroidissement est apporté par le fluide porteur qui est en perpétuel mouvement.

La machine à ultrasons est composée d'un ensemble acoustique (Figure 64) qui génère une onde acoustique à la fréquence ultrasonore de 20 kHz, grâce à l'effet piézoélectrique de certaines céramiques pouvant vibrer sur plusieurs dizaines de micromètres en amplitude maximale. Cette vibration est ensuite amplifiée par des amplificateurs mécaniques, puis est propagée le long de l'ensemble acoustique jusqu'à l'extrémité de la sonotrode.

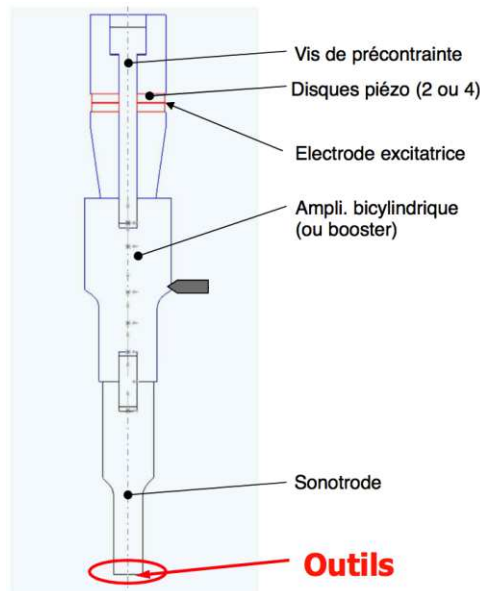


Figure 64 : Schéma de principe de l'ensemble acoustique d'une machine à usinage par ultrasons

Il existe 2 types de sonotrodes liées à deux usinages différents [55] :

- La technique de défonçage en Figure 65 (a)) : permet la reproduction de forme, mais est limitée par la nécessité de produire une sonotrode de la forme souhaitée et par l'usure de celle-ci.
- Usinage par génération en Figure 65 (b)) : usinage local avec une sonotrode de petite dimension qui se déplace latéralement et procède à une succession de balayages.

L'usinage par génération comporte plus d'avantages, comme la maîtrise de la forme usinée par des déplacements précis de la sonotrode, la maîtrise de l'usure de celle-ci par l'utilisation de matériaux extrêmement résistants à l'usure et enfin la maîtrise des efforts appliqués puisque la surface de la sonotrode est très petite par rapport à celle de la pièce.

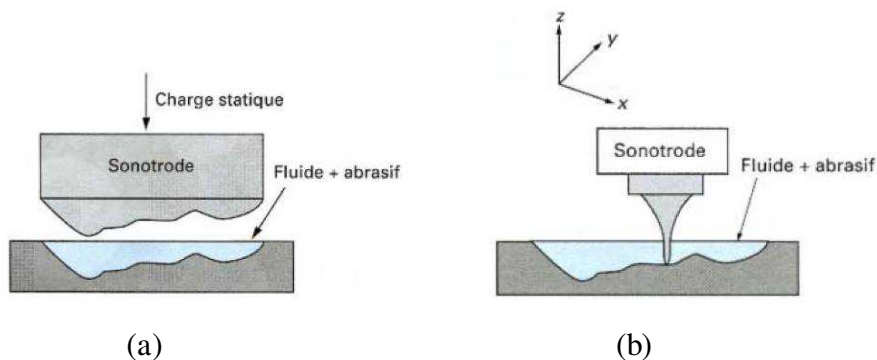


Figure 65 : Reproduction de forme par défonçage (a) et usinage par génération (b) [56]



La profondeur de l'usinage est variable mais limitée actuellement à 20 mm. Les vitesses d'usinage varient en fonction du rapport de forme largeur / profondeur imposé, les grains d'abrasifs pouvant avoir des difficultés à circuler.

L'usure et le travail d'enlèvement de la matière dépendent de nombreux paramètres. Le premier paramètre est la vibration : l'amplitude et la fréquence. Le paramètre suivant est la pression statique s'exerçant sur le matelas de grains d'abrasifs participant à l'usinage. Enfin, la nature des grains d'abrasifs, leurs dimensions et leurs concentrations au sein du liquide porteur influent sur l'enlèvement de matière et les vitesses de cet enlèvement, ainsi que sur l'usure des outils.

### *b. Matériaux et usinabilité*

Les matériaux répondent différemment à l'usinage ultrasonore, et ce en fonction de leurs caractéristiques physiques ou mécaniques comme la dureté, la fragilité et la porosité. D'après la Figure 66 ci-dessous, il est possible de distinguer trois catégories. La première correspond aux matériaux qui ne répondent pas bien au procédé, leurs débits de matière sont très faibles pour une usure relative d'outils importante (de 60 % pour le laiton à 100 % pour l'acier), ces matériaux ne sont pas bien adaptés pour ce type d'usinage. La catégorie suivante concerne les matériaux peu fragiles et peu poreux (5 % pour l'alumine, 10 % pour le rubis), difficiles à usiner, car le débit de matière est faible et l'usure de la sonotrode marquée. La dernière catégorie correspond aux matériaux qui conviennent particulièrement à cet usinage, ils sont très fragiles ou très poreux (1 % pour le verre, moins de 1 % pour le graphite), les débits de matière sont très importants pour une très faible usure de la sonotrode.

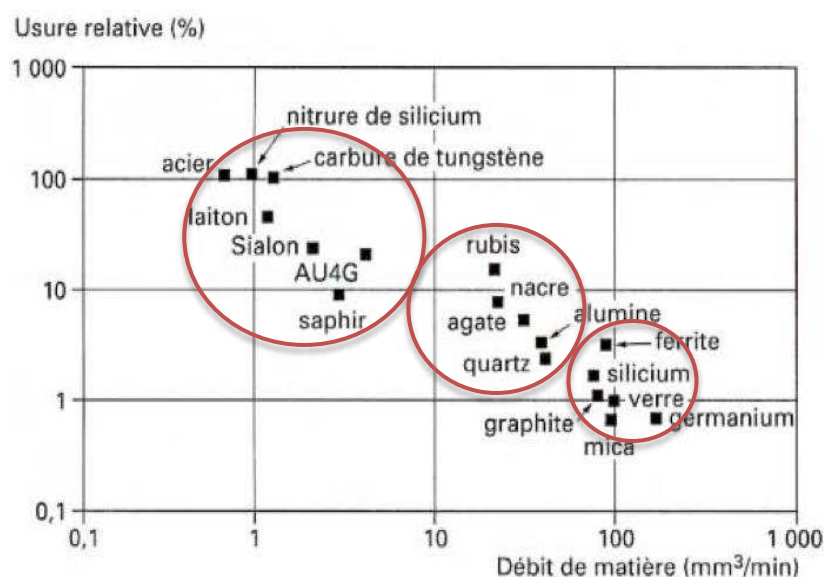


Figure 66 : Usinabilité ultrasonore en fonction du matériau de la pièce [56]

D'une manière générale, les performances de cet usinage sont difficiles à analyser car de nombreux paramètres entrent en jeu comme expliqué précédemment.

### III.6. Synthèse des technologies écartées et de celles retenues

Un tableau récapitulatif permettant d'établir une synthèse sur la faisabilité de la réalisation de la géométrie mesa par les technologies envisagées est présenté ci dessous (Tableau 4). Parmi toutes les techniques de fabrication et de mise en forme analysées précédemment, l'usinage d'un substrat céramique préalablement métallisé reste la meilleure solution pour permettre un bon alignement Cu / AlN.

Notre choix s'arrête sur la technique d'usinage par ultrasons d'un substrat céramique déjà métallisé pour la fabrication des échantillons. En effet, cette technique permet un usinage sans contrainte mécanique et un échauffement thermique minimisé par la circulation du fluide porteur. Elle permettra un usinage à la fois du cuivre et de l'AlN en respectant les critères d'alignement nécessaire à la structure mesa en garantissant un bord franc entre le cuivre et la céramique. Actuellement, il n'existe qu'un fabricant de machine à ultrasons (basé aux USA) et il existe à notre connaissance trois machines en France chez **FEMTO-ST**, **MICROCERTEC** et à l'**ONERA**.

| Faisabilité réalisation forme mesa par : | Inconvénients   | Avantages  |
|--|---|--|
| Moulage / Pressage                       | Problème de métallisation et d'alignement   | Répétabilité garantie de la mise en forme d'un échantillon à l'autre.  |
| SLA                                      | Problème de métallisation et d'alignement   | Répétabilité garantie de la mise en forme d'un échantillon à l'autre. Caractéristiques électriques et thermiques de l'AlN (inconnues / à valider). |
| LASER                                    | Réponse à l'excitation du laser différente pour le Cu et pour l'AlN. Procédé à optimiser : caractéristique laser fonction de la cible. Risque d'impact sur les propriétés physico-chimiques de l'AlN. | Répétabilité garantie de la mise en forme d'un échantillon à l'autre. Procédé quasi-athermique.  |
| Ultrasons                                | Le fluide porteur des grains d'abrasif peut être contaminé par les copeaux du matériau usiné et changer son pouvoir abrasif. Vérifier la répétabilité de la mise en forme d'un échantillon à l'autre. | Alignement.<br>Faible échauffement thermique.  |

Tableau 4 : Récapitulatif sur la faisabilité de réalisation de la géométrie mesa par les technologies envisagées

### III.7. Fabrication des prototypes de la structure MESA en AlN

#### III.7.1. Dimensionnement des électrodes

L'objectif des simulations ci-dessous est de dimensionner les échantillons, pour obtenir la valeur du renforcement de champ électrique aux points triples de l'électrode supérieure afin de tester « l'effet mesa ». Les résultats de la simulation en Figure 67 (b) représentent les différentes valeurs de champ électrique maximal se situant dans le gel silicone et dans la céramique, au niveau de l'électrode supérieure (courbe en noir pour la partie gel et courbe en bleu pour la partie céramique) et de l'électrode inférieure (courbe en rouge pour la partie gel et courbe en vert pour la partie céramique) et cela pour différentes largeurs d'électrode inférieure. L'augmentation de la largeur de l'électrode inférieure se fait de manière homothétique par rapport à l'électrode supérieure en gardant le même axe de symétrie (Figure 67 (a) trait en pointillé), avec une épaisseur de la céramique AlN de 1 mm. On constate qu'il est possible de contrôler la répartition du champ électrique entre les deux électrodes par la modification de la largeur de l'une par rapport à l'autre. Tant que la largeur de l'électrode inférieure est plus petite que celle du dessus (correspondant aux courbes de la partie gauche du trait en pointillé sur la Figure 67 (b)), le champ électrique est maximal au niveau de celle-ci et inversement. Lorsque les deux électrodes sont de largeurs identiques, les valeurs de champ électrique sur l'ensemble des matériaux sont au plus bas.

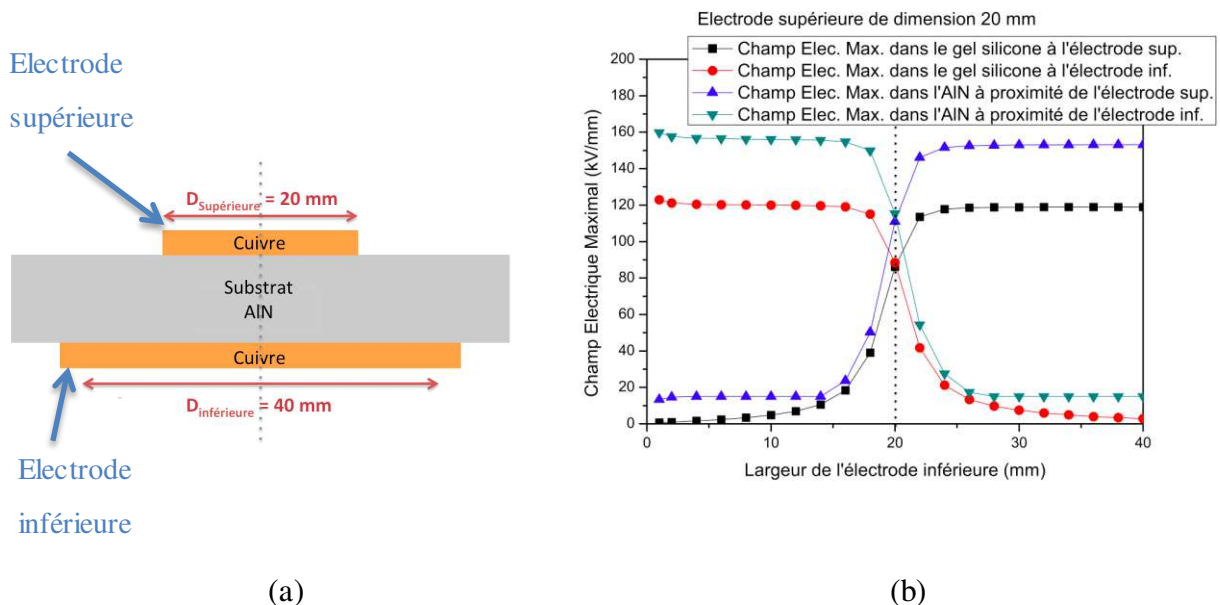


Figure 67 : (a) Représentation de la configuration simulée, (b) champ électrique maximal relevé aux faces supérieures et inférieures des électrodes pour différentes largeurs de l'électrode inférieure et de largeur fixe pour l'électrode supérieure ( $D_{Supérieure}=20 \text{ mm}$ ) (application de 15 kV sur l'électrode supérieure et électrode inférieure à la masse – substrat de 1 mm)

On peut conclure à un optimum d'après les simulations, garantissant le maximum du champ électrique au niveau de l'électrode supérieure lorsque la dimension de l'électrode inférieure dépasse d'au moins une fois et demie l'électrode supérieure.

### *III.7.2. Préparation des échantillons*

Deux hauteurs de mesa (Figure 68) ont été retenues pour cette étude expérimentale : 50  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  (correspondant à la hauteur du flanc vertical gravé dans l'AlN). Nous avons réalisé des échantillons à partir de 3 cartes « Master Card » DBC de 1 mm d'épaisseur d'AlN et métallisées sur les deux faces d'une épaisseur de cuivre de 0,3 mm. La dimension d'une carte est de 5,5"  $\times$  7,5". 12 électrodes rondes de diamètre 20 mm sur l'une des faces (correspondant aux l'électrodes supérieures) et 12 électrodes carrées de dimensions 40 mm sur l'autre face (correspondant aux électrodes inférieures) ont été gravées au perchlore de fer sur chacune des « Master Card ». Les échantillons élaborés sur les cartes sont ensuite séparés par une coupe à la meuleuse.

Parmi les échantillons et à partir d'essais de décharges partielles, nous en avons sélectionné 8 sans mesa, 8 usinés en forme de mesa de hauteur 50  $\mu\text{m}$  visée dans l'AlN et 8 usinés en forme de mesa de hauteur 250  $\mu\text{m}$  visée dans l'AlN dans le but de constituer des lots d'échantillons homogènes issus de « Master Card » différentes (Figure 68). La largeur de la gorge (le fond de la mesa) est prise à 1 mm, ce choix est fait pour des facilités d'usinage. Cette largeur correspond à la largeur de l'outil utilisé. D'autre part, les simulations du Chapitre II avaient montré que pour une largeur de fente supérieure à 500  $\mu\text{m}$ , ce paramètre n'avait plus d'impact sur la valeur du champ électrique maximal obtenu pour le système. (Figure 40 chapitre II, page 50).

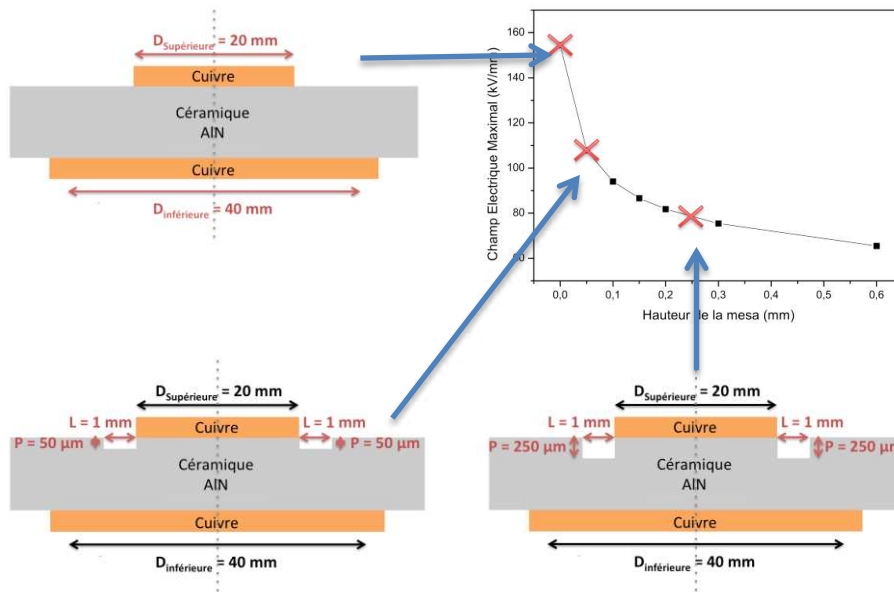


Figure 68 : échantillons sélectionnés (0; 0,05; 0,250 mm) suivant la courbe de variation du champ électrique maximal au niveau du point triple en fonction de la hauteur des mesas (application de 15 kV sur l'électrode supérieure et l'électrode inférieure à la masse)

### III.7.3. Usinage par ultrasons

Les échantillons ont été usinés par l'entreprise **MICROCERTEC** basée en Seine-et-Marne, équipée d'une machine à ultrasons (Figure 69) permettant la réalisation d'un usinage par génération. Ce mode d'usinage permet d'utiliser un outil standard (à l'extrémité de la sonotrode) qui est en forme de pointe de dimension variable et permet un déplacement latéral précis, permettant de dessiner l'empreinte. Pour rappel, l'autre technique existante pour l'usinage par ultrasons est la technique de défonçage qui permet une reproduction de forme, mais il aurait alors fallu dans notre cas, fabriquer un outil sur mesure (en forme de carotte).

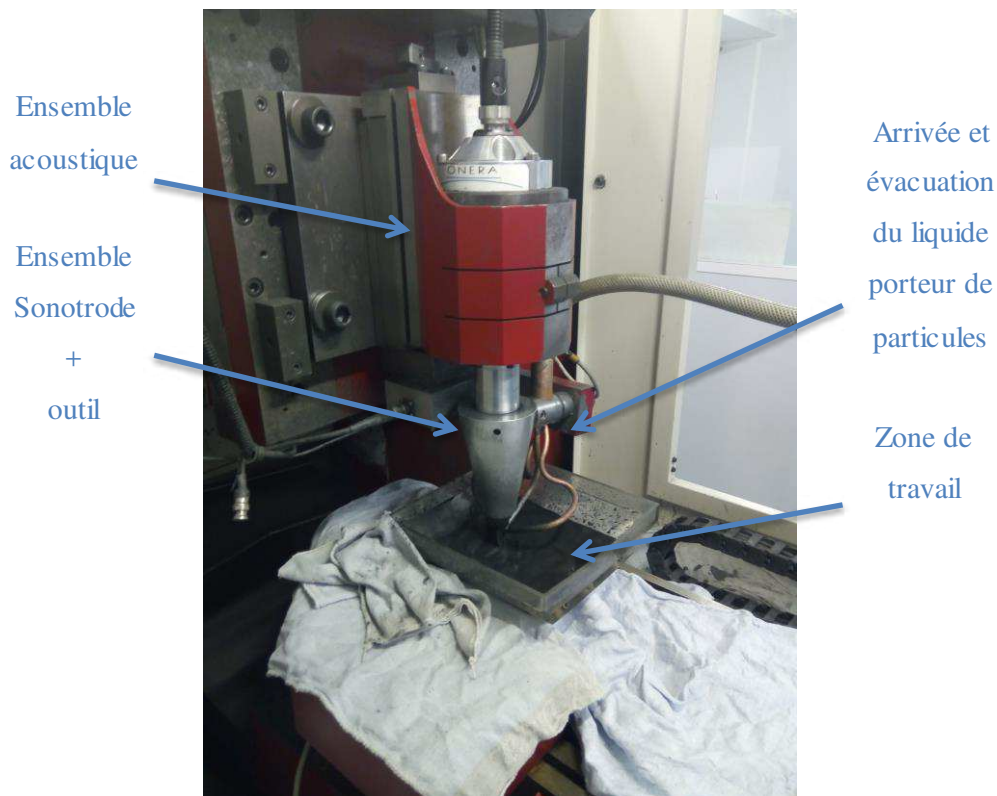


Figure 69 : Machine à ultrason de l'Entreprise Microcertec

La machine de l'entreprise utilise des outils en PCD (« *Polycrystalline Diamond* ») qui est un matériau composé de particules de diamant liées avec un liant métallique. Les grains abrasifs utilisés pour l'usinage sont en carbure de silicium de taille 400 ou 600 (grains / cm<sup>2</sup>) dans un liquide porteur constitué uniquement d'eau. La taille de l'outil varie entre 0,3 mm et 1 mm (disponibilité catalogue). Lorsque la pointe est neuve, son extrémité est de forme carrée, mais à mesure de son utilisation, ses bords s'arrondissent, engendrant l'apparition d'un congé qui peut être non négligeable pour les profils de gravure que nous souhaitons usiner. Ce congé de l'outil est donné par l'usineur d'un rayon maximum de 100 µm. Ceci signifie, une attaque de la céramique d'une profondeur totale maximale de 150 µm pour la première série de 8 échantillons (congé maximal plus une profondeur verticale visée de 50 µm) et de 350 µm pour la deuxième série de 8 échantillons (avec une profondeur verticale visée de 250 µm) (comme représenté en Figure 70).

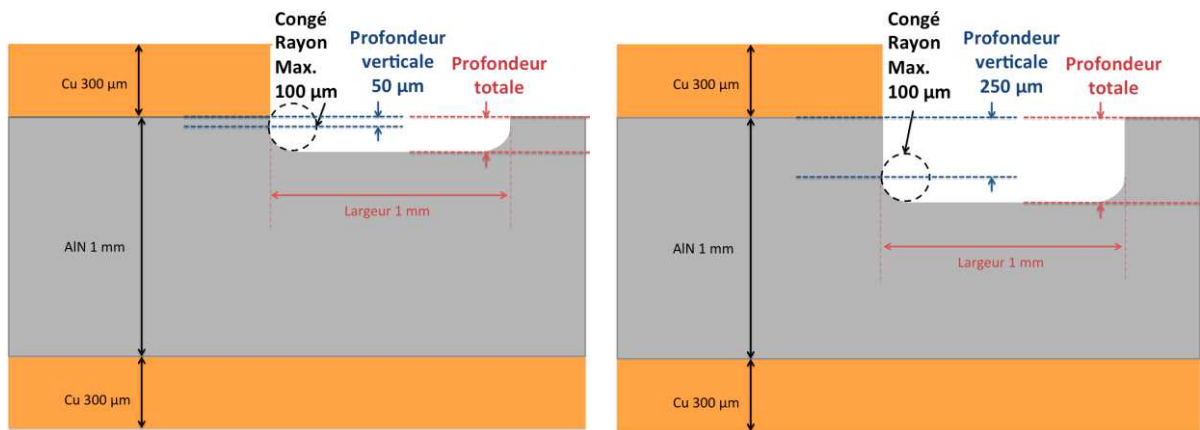


Figure 70 : Schéma en coupe de la zone usinée en 50  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  incluant les congés engendrés par l'outil

Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, la technique d'usinage par ultrasons permet de retirer à la fois le cuivre et l'AlN. Pour cela, une partie du cuivre sera rognée sur une largeur de 500  $\mu\text{m}$  (l'autre partie rognée sera de 500  $\mu\text{m}$  uniquement en AlN) et la forme en pointe laissée par l'étape de gravure du cuivre sera retirée pour laisser place à un bord de cuivre vertical. La totalité du retrait de la matière s'effectuera sur une largeur de 1 mm (Figure 71).

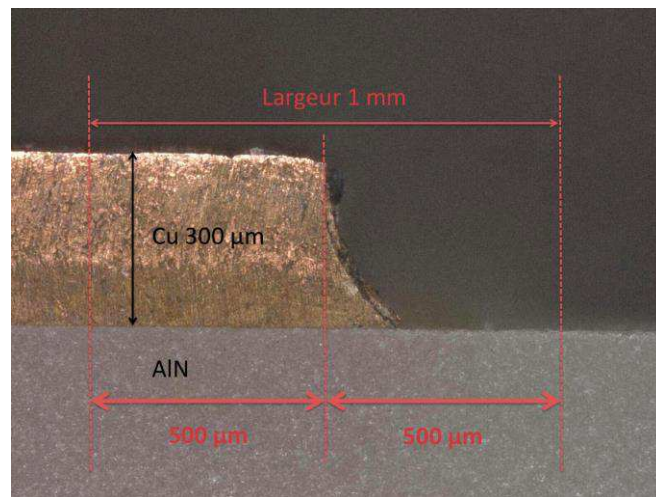


Figure 71 : Vue en coupe au microscope d'un profil de gravure DBC avant usinage

Les images ci-dessous (Figure 72 et Figure 73) montrent les profils de gravure obtenus par usinage ultrasons. Pour l'observation des échantillons usinés en 50 et 250  $\mu\text{m}$ , ceux-ci ont été encapsulés dans une résine époxy afin de permettre de leur découpe, d'où la présence de certaines traces sur les figures suivantes. Comme attendu, on observe un alignement vertical du bord de la mesa avec celui du cuivre et le pied de la mesa se termine par un congé correspondant à celui de l'outil utilisé. Mais comme nous pouvons l'observer sur la Figure 73, la profondeur totale de la gravure qui était attendue aux alentours de 350  $\mu\text{m}$  semble plus



proche de 500  $\mu\text{m}$ . La caractérisation de l'ensemble des échantillons des états de surface et des cotes obtenues est détaillée ci-après.

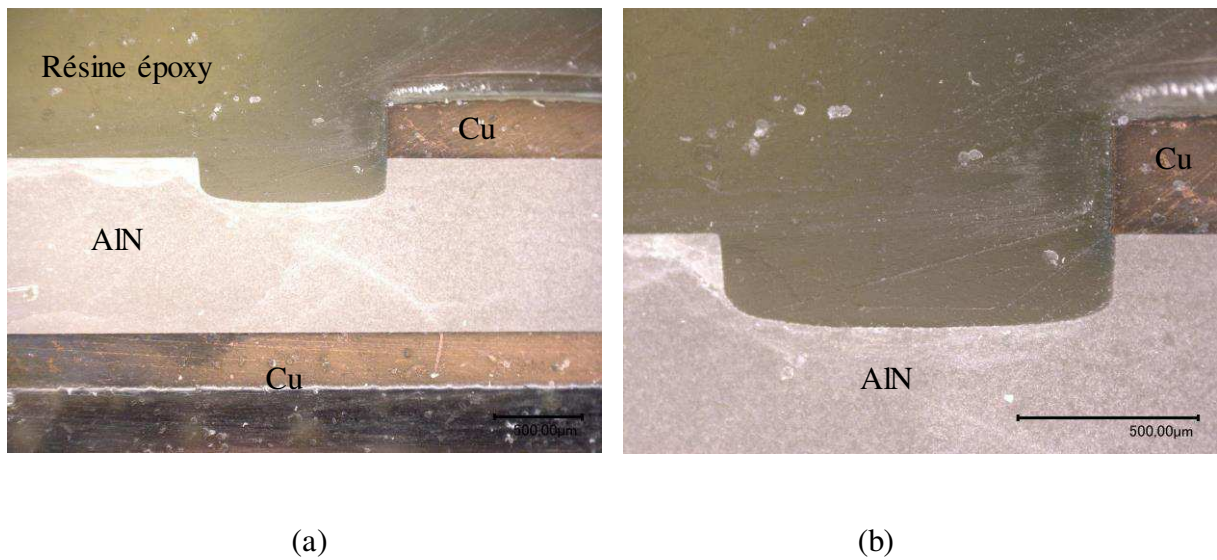


Figure 72 : Vue en coupe au microscope numérique du profil de (a) la mesa 50  $\mu\text{m}$ , et (b) zoom sur la partie usinée

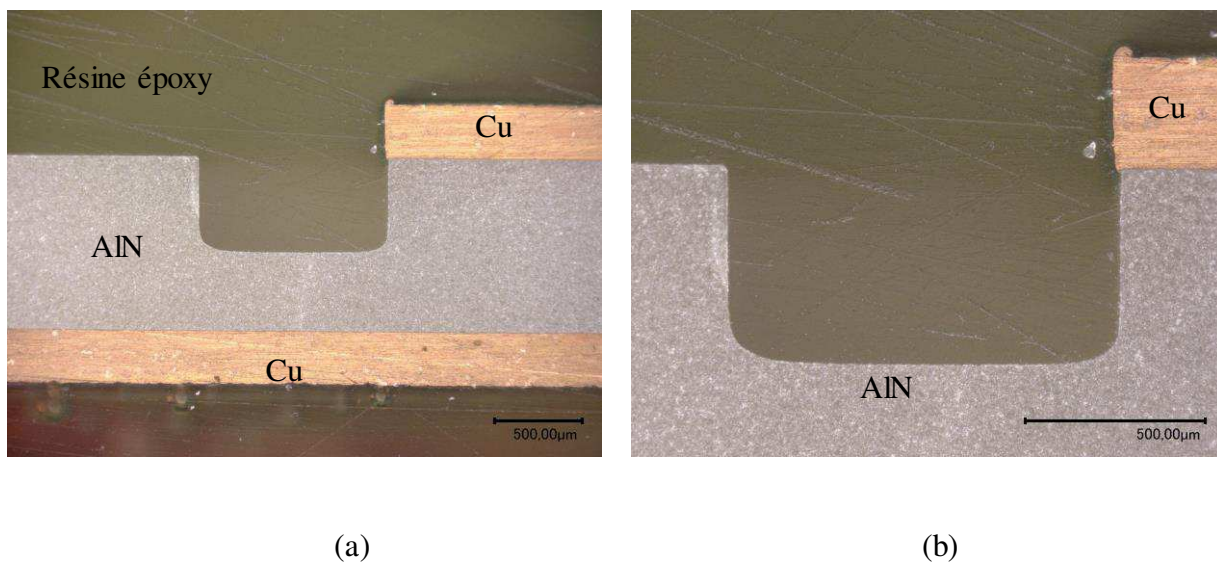


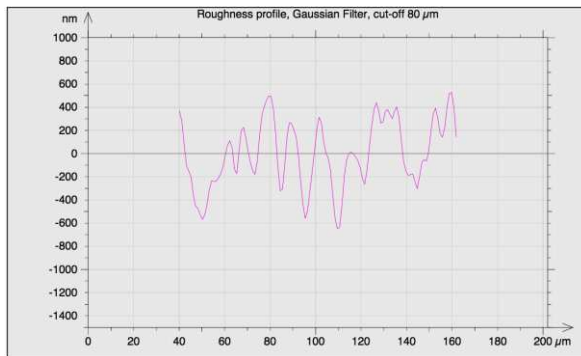
Figure 73 : Vue en coupe au microscope numérique du profil de (a) la mesa 250  $\mu\text{m}$ , et (b) zoom sur la partie usinée

#### III.7.4. Analyse des échantillons usinés

Nous avons procédé à la mesure de la rugosité d'une surface AlN non usinée et de celle usinée par ultrasons à l'aide d'un profilomètre mécanique (Figure 74). La rugosité est exprimée par le paramètre  $R_q$  fournissant une information sur la rugosité moyenne quadratique du profil et est corrélée avec le paramètre  $R_a$  qui est la rugosité moyenne

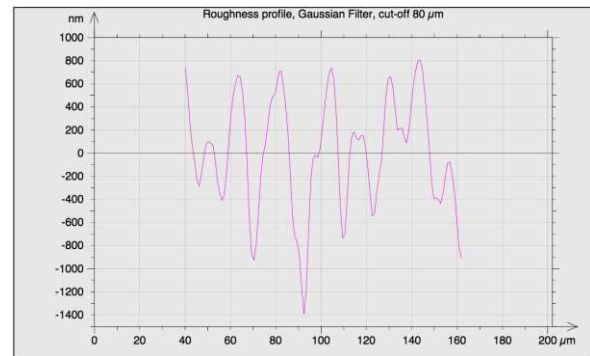


arithmétique du profil. La rugosité d'une surface usinée est doublée par rapport à une surface non usinée.



(a) surface non usinée

$$Ra = 231,6 \text{ nm} ; Rq = 289,2 \text{ nm}$$



(b) surface usinée

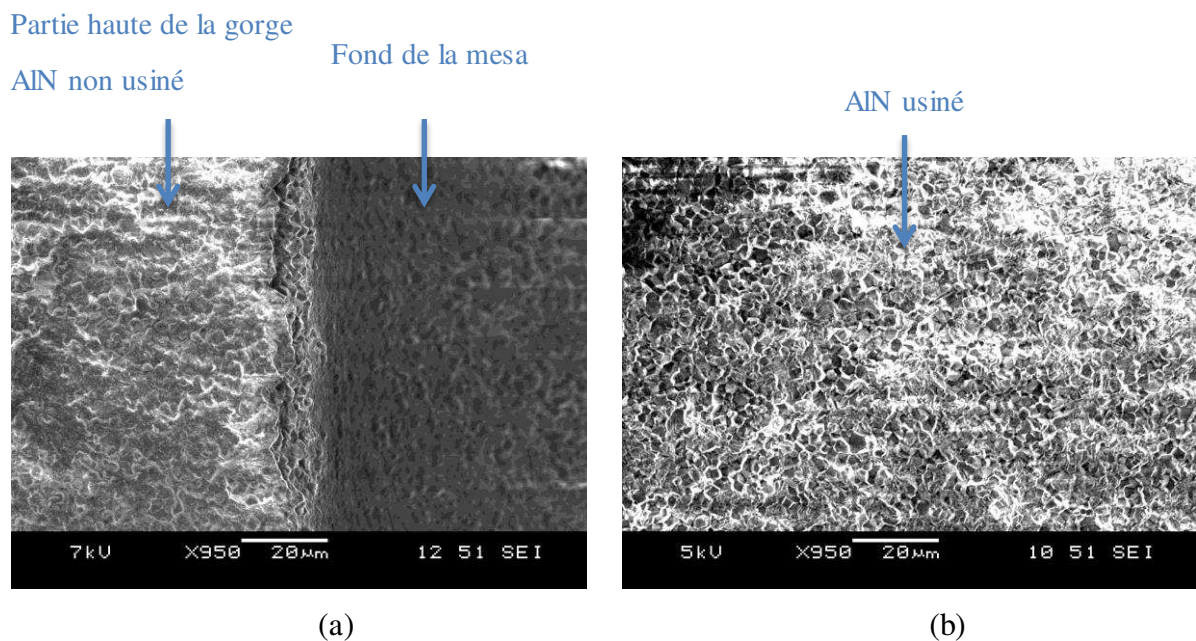
(échantillon en mesa 50 μm)

$$Ra = 389,5 \text{ nm} ; Rq = 498,9 \text{ nm}$$

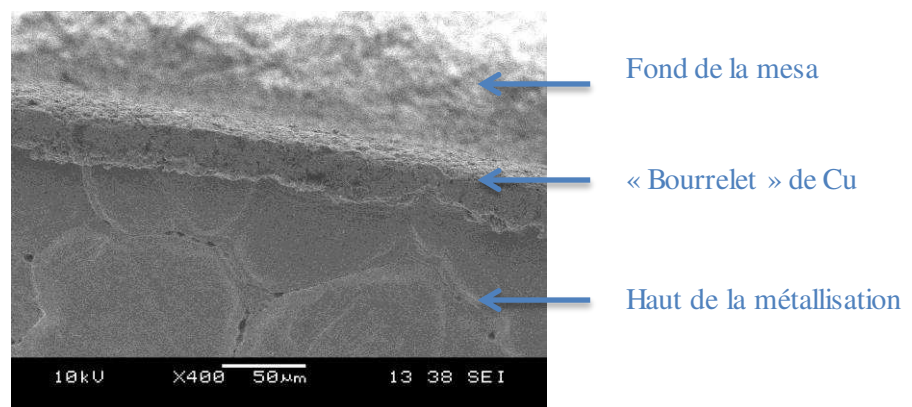
**Figure 74 : Rugosité par profilomètre mécanique (a) d'une surface céramique non usinée et (b) d'une surface usinée (fond de la gorge d'un échantillon en mesa 50 μm)**

Nous avons également observé l'état de surface de l'AlN par microscope électronique à balayage (MEB). Deux images sont comparées, celle d'une surface non usinée en Figure 75 (a) à celle d'une surface usinée en Figure 75 (b) afin de connaître les différences à l'échelle du micromètre que peut causer un tel usinage sur la céramique, tant sur le fond de la mesa que sur le cuivre (Figure 75 (a) et Figure 76).

L'observation du fond de la mesa est délicate, mais on constate que la surface usinée par ultrasons semble effectivement légèrement plus rugueuse (Figure 75 (b)). Mais cet enlèvement de matière est fait de manière très homogène. La Figure 75 (a) montre la partie haute de la mesa et le début de la gorge montrant que le flanc de la mesa se trouve être bien franc et net à l'échelle considérée. A l'inverse, l'usinage semble avoir impacté le bord du cuivre comme le montre la Figure 76 par l'apparition d'un « bourrelet » de cuivre qui est également visible sur la vue en coupe de l'échantillon présenté en Figure 73. Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'usinage par ultrasons est un procédé adapté à des matériaux durs ou fragiles et cassants. La ductilité du cuivre fait de lui un matériau beaucoup moins adapté à ce mode d'usinage, c'est pourquoi on voit apparaître un surplus de cuivre qui s'accumule en périphérie de l'électrode.



**Figure 75 : Observation de la surface de l'AlN sous microscope électronique à balayage, (a) à cheval sur une partie non usinée et usinée (fond de la mesa en 50 µm) et (b) sur une partie usinée (fond de la mesa en 50 µm)**



**Figure 76 : Observation du bord de la métallisation sous microscope électronique à balayage – mise en évidence d'un « bourrelet » de cuivre**

Afin de vérifier les cotes des différents échantillons usinés, et notamment par rapport aux hauteurs des flancs verticaux qui avaient été demandées (50 et 250 µm), les profondeurs de gravure ont été mesurées par profilomètre optique. Le Tableau 5 et le Tableau 6 présentent les résultats de mesures de la profondeur totale obtenues sur chacun des échantillons. Ces profondeurs mesurées comprennent le congé de l'outil et correspondent à la mesure « Profondeur totale » (Figure 70). Le flanc est trop abrupt pour être détecté au profilomètre mécanique (limite), l'entreprise a procédé à la mesure du rayon de courbure sur la pointe de l'outil après chaque usinage d'un échantillon. Le Tableau 5 et le Tableau 6 présentent également ces mesures de rayon de courbure. La troisième colonne des tableaux correspond à

la profondeur verticale, déduite pour chaque échantillon de la profondeur totale mesurée à laquelle est soustraite le rayon de courbure fourni par l'usineur.

D'après les valeurs de profondeurs totales relevées sur les échantillons usinés en mesa de 50 µm, la reproductibilité semble difficile et la mesa plus profonde qu'attendu (plutôt proche de 90 µm). Au fur et à mesure des usinages, on constate que le rayon de congé de l'outil augmente passant de 70 µm à 90 µm. Par conséquent, les échantillons usinés en mesa de 250 µm comprennent l'empreinte de congé la plus forte (80 à 90 µm) et les profondeurs sont également plus grandes qu'attendu (autour de 400 µm). Néanmoins une faible disparité des valeurs de profondeur verticale est observée sur les échantillons en mesa de 250 µm.

#### Échantillons 50 µm

| <b>Profondeur totale<br/>mesurée par<br/>Profilomètre mécanique</b> | <b>Congé de l'outil<br/>mesuré par<br/>Microcertec<br/>(rayon)</b> | <b>Profondeur verticale<br/>déduite (Soustraction<br/>du congé de l'outil<br/>aux prof. Totales)</b> |
|---|--|--|
| 150 µm  | 70 µm  | 80 µm  |
| 120 µm  | 70 µm  | 50 µm  |
| 130 µm  | 70 µm  | 60 µm  |
| 130 µm  | 70 µm  | 60 µm  |
| 190 µm  | 80 µm  | 110 µm   |
| 200 µm  | 80 µm  | 120 µm   |
| 200 µm  | 80 µm  | 120 µm   |
| 200 µm  | 80 µm  | 120 µm   |

**Tableau 5 : Récapitulatif des valeurs des congés de l'outil mesurées après chaque usinage et des profondeurs totales et verticales de chaque échantillon dans l'ordre d'usinage**

### Échantillons 250 µm

| <b>Profondeur totale<br/>mesurée par<br/>Profilomètre mécanique</b> | <b>Congé de l'outil<br/>mesuré par<br/>Microcertec<br/>(rayon)</b> | <b>Profondeur verticale<br/>déduite (Soustraction<br/>du congé de l'outil aux<br/>prof. Totales)</b> |
|---|--|--|
| 501 µm  | 80 µm  | 421 µm   |
| 500 µm  | 80 µm  | 420 µm   |
| 501 µm  | 90 µm  | 411 µm   |
| 490 µm  | 90 µm  | 400 µm   |
| 500 µm  | 90 µm  | 410 µm   |
| 490 µm  | 90 µm  | 400 µm   |
| 470 µm  | 90 µm  | 380 µm   |
| 502 µm  | 90 µm  | 412 µm   |

**Tableau 6 : Récapitulatif des valeurs des congés de l'outil mesurés après chaque usinage et des profondeurs totales et verticales de chaque échantillon dans l'ordre d'usinage**

L'usinage par ultrasons nous a permis d'usiner à la fois du cuivre et de l'AIN avec un alignement vertical du bord de la mesa avec celui du cuivre. Les états de surface obtenus par cette technique sont également bons avec une rugosité plus importante. Néanmoins, après contrôle des valeurs de profondeurs des mesas sur les échantillons, il semblerait que ce paramètre soit plus difficile à maîtriser. Les flancs verticaux initialement attendus étaient de 50 et 250 µm, mais après un contrôle des profondeurs, ils se rapprochent plus des valeurs de  $90 \pm 30$  µm et  $400 \pm 20$  µm. Ce mode d'usinage n'étant pas en contact direct avec la pièce à usiner (gap laissé entre l'outil et la pièce pour la circulation du liquide porteur de particules), le contrôle du paramètre profondeur est difficilement maîtrisable, en particulier pour les plus faibles profondeurs.

Pour faciliter la compréhension de la suite du manuscrit, on appellera les deux lots d'échantillons usinés « mesa de 90 µm » et « mesa de 400 µm ».

## Synthèse du Chapitre III

Nous avons présenté dans ce chapitre les substrats métallisés en céramique AlN, privilégiés dans les applications haute tension, ainsi que leurs différents procédés de fabrication allant du plus conventionnel (moulage / pressage) au plus innovant (fabrication additive). Nous en avons conclu que la technique par moulage et la fabrication additive de type SLA auraient pu répondre à nos attentes pour la réalisation du substrat en forme de mesa, mais le principal verrou est la post-réalisation de la métallisation (Figure 60). Quant à la technique de fabrication additive de type ADM, elle est encore en phase de développement mais semble être une technique vraiment prometteuse. Si une fabrication additive pouvait à la fois structurer le substrat céramique et la métallisation, elle offrirait une opportunité intéressante.

Nous avons fait le choix de procéder à une mise en forme d'un substrat céramique déjà métallisé DBC par la technique de gravure ultrasonique. Cet usinage s'est avéré vraiment efficace pour la réalisation d'échantillons avec un alignement parfaitement vertical de la métallisation avec la mesa. La reproductibilité des profondeurs de gravure a été plus difficile à maîtriser, en particulier pour la structure la moins profonde.

Le Chapitre IV portera sur la caractérisation électrique des échantillons par des tests de décharges partielles et de rigidité diélectrique.

## CHAPITRE IV - PROTOTYPES ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

### IV.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser les résultats expérimentaux permettant de quantifier et de qualifier le gain apporté par la structure mesa. Il commencera par rappeler la pertinence d'une structure en mesa par rapport à une structure plane à l'aide d'une preuve de concept sur des échantillons PCB, dans le but de valider la géométrie retenue. Suivra la caractérisation électrique des prototypes en céramique AlN obtenus par usinage ultrasons aux travers d'essais de décharges partielles et de rigidité diélectrique. Enfin les résultats seront analysés pour évaluer le réel potentiel de la structure mesa.

### IV.2. Preuve de concept par voie PCB

#### IV.2.1. Mise en œuvre des échantillons avec et sans mesa

##### a. Simulations

Le premier objectif a été de valider de manière expérimentale la géométrie de type mesa. Pour ce faire, nous avons choisi de réaliser une série d'échantillons à l'aide de la technologie « *Printed Circuit Board* » dit PCB sur la plateforme nationale 3DPHI.

Le choix du PCB s'est porté sur un pré imprégné « isola » PCL370HR 1080 [57] de faible épaisseur (76  $\mu\text{m}$ ), constitué d'un tissu en fibre de verre imprégné de résine époxyde, aussi appelé « prépreg ». Ce matériau possède une forte rigidité diélectrique ( $> 40 \text{ kV/mm}$ ). Donc, pour permettre de futurs essais de rupture diélectrique sur ces échantillons sous des tensions pas trop élevées, il était nécessaire de choisir une faible épaisseur. La Figure 77 représente les deux modèles d'échantillons proposés pour la réalisation des structures. Le but est de pouvoir réaliser ces géométries de manière simple, par un empilement de pré imprégné et de feuilles de cuivre.

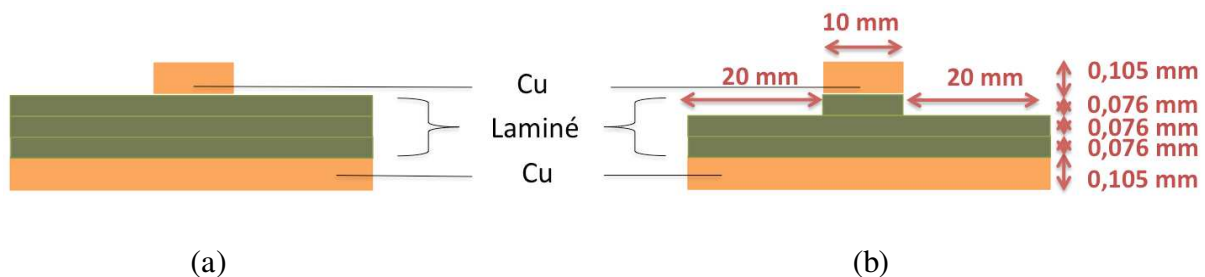
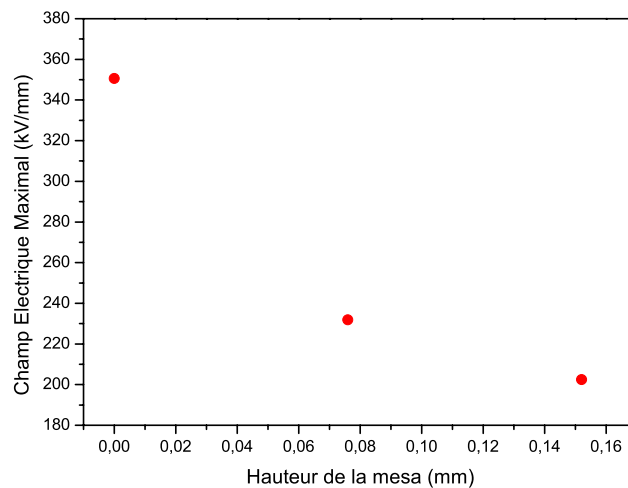


Figure 77 : (a) Structure conventionnelle, (b) structure mesa

Pour vérifier que le rapport des permittivités des matériaux ainsi que les dimensions de la géométrie proposée permettent d'observer un effet de diminution de la valeur de champ électrique maximal entre une géométrie conventionnelle et une géométrie mesa, une étude par simulation a été réalisée dans les mêmes conditions de maillage et de tension appliquée (15 kV) que celle présentée au Chapitre II. La permittivité relative du matériau PCL370HR 1080 [57] à l'état de laminé est donnée pour 5,1 et celle du Novec 649 [58] (qui est un fluide isolant fluoré dans lequel seront réalisés les différents tests électriques) est égale à 1,8. La simulation (Figure 78) de la structure conventionnelle aux dimensions présentées en Figure 77 (a) révèle un champ électrique maximal de 350 kV/mm. Lorsque l'on modifie la structure par la création d'une mesa de hauteur 76  $\mu\text{m}$  comme en Figure 77 (b), le champ électrique maximal obtenu sur la structure devient 231 kV/mm, ce qui permet une diminution significative de 34 % par rapport à la valeur relevée en structure conventionnelle. Ce résultat de simulation (Figure 78) de l'étude du champ électrique confirme que la preuve de concept est tout à fait réalisable par la technologie PCB.



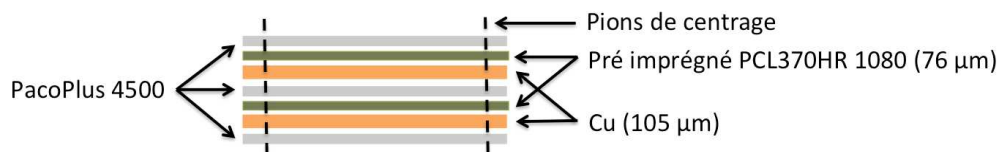
**Figure 78 : Variation du champ électrique maximal au niveau du point triple en fonction de la hauteur des mesas (0; 0,076; 0,152 mm) (application de 15 kV sur l'électrode supérieure et l'électrode inférieure à la masse)**

#### *b. Fabrication des structures avec et sans mesa*

La mise en œuvre des échantillons a été effectuée sur la plateforme nationale 3DPHI. La première étape de réalisation de l'échantillon en forme de mesa a consisté au laminage d'une feuille de cuivre d'épaisseur 105  $\mu\text{m}$  avec une feuille de pré imprégné par un mode de thermo pressage (pendant 1h30 à 190°C). Deux laminés ont été réalisés en un seul pressage comme le montre la Figure 79. Lors de la préparation des laminés, des feuilles sont intercalées, pour

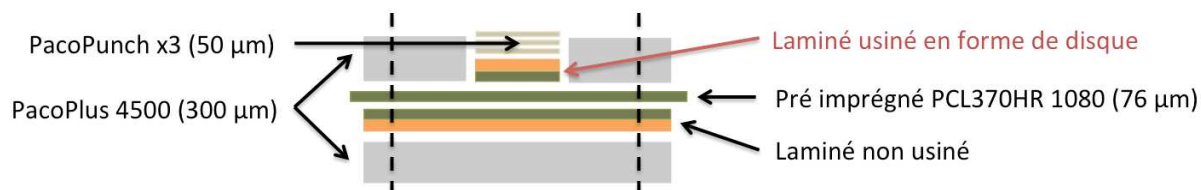


favoriser la répartition de la pression sur la surface entière du panneau et faciliter la phase de démoulage.



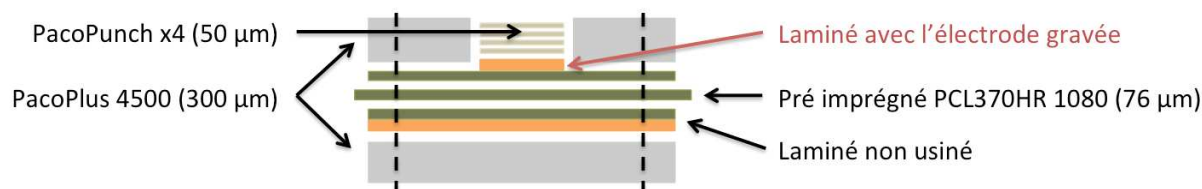
**Figure 79 : Agencement des feuilles pour la réalisation de deux laminés par pressage**

La seconde étape consiste à usiner un des deux laminés (cuivre et pré imprégné) par une micro fraiseuse pour la réalisation de la partie mesa de la géométrie, correspondant à un disque de diamètre 10 mm. Pour la structure mesa, ce disque est enfin assemblé sur l'autre laminé non usiné toujours par pressage et leur jonction est assurée par une feuille de pré imprégné (Figure 80).



**Figure 80 : Pressage du disque laminé sur le laminé restant pour obtenir l'échantillon de forme mesa**

La réalisation des échantillons en structure conventionnelle est effectuée par le même procédé de laminage (Figure 79). L'étape qui consistait à la micro gravure de l'un des deux laminés est remplacée par une étape de gravure chimique, permettant de dessiner une électrode en cuivre en forme de disque de 10 mm sur le pré imprégné. L'assemblage du laminé gravé chimiquement à l'autre non gravé est réalisé sur le même principe, par le pressage des deux éléments et d'une jonction faite par une feuille de pré imprégné comme le montre la Figure 81.



**Figure 81 : Pressage du laminé gravé chimiquement sur le laminé restant pour obtenir l'échantillon de forme conventionnelle**



#### *IV.2.2. Tests électriques des échantillons réalisés par la technologie PCB*

Les mesures des tensions de seuil d'apparition (TADP) et de l'intensité des décharges partielles ont été réalisées sous tension sinusoïdale de 50 Hz (banc test présenté en Annexe 1). La tension efficace appliquée est augmentée manuellement par paliers successifs. Le protocole de mesures (Annexe 1) consiste à augmenter la tension appliquée, jusqu'à la détection de premières décharges partielles d'intensité 1 pC, puis de poursuivre jusqu'à la détection d'un second seuil d'intensité de 10 pC (Tension de détection des décharges à 10 pC,  $TDP_{10\text{ pC}}$ ). Cette tension de seuil à 10 pC est alors maintenue pour une durée de 60 secondes permettant un temps suffisant pour l'établissement des décharges. Ensuite, la tension est diminuée jusqu'à ce que l'intensité des décharges soit inférieure à 1 pC, correspondant au seuil d'extinction des décharges partielles (TEDP). La tension est remise à zéro pour procéder à une nouvelle montée par palier pour une seconde détection des seuils à 1 pC puis à 10 pC. La tension relevée pendant le second passage à 10 pC est la tension de seuil retenue pour l'exploitation des données.

##### *a. Seuil d'apparition des décharges partielles des échantillons fabriqués par technologie PCB*

Toutes les mesures de décharges partielles des échantillons ont été faites dans le même liquide isolant (Novec 649). Les  $TDP_{10\text{ pC}}$  obtenues pour les échantillons avec et sans mesa sont représentées par les figures ci-dessous. Tous les échantillons ont été testés une première fois (Figure 82 (a)) puis un second passage des échantillons a été réalisé un autre jour (Figure 82 (b)) pour s'assurer de la reproductibilité des mesures.

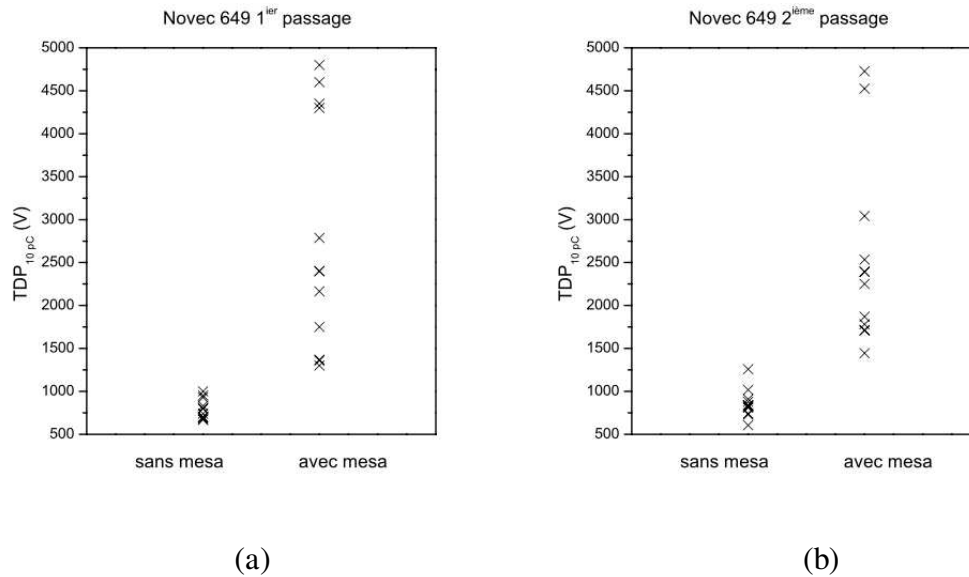


Figure 82 : Tension d'apparition des décharges partielles ( $TDP_{10pC}$ ) d'intensité 10 pC pour 12 échantillons avec et sans mesa ; (a) 1<sup>er</sup> et (b) 2<sup>ème</sup> passage – liquide isolant Novec 649

La première constatation montre que nous avons une reproductibilité des mesures (Tableau 7) pour les deux passages, et avec des tensions mesurées dans une gamme de 500 à 5000 V. On observe une différence remarquable de la moyenne des  $TDP_{10pC}$  obtenues sur des échantillons en configuration non mesa comparée à celle obtenue en configuration mesa avec un triplement du seuil moyen. On constate néanmoins une plus grande dispersion sur les résultats de mesures des échantillons avec mesa.

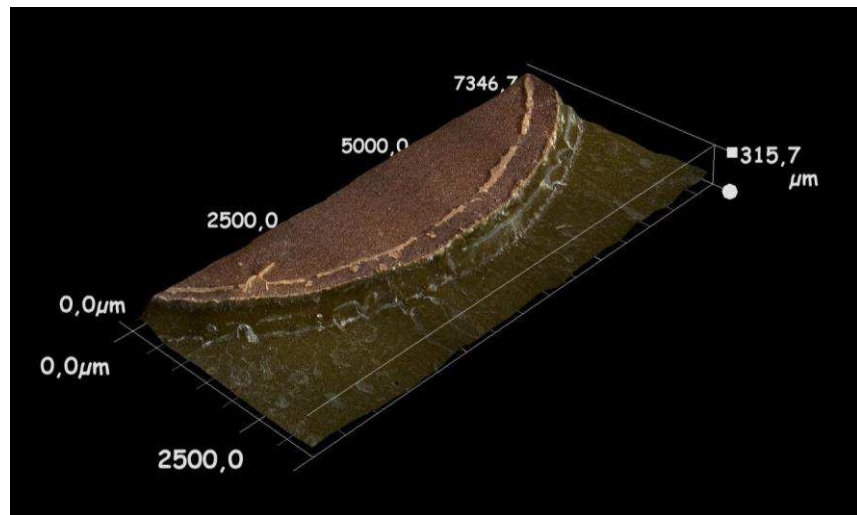
| Novec 649                |                   | Configuration sans mesa | Configuration avec mesa |
|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 <sup>er</sup> passage  | $TDP_{10pC}$ Max. | 1000 V                  | 4800 V                  |
|                          | $TDP_{10pC}$ Min. | 670 V                   | 1300 V                  |
|                          | <b>Moyenne</b>    | <b>800 V</b>            | <b>2798 V</b>           |
| 2 <sup>ème</sup> passage | $TDP_{10pC}$ Max. | 1259 V                  | 4727 V                  |
|                          | $TDP_{10pC}$ Min. | 605 V                   | 1445 V                  |
|                          | <b>Moyenne</b>    | <b>856 V</b>            | <b>2531 V</b>           |

Tableau 7 : Récapitulatif des valeurs de TADP et moyennes obtenues lors des essais dans le Novec 649

Globalement ces premiers résultats confirment une augmentation du seuil de  $TDP_{10pC}$  grâce à la géométrie mesa. Quant à la dispersion des valeurs de  $TDP_{10pC}$ , pour les échantillons mesa, elle peut être la conséquence du processus de fabrication (décrit précédemment) notamment de la partie mesa qui repose sur un procédé d'empilement d'un

laminé usiné par micro fraisage sur un autre laminé non usiné. Cette technique peut entraîner davantage d'irrégularités sur les bords de la mesa (Figure 83 (a)) et que l'on n'observe pas sur les échantillons non mesa simplement gravés chimiquement (Figure 83 (b)).

(a) géométrie mesa



(b) géométrie sans mesa

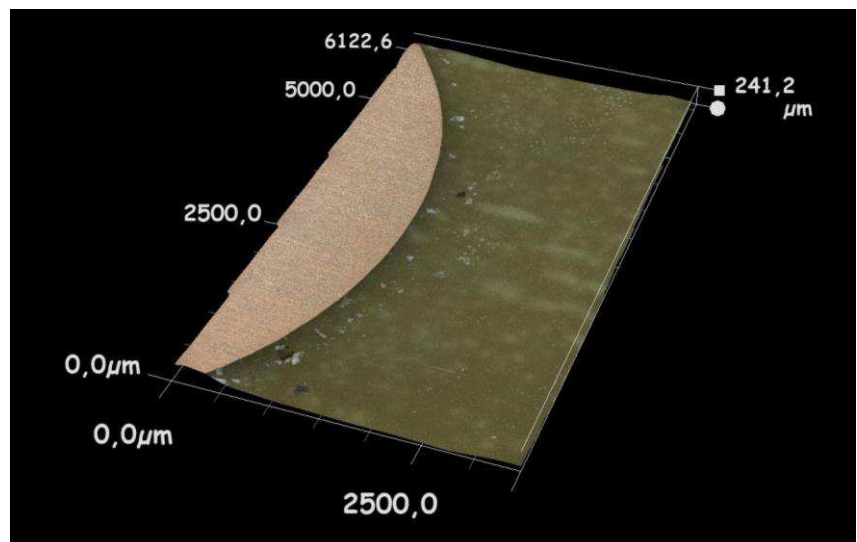


Figure 83 : Image 3D par microscope numérique d'un échantillon PCB (a) en configuration mesa et (b) non mesa

### *b. Rupture diélectrique des échantillons fabriqués par technologie PCB*

Le test final réalisé conduisant à la destruction des échantillons est la rupture diélectrique. L'appareil « BAUR DPA 75 C » (Figure 84) permet l'application d'une tension sinusoïdale 50 Hz avec une rampe de 1,5 kV/s sur un échantillon placé entre deux électrodes Rogowski dans un liquide isolant (dans notre cas, le Novec 649). Un mélangeur magnétique dans le fond du récipient permet au liquide isolant d'être en perpétuel mouvement. L'appareil permet d'effectuer uniquement des tests à température ambiante.



Figure 84 : Appareil « BAUR DPA 75 C » utilisé pour la rupture diélectrique des échantillons

Cet essai permet de connaître la tension de rupture des échantillons de géométrie avec et sans mesa. On constate qu'il n'y a pas de différence sur la tension de rupture atteinte par les échantillons avec et sans mesa, la moyenne est d'environ 7 kV (Tableau 8). Une importante dispersion des valeurs de tension de rupture est observée pour les échantillons sans mesa.

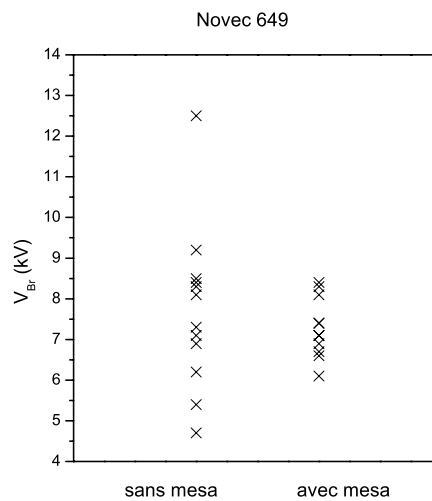


Figure 85 : Rupture diélectrique ( $V_{Br}$ ) de 12 échantillons avec et sans mesa – liquide isolant Novec 649

| Novec 649            | Configuration sans mesa | Configuration avec mesa |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| V <sub>Br</sub> Max. | 12,5 kV                 | 8,4 kV                  |
| V <sub>Br</sub> Min. | 4,7 kV                  | 6,1 kV                  |
| <b>Moyenne</b>       | <b>7,71 kV</b>          | <b>7,18 kV</b>          |

**Tableau 8 : Récapitulatif des tensions de rupture et moyennes obtenues lors des essais dans le Novec 649**

L'observation au microscope numérique des échantillons permet de constater que les ruptures se sont produites à la périphérie de la métallisation, du pied de la métallisation jusqu'à des distances relativement éloignées (jusqu'à 400 µm). Les ruptures se traduisent par un impact noir correspondant au canal traversant le laminé dans son épaisseur.

### *c. Conclusion sur la preuve de concept par voie PCB*

La géométrie en forme de mesa s'est révélée efficace pour l'augmentation du seuil de la tension d'apparition des décharges partielles. En revanche, elle ne semble pas avoir amélioré la tenue à la rupture diélectrique du système mais ne l'a pour autant pas dégradée. Les valeurs moyennes des tensions de rupture obtenues pour les deux configurations étant du même ordre (Tableau 8). Le point faible des deux géométries est peut-être le même et indépendant de la structure (mesa ou sans mesa). Le procédé de mise en œuvre n'a pas été optimisé pour la réalisation des structures pré imprégnées et les imperfections de mise en œuvre pourraient expliquer certains résultats obtenus, notamment par rapport à la dispersion des valeurs de rupture sans mesa. Malgré tout, ces premiers résultats s'avèrent encourageants et justifient la nécessité de tester cette géométrie dans le matériau céramique (AlN) utilisé pour les modules de puissance dédiés à la haute tension, et avec le procédé retenu pour la mise en œuvre de la mesa.

## **IV.3. Tests électriques des échantillons céramiques réalisés par gravure ultrasonique**

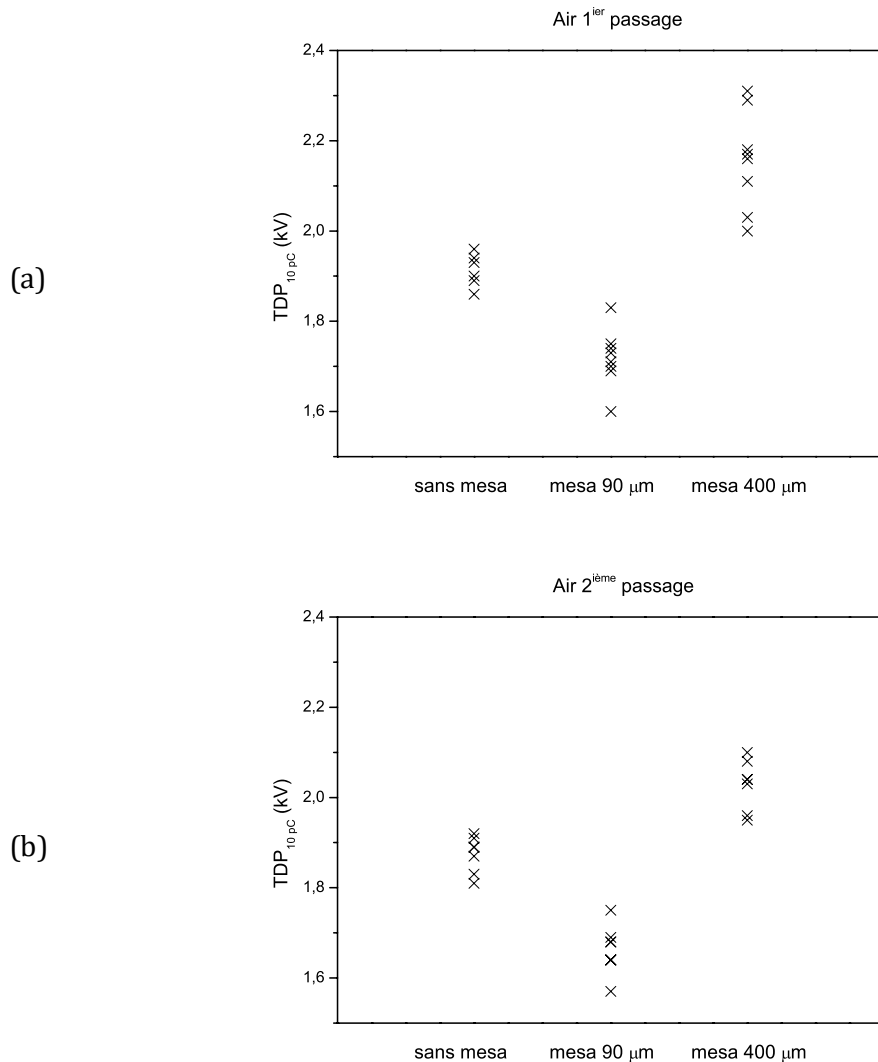
Dans le chapitre III, nous avons fait le choix d'utiliser une technique de gravure ultrasonique à partir de substrats céramiques AlN d'épaisseur 1 mm déjà métallisés. Nous allons vérifier dans cette section les propriétés de la structure mesa mises en évidence par simulation lors du chapitre II.

### *IV.3.1. Seuil d'apparition des décharges partielles des échantillons usinés par technologie ultrasons*

Avant chaque campagne de mesures de seuil d'apparition des décharges partielles, nous avons procédé au nettoyage des échantillons par bain à ultrasons dans de l'eau déionisée. Nous avons effectué des mesures de décharges partielles à l'aide du banc de test du laboratoire LAPLACE. Le protocole de mesure des décharges partielles est le même que pour les échantillons fabriqués par voie PCB et plusieurs tests ont été effectués dans des milieux différents : air, Novec 649, Galden HT 55 et FC72.

#### *a. Test sous air*

Les mesures de décharges partielles pour une activité de 10 pC ont été relevées pour les trois séries d'échantillons : sans mesa, avec mesa de 90  $\mu\text{m}$  et de 400  $\mu\text{m}$ . Tous les échantillons ont été testés une première fois (Figure 86 (a)) puis une seconde (Figure 86 (b)).



**Figure 86 : Tension d'apparition des décharges partielles (TDP<sub>10 pC</sub>) d'intensité 10 pC pour les échantillons avec et sans mesa ; (a) 1<sup>er</sup> et (b) 2<sup>ieme</sup> passage – Test sous air**

Les moyennes des tensions de décharges partielles à 10 pC (TDP<sub>10 pC</sub>) obtenues lors des deux campagnes de mesures sont similaires (Tableau 9), avec une tension moyenne autour de 1900 V pour des échantillons sans mesa, autour de 1700 V pour des échantillons en mesa de 90 µm et autour de 2100 V pour des échantillons en mesa de 400 µm.

On remarque une amélioration du seuil de TDP<sub>10 pC</sub> autour de + 10 % lors des deux essais sur les échantillons en mesa de 400 µm par comparaison au seuil atteint par ceux sans mesa. En revanche, les échantillons en mesa de 90 µm ont un seuil de TDP<sub>10 pC</sub> dégradé avec un abaissement d'environ 10 % par rapport au seuil moyen atteint par les structures sans mesa.



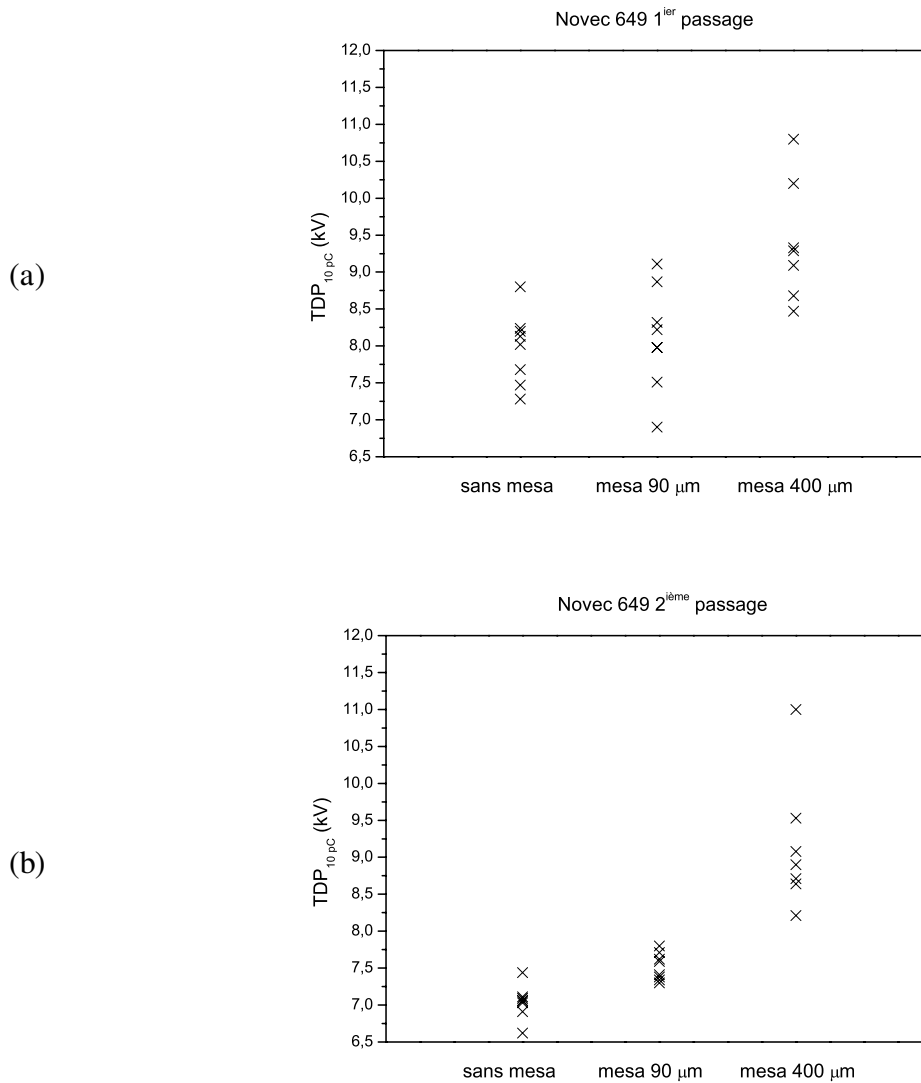
| Air                      |                           | Configuration sans mesa | Config. avec mesa 90 $\mu\text{m}$ | Config. avec mesa 400 $\mu\text{m}$ |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 <sup>er</sup> passage  | TDP <sub>10 pC</sub> Max. | 1960 V                  | 1830 V                             | 2310 V                              |
|                          | TDP <sub>10 pC</sub> Min. | 1860 V                  | 1600 V                             | 2000 V                              |
|                          | <b>Moyenne</b>            | <b>1913 V</b>           | <b>1720 V</b>                      | <b>2160 V</b>                       |
| 2 <sup>ème</sup> passage | TDP <sub>10 pC</sub> Max. | 1920 V                  | 1750 V                             | 2080 V                              |
|                          | TDP <sub>10 pC</sub> Min. | 1810 V                  | 1570 V                             | 1950 V                              |
|                          | <b>Moyenne</b>            | <b>1880 V</b>           | <b>1660 V</b>                      | <b>2030 V</b>                       |

**Tableau 9 : Récapitulatif des valeurs de TDP<sub>10 pC</sub> et moyennes obtenues lors des essais dans l'air**

Les tests sous air mettent à contribution des imperfections de surface associées à la métallisation du substrat (effets couronnes). Un effet de pointe peut être engendré par l'arrête supérieure de la métallisation, comme présenté lors de l'étude par simulation menée au chapitre 2 (Figure 36, p 50) qui montrait une atténuation du champ électrique maximal à l'extrémité haute de l'électrode de 10 % entre une géométrie sans mesa et une géométrie en mesa de 300  $\mu\text{m}$ . Ce mécanisme pourrait expliquer les niveaux de TDP<sub>10 pC</sub> obtenus expérimentalement pour les échantillons en mesa les plus profonds. A l'inverse, pour les échantillons en mesa de 90  $\mu\text{m}$ , on suppose que l'amélioration apportée par la géométrie mesa n'est pas suffisante pour compenser la dégradation de la métallisation et de la rugosité de surface de l'AlN subies lors de l'usinage et qui avaient été observées au chapitre 3 (fig. 74, p 92) par la présence de bourrelets en bord de métallisation.

#### *b. Test dans un fluide isolant (Novec 649)*

Nous avons procédé à des mesures de décharges partielles dans un liquide isolant Novec 649, qui permet de se rapprocher des conditions d'utilisation des modules de puissance avec un encapsulant aux meilleures propriétés de tenue en tension. Les échantillons sont nettoyés avant chaque campagne de mesures et pour s'assurer de la reproductibilité des mesures, ils ont été testés une première fois puis nous avons procédé au changement du liquide isolant pour un second passage en différé (Figure 87 (a) et (b)).



**Figure 87 : Tension d'apparition des décharges partielles (TDP<sub>10 pC</sub>) d'intensité 10 pC pour les échantillons avec et sans mesa ; (a) 1<sup>er</sup> et (b) 2<sup>ieme</sup> passage – liquide isolant Novec 649**

De manière générale, les moyennes de seuil de TDP<sub>10 pC</sub> atteintes pour les trois séries d'échantillons entre le premier et le deuxième passage restent dans le même ordre de grandeur (Tableau 10). Comme pour l'essai précédent sous air, on observe une amélioration de la moyenne des TDP<sub>10 pC</sub> obtenues sur des échantillons en mesa de 400 µm comparée à celle obtenue par les échantillons sans mesa (+ 24 % en moyenne). A l'inverse des essais précédents, les échantillons en mesa de 90 µm ne dégradent pas le seuil moyen de TDP<sub>10 pC</sub> par rapport au seuil moyen atteint par les sans mesa (+ 2 % pour le premier passage et + 6 % pour le deuxième passage). Le Novec 649 étant meilleur isolant que l'air, les seuils de d'apparition des décharges sont plus élevés que ceux détectés dans l'air. Le test dans un liquide isolant a pour effet d'atténuer l'activation des décharges partielles liées à d'éventuels

défauts de surfaces, ce qui explique que le seuil de TDP<sub>10</sub> des échantillons en mesa de 90 µm n'est plus dégradé (comme pour l'air) par rapport au seuil moyen atteint par les structures sans mesa.

| Novec 649                 |                           | Configuration sans mesa | Config. avec mesa 90 µm | Config. avec mesa 400 µm |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 <sup>er</sup> passage   | TDP <sub>10 pC</sub> Max. | 8,8 kV                  | 9,11 kV                 | 10,8 kV                  |
|                           | TDP <sub>10 pC</sub> Min. | 7,28 kV                 | 6,9 kV                  | 8,47 kV                  |
|                           | <b>Moyenne</b>            | <b>7,95 kV</b>          | <b>8,11 kV</b>          | <b>9,41 kV</b>           |
| 2 <sup>ième</sup> passage | TDP <sub>10 pC</sub> Max. | 7,44 kV                 | 7,8 kV                  | < 11 kV                  |
|                           | TDP <sub>10 pC</sub> Min. | 6,62 kV                 | 7,3 kV                  | 8,71 kV                  |
|                           | <b>Moyenne</b>            | <b>7,04 kV</b>          | <b>7,51 kV</b>          | <b>9,15 kV</b>           |

**Tableau 10 : Récapitulatif des valeurs de TDP<sub>10 pC</sub> et moyennes obtenues lors des essais dans le Novec 649**

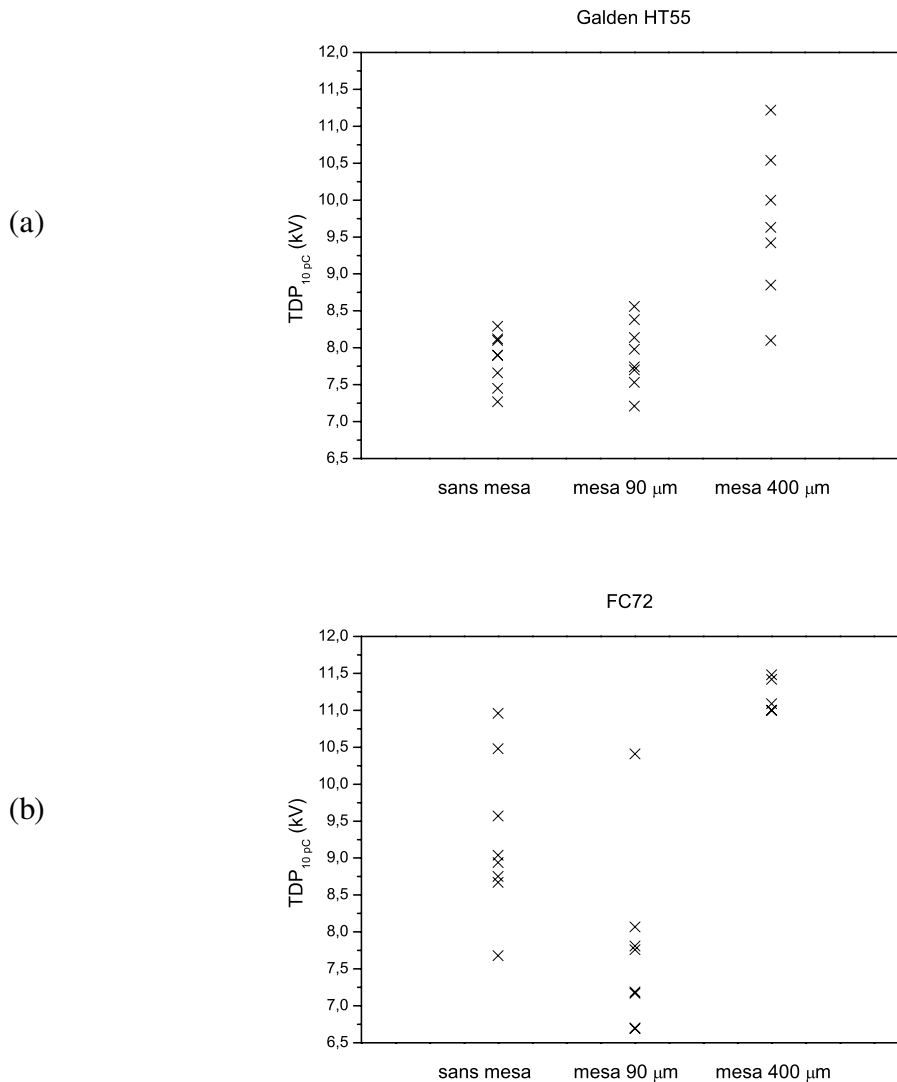
*c. Test dans des autres fluides isolants (Galden HT55 et FC72)*

Pour confirmer la tendance précédente, des essais de mesures de décharges partielles pour les trois séries d'échantillons, ont été effectués dans deux autres liquides isolants fluorés : le Galden HT55 [59] et le FC72 [60], dont les propriétés en termes de champ de rupture, de conductivité et de permittivité sont comparables au Novec 649. Les principales propriétés sont reportées Tableau 11 avec une différence uniquement de conductivité entre le FC72 et les deux autres.

|                          | Novec 649               | Galden HT 55            | FC 72                   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Champ de Rupture         | 16kV/mm                 | 16kV/mm                 | 15,2kV/mm               |
| Permittivité             | 1,8                     | 1,86                    | 1,75                    |
| Conductivité             | 1.10 <sup>12</sup> Ω.cm | 1.10 <sup>12</sup> Ω.cm | 1.10 <sup>15</sup> Ω.cm |
| Viscosité Absolue        | 0,64 centipoise         | 0,64 centipoise         | 0,64 centipoise         |
| Température d'ébullition | 49°C                    | 55°C                    | 56°C                    |

**Tableau 11 : Propriétés principales des liquides fluorés selon les spécifications des fabricants**

Nous avons procédé à une seule campagne de mesures pour les deux autres liquides et les seuils de TDP<sub>10 pC</sub> obtenus pour les échantillons sont représentés en Figure 88.



**Figure 88 : Tension d'apparition des décharges partielles (TDP<sub>10pC</sub>) d'intensité 10 pC pour les échantillons avec et sans mesa – dans le liquide isolant Galden HT55 et le FC72**

Les résultats des mesures de décharges partielles suivent la même tendance que lors des essais dans le liquide isolant Novec 649, à savoir, une augmentation du seuil de TDP<sub>10pC</sub> de + 23 % dans le Galden HT55 et de + 21 % dans le FC72 entre une structure sans mesa et une structure en mesa de 400 µm.

On remarquera que dans le liquide FC72, les niveaux de TDP<sub>10pC</sub> obtenus sont plus élevés et un peu plus dispersés pour les échantillons en mesa de 400 µm. Les échantillons en mesa de 90 µm obtiennent eux le même niveau de TDP<sub>10pC</sub>, toujours dégradé par rapport à la mesure de la structure sans mesa (Tableau 13) (ce qui rejoint la même tendance relevée sous air).

| Galden HT55              | Configuration sans mesa | Config. avec mesa 90 $\mu\text{m}$ | Config. avec mesa 400 $\mu\text{m}$ |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| TDP <sub>10pC</sub> Max. | 8,29 kV                 | 8,56 kV                            | 11,22 kV                            |
| TDP <sub>10pC</sub> Min. | 7,27 kV                 | 7,21 kV                            | 8,1 kV                              |
| <b>Moyenne</b>           | <b>7,84 kV</b>          | <b>7,84 kV</b>                     | <b>9,68 kV</b>                      |
| Ecart Type               | 0,35 kV                 | 0,42 kV                            | 1,04 kV                             |

Tableau 12 : Récapitulatif des valeurs de TDP<sub>10pC</sub> et moyennes obtenues lors des essais dans le Galden HT55

| FC72                     | Configuration sans mesa | Config. avec mesa 90 $\mu\text{m}$ | Config. avec mesa 400 $\mu\text{m}$ |
|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| TDP <sub>10pC</sub> Max. | 10,48 kV                | 10,41 kV                           | 11,48 kV                            |
| TDP <sub>10pC</sub> Min. | 7,68 kV                 | 6,69 kV                            | 11 kV                               |
| <b>Moyenne</b>           | <b>9,26 kV</b>          | <b>7,72 kV</b>                     | <b>11,17 kV</b>                     |
| Ecart Type               | 1,19 kV                 | 0,51 kV                            | 0,22 kV                             |

Tableau 13 : Récapitulatif des valeurs de TDP<sub>10pC</sub> et moyennes obtenues lors des essais dans le FC72

En conclusion, les tests de décharges partielles effectués dans différentes huiles aux propriétés similaires, révèlent des résultats relatifs comparables avec peu ou pas d'amélioration pour une mesa de 90  $\mu\text{m}$  et une amélioration avec une mesa de 400  $\mu\text{m}$ . En revanche, les tensions de seuil sont différentes en valeur absolue, notamment dans le FC72. Le gain relatif sur l'élévation du seuil de TDP<sub>10pC</sub> entre une structure sans mesa et une structure en mesa de 400  $\mu\text{m}$  est semblable pour chaque huile et de + 24 % dans le Novec 649, + 23 % dans le Galden HT55 et + 21 % dans le FC72.

#### IV.3.2. Rupture diélectrique des échantillons usinés par technologie ultrasons

La rupture diélectrique des trois séries d'échantillons est mesurée avec le même appareil que pour les échantillons fabriqués en PCB. Nous avons procédé à la rupture dans le liquide isolant Galden HT55. Les courbes de probabilité cumulée de claquage suivant la recherche de l'extremum de probabilité par la loi de Weibull des trois séries d'échantillons sont présentées sur la Figure 89<sup>2</sup>. Le champ de rupture injecté dans la loi est calculé à partir de la tension de

<sup>2</sup> Standard IEEE 930

rupture divisée par l'épaisseur entre les métallisations supérieure et inférieure du substrat (soit 1 mm pour les différents types d'échantillons).

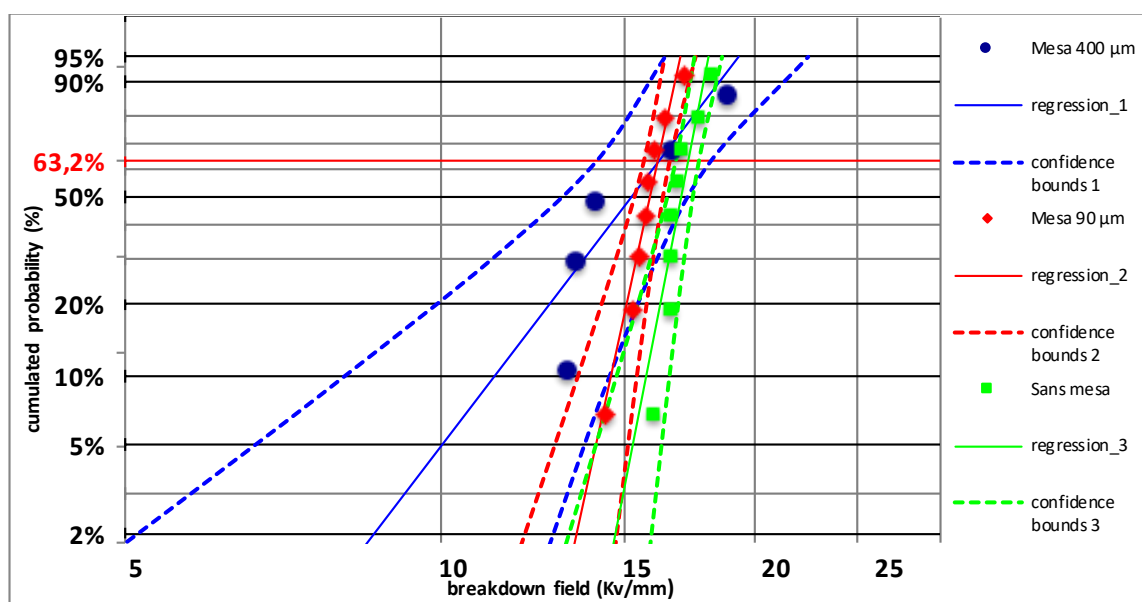


Figure 89 : Probabilité cumulé de claquage pour les 3 types d'échantillon

L'approximation par une régression linéaire des paramètres de la loi d'extrémum généralisée de distribution de Weibull est obtenue par la méthode de White [61] qui est une méthode dérivée des moindres carrés plus adaptée pour un petit nombre d'échantillons (< 20). A partir des droites en trait plein, nous pouvons estimer les probabilités cumulées. Les résultats de rupture de l'ensemble des échantillons sont proches si on regarde la probabilité à 63 % (63 % des échantillons auront claqués pour cette valeur) : sans mesa (17,2 kV/mm), avec mesa de 90 µm (16,1 kV/mm), avec mesa de 400 µm (16,1 kV/mm). Les intervalles de confiance, tracés en lignes pointillées, sont estimés par la méthode de Monte-Carlo (plus adaptée pour les petits nombres d'échantillons). On constate une dispersion plus importante pour les échantillons en mesa de 400 µm avec un intervalle de confiance plus important comme traduit par un facteur  $\beta$  de Weibull faible égal à 6,24 par rapport aux autres types d'échantillons (mesa 90 µm  $\beta = 21,9$  et sans mesa  $\beta = 24,4$ ). Suivant le nombre d'échantillons, une représentation de la tension de claquage de chaque échantillon peut être observée Figure 90. Cette représentation nous permet de mettre en évidence la dégradation du niveau de la tension de rupture avec l'effet mesa, en particulier si le point singulier de l'échantillon autour de 19 kV de l'échantillon en mesa de 400 µm est écarté.

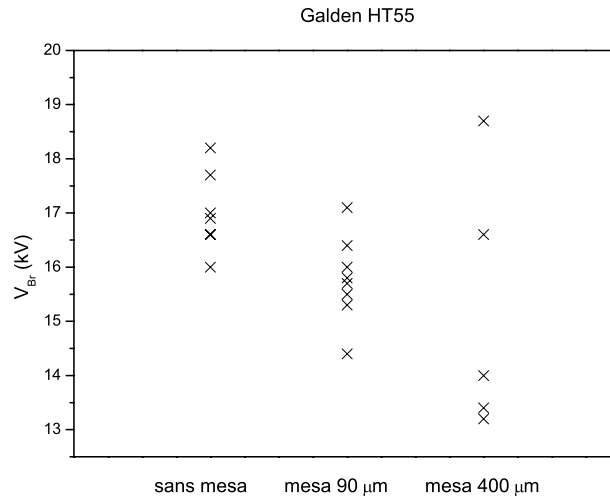


Figure 90 : Tension de rupture ( $V_{Br}$ ) des échantillons avec et sans mesa – liquide isolant Galden HT55

Sur la Figure 90 qui représente les valeurs de rupture à l'état brut (car au vu du nombre d'échantillons, notamment pour les mesas de 400  $\mu\text{m}$ , la loi de Weibull et notamment sa régression et ses intervalles peuvent être remis en question [62]) les tensions de rupture atteintes par les échantillons se trouvent toutes être dans une moyenne comprise entre 15 à 17 kV (Tableau 14). On retrouve la même analyse avec une valeur moyenne plus faible pour les échantillons usinés et une plus grande dispersion sur les échantillons en mesa de 400  $\mu\text{m}$ .

| Galden HT55    | Configuration sans mesa | Config. avec mesa 90 $\mu\text{m}$ | Config. avec mesa 400 $\mu\text{m}$ |
|----------------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| $V_{Br}$ Max.  | 18,2 kV                 | 17,1 kV                            | 18,7 kV                             |
| $V_{Br}$ Min.  | 16 kV                   | 14,4 kV                            | 13,2 kV                             |
| <b>Moyenne</b> | <b>16,95 kV</b>         | <b>15,82 kV</b>                    | <b>15,18 kV</b>                     |
| Ecart type     | 0,70 kV                 | 0,79 kV                            | 2,39 kV                             |

Tableau 14 : Récapitulatif des tensions de rupture et moyennes obtenues lors des essais dans le Galden HT55

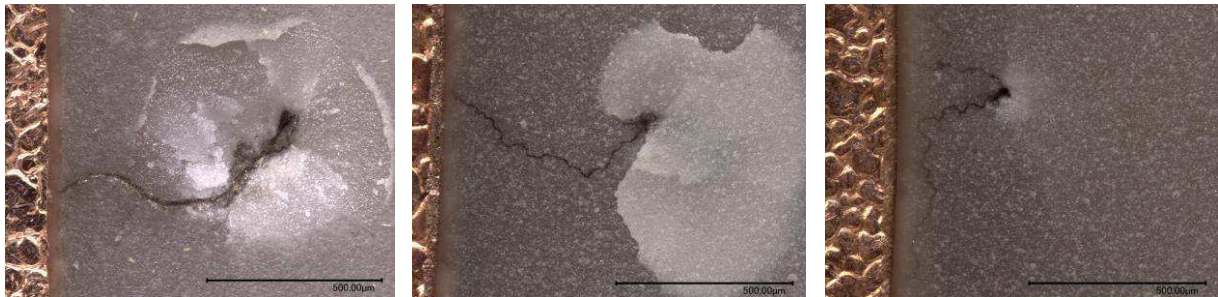
Cela met en évidence que l'effet mesa attendu n'opère pas sur la tension de rupture (dans le Galden HT55), les résultats des tensions de rupture obtenus pour les échantillons AIN comme pour les échantillons en PCB (dans le Novec 649) sont similaires : nous



n'observons pas d'augmentation de la rigidité diélectrique d'un échantillon en forme de mesa par rapport à un échantillon sans mesa.

*a. Analyse des zones de claquage des échantillons au microscope numérique*

Tous les échantillons AlN ont été observés au microscope numérique, dans le but d'approcher les zones où les ruptures se sont produites et analyser les empreintes laissées par celles-ci.

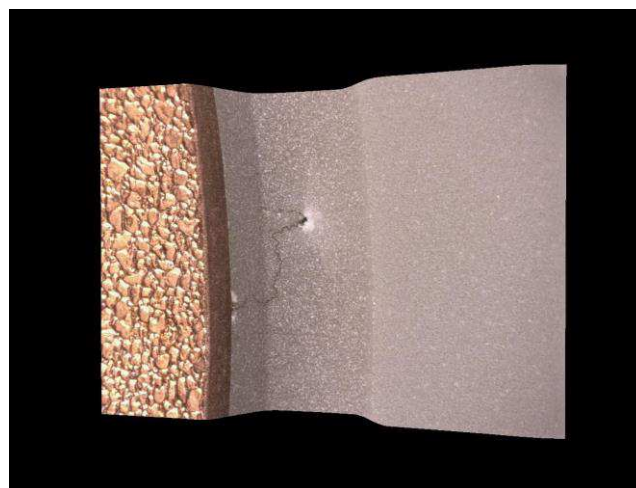


(a) sans mesa

(b) mesa 90 µm

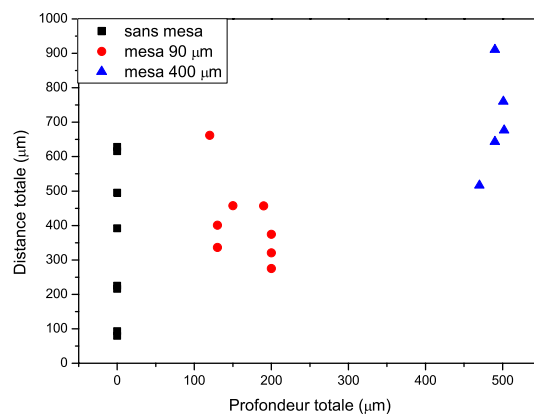
(c) mesa 400 µm

**Figure 91 : Image au microscope numérique de zones impactées par la rupture diélectrique pour un échantillon (a) sans mesa, (b) avec mesa de 90 µm et (c) avec mesa de 400 µm**



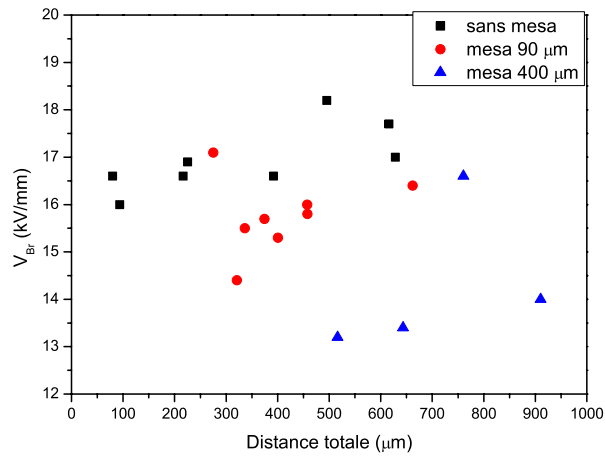
**Figure 92 : Image 3D par microscope numérique de l'échantillon en mesa 400 µm présenté également en Figure 91 (c) – microscope incliné de 30°**

Pour tous les échantillons, les zones de claquage ont toutes la même allure (Figure 91), les ruptures ont toutes eu lieu à la périphérie de la métallisation et toujours dans le fond de la gorge pour les échantillons qui ont été usinés. Dans tous les cas, on constate la présence d'un cheminement noir (sûrement dû à une carbonisation) entre le bord de la métallisation et un point d'impact dans la céramique comme le montre l'image 3D en Figure 92. Ce cheminement est plus ou moins tortueux en fonction des échantillons. On observe également sur tous les échantillons une zone « blanche » au niveau de l'impact qui semblerait correspondre à un craquèlement ou une fissuration du matériau céramique lors de la rupture (Figure 91). Les distances entre l'impact dans la céramique et le bord de la métallisation pour les différents échantillons sont présentées Figure 93.



**Figure 93 : Distance totale entre l'impact dans la céramique et le bord de la métallisation (profondeur totale plus distance radiale partant du bord de la métallisation jusqu'au point d'impact) en fonction de la profondeur totale de la mesa**

Cette distance correspond à la distance totale mesurée jusqu'à la zone de rupture correspondant à la profondeur totale de la mesa additionnée à la distance radiale partant du bord de la mesa jusqu'au point d'impact (distance intégrant la profondeur de mesa). En traçant (Figure 94), le niveau de tension atteint pour une rupture sur un échantillon par rapport à la distance totale entre l'impact dans la céramique et le bord de la métallisation, on observe une légère augmentation de la distance d'impact en fonction du niveau de la rupture pour les échantillons sans mesa mais pas de tendance significative pour les échantillons mesas.



**Figure 94 : Tension de rupture ( $V_{Br}$ ) des échantillons avec et sans mesa par rapport à la distance totale (profondeur totale plus distance radiale partant du bord de la métallisation jusqu'au point d'impact)**

La Figure 95 représente pour chaque échantillon, son niveau de champ de rupture  $E_{Br}$  ( $V_{Br}/d_{\text{épaisseur AlN restante}}$ ) en fonction de l'épaisseur de céramique restante au niveau du point d'impact (déduites des valeurs mesurées par profilomètre optique). Par exemple, pour une céramique d'épaisseur 1 mm avec une mesa de 400 μm si l'impact de la rupture est en fond de mesa, la tension de rupture sera divisée par 0,5 mm. On observe que les points de la figure suivent la tendance d'une courbe en  $ax^{-1/2}$  (à l'exception des deux points bleus extrêmes), correspondant à l'allure d'une courbe type de rupture de céramique en **volume**. Les champs de rupture atteints lors des essais dépendent de l'épaisseur restante de la céramique [63].

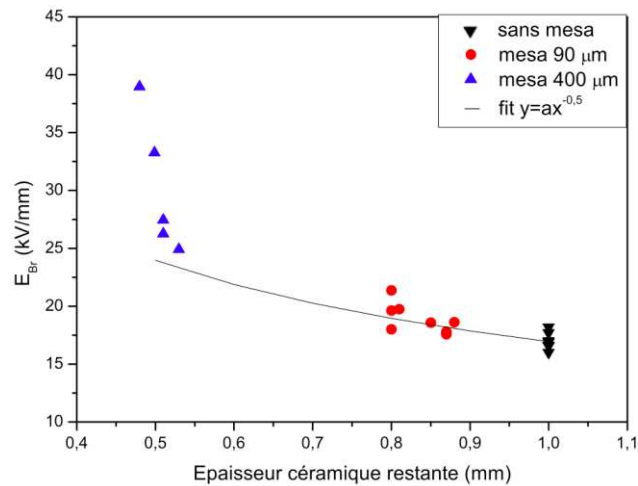
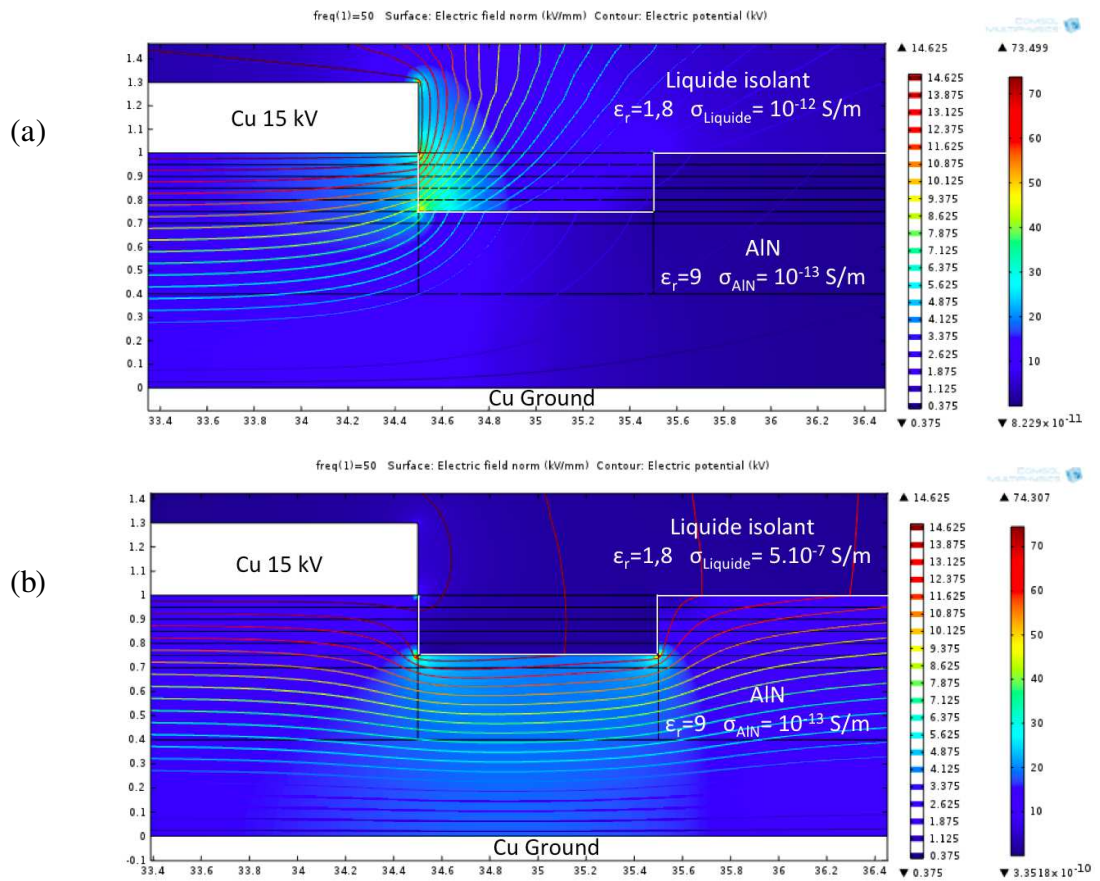


Figure 95 : Champ de rupture en fonction de l'épaisseur de céramique restante ; Fit des points en  $ax^{-1/2}$

Cette courbe de champ de rupture en fonction de l'épaisseur laisse penser qu'au moment de la rupture, le potentiel est reporté à l'interface entre l'encapsulant et la céramique que ce soit par le liquide isolant en volume ou par une conduction de surface à l'interface encapsulant / céramique. Des mesures de potentiels de surface effectuées dans le cadre de la thèse de Laurent Roske [64] ont permis de montrer que l'AlN est une céramique qui favorise l'écoulement des charges en surface, elle a donc une certaine conductivité de surface plus importante que l'alumine ou le  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . L'autre mécanisme est une action en volume du fluide rendu conducteur sous fort champ. Pour illustrer le propos, la Figure 96 montre par simulation les conséquences en terme de répartition des équipotentiels de la modification de la conductivité électrique du liquide isolant de  $10^{-12}$  S/m à  $5 \times 10^{-7}$  S/m (Figure 96 (a) et (b)) sur un échantillon en mesa de 400  $\mu\text{m}$ . L'augmentation de la conductivité du liquide, provoque un report de potentiel non plus au point triple mais dans le fond de la mesa. On observe au milieu de la mesa de la Figure 96 (b)), une ligne équipotentielle rouge proche de 14 kV tandis que pour le cas simulé avec une conductivité faible en Figure 96 (a) la ligne équipotentielle équivalente est inférieure à 5 kV. Une « mise en conduction » en volume de l'encapsulant lors de la montée en tension pendant le test de rupture peut être la conséquence d'un comportement non linéaire de la conductivité en fonction du champ et / ou une injection de charges dans l'encapsulant. Cet effet de volume est d'autant plus important dans la structure mesa pour laquelle nous avons montré qu'elle augmente les contraintes de l'encapsulant (page 55 Chapitre II).



**Figure 96 : Cartographie du champ électrique et des équipotielles dans une structure en géométrie mesa de 250  $\mu$ m (a) pour une conductivité électrique du liquide isolant de  $10^{-12}$  S/m et de (b)  $5 \times 10^{-7}$  S/m (application de 15 kV sur l'électrode supérieure gauche, les électrodes supérieure droite et inférieure sont à la masse)**

### *b. Conclusion*

Dans les conditions de réalisation des tests, les mesures de décharges partielles permettent de révéler que l'usinage des échantillons est bénéfique à la diminution des tensions de détection de décharges de 10 pC pour des profondeurs de gravure importantes (échantillons en mesa 400  $\mu$ m). Mais le manque de contrôle de la profondeur des gravures par la technique ultrasonique engendre une difficulté sur l'interprétation des avantages théoriques pour les petites épaisseurs. Enfin les tests de rupture diélectrique des échantillons n'ont pas été significatifs en matière de gain même si les niveaux de tension de rupture restent de manière générale élevés. L'observation du point d'impact à travers la céramique se trouve toujours à une certaine distance de la métallisation et dans la partie de la céramique amincie par l'usinage. Cela met en évidence que nous avons été potentiellement confrontés à des mécanismes de report de champ électrique de par l'utilisation d'un liquide isolant soumis à des champs électriques intenses.

## Synthèse du Chapitre IV

Ce dernier chapitre présente la partie expérimentale de nos travaux. La première démarche était de fabriquer des échantillons par la technologie PCB dans le but de valider la géométrie proposée en forme de mesa. Malgré un manque d'optimisation de certaines phases du procédé de réalisation des échantillons, les essais électriques ont révélé une augmentation significative des seuils des tensions de détection des décharges partielles à 10pC ( $TDP_{10\text{ pC}}$ ) sur les échantillons en forme de mesa, et la rupture diélectrique était du même ordre de grandeur pour les deux types de géométrie d'échantillons.

Les mêmes essais électriques sur les échantillons en céramique métallisés usinés par ultrasons ont été menés. La géométrie mesa permet d'augmenter les seuils des tensions de détection des décharges partielles à 10 pC ( $TDP_{10\text{ pC}}$ ). Ce gain obtenu est dépendant de la hauteur de la mesa. Les tests ont été effectués dans plusieurs liquides isolants qui ont confirmé cette tendance de gain relatif en fonction de la profondeur. En revanche, les niveaux de tension absolus varient en fonction du liquide utilisé. Cette influence de l'encapsulant s'est confirmée lors des essais de rupture. En effet, les tests de rupture diélectrique n'ont pas montré l'intérêt d'une géométrie mesa par rapport à une géométrie sans mesa, les échantillons ayant conduit à des tensions de rupture similaires. Nous avons constaté que les points d'impact de la rupture se trouvaient tous à la périphérie de l'électrode et dans le fond de la gorge pour les échantillons usinés, alors que les simulations avaient montré des champs électriques peu intenses dans ces zones en question. Un faisceau d'arguments nous oriente vers l'hypothèse d'un report de la tension de l'électrode sur la surface de la céramique par un comportement conducteur du liquide à partir d'un certain niveau de tension.

La structure mesa reporte des contraintes sur l'encapsulant, il est donc nécessaire de la mettre en œuvre avec un matériau encapsulant très bon isolant sous fort champ.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Depuis quelques années, le module de puissance est au cœur de nombreuses recherches ayant pour objectif l'intégration de nouveaux composants à semi-conducteur « grand gap » répondant aux besoins de nombreuses applications industrielles actuelles et futures. La performance des modules de puissance est un véritable enjeu économique, en particulier entraîné dans le sillage de l'industrie automobile qui représentera la plus grosse part de marché d'ici 2020, mais aussi dans des secteurs plus restreints mais stratégiques utilisant l'énergie électrique à forts niveaux de puissance (domaines de l'industrie, des transports, des réseaux électriques haute tension, ...). L'introduction de ces nouveaux composants dans les modules de puissance nécessite d'adapter leurs environnements (packaging) pour un fonctionnement optimal. D'un point de vue électrique, les systèmes d'isolation approchent leurs limites d'utilisation en tension, notamment dans les configurations de packaging des modules de puissance actuellement utilisés. L'objectif de cette thèse était de proposer une structure originale comme solution pour l'abaissement de la contrainte électrique, en vue de l'obtention d'un module de tenue en tension en capacité d'atteindre 15 kV. Nous avons proposé, à partir de simulations par la méthode des éléments finis, une nouvelle géométrie du substrat céramique métallisé en mesa capable de réduire l'intensité du champ électrique au point triple qui constitue l'une des principales faiblesses des systèmes d'isolation. La modification de la structure proposée est caractérisée par la création d'une gorge dans le substrat au bord de la métallisation. Nous avons montré les principales contraintes géométriques de la structure qui sont l'alignement parfaitement vertical de la métallisation avec la mesa ainsi qu'une optimisation de la profondeur et de la largeur de celle-ci. Cette nouvelle structure optimisée a montré en simulation une réduction remarquable de l'intensité du champ électrique au point triple, par rapport à la géométrie classique pour une même tension appliquée, du fait d'une meilleure répartition des équipotentielles et ce, quelle que soit la fréquence.

Pour connaître le véritable potentiel de la nouvelle structure, nous avons fabriqué de premiers échantillons sous technologie PCB qui ont donné des résultats intéressants en matière de décharges partielles. Parallèlement, nous avons évalué la faisabilité de différentes techniques pour la réalisation en forme de mesa de substrats céramique en AlN métallisés. Différentes techniques de mise en œuvre ont été explorées comme la fabrication additive, mais la métallisation post-réalisation constituait le principal verrou. L'ablation par le laser a également été envisagée et non retenue pour le risque éventuel d'obtenir un mauvais



alignement vertical de la métallisation et de la mesa. Parmi toutes les techniques, c'est finalement l'usinage par ultrasons qui a été retenu. La mise en œuvre de cet usinage sur plusieurs échantillons de deux profondeurs de gorges différentes s'est avérée particulièrement efficace pour l'obtention d'un alignement vertical de la métallisation et de la mesa. Néanmoins, la rugosité des surfaces usinées a été augmentée et la reproductibilité de la profondeur a été difficile à maîtriser pour la structure la moins profonde. Les résultats électriques sur les échantillons de deux profondeurs de gorges différentes ont permis de montrer des résultats suivant la même tendance que les premiers échantillons en PCB. La géométrie mesa la plus profonde permet d'augmenter significativement les seuils des tensions de détection des décharges partielles à 10 pC ( $TDP_{10\text{ pC}}$ ). Mais les résultats de rupture diélectrique ont été en dessous des attentes, par l'absence de gain sur le seuil des tensions de rupture quelle que soit la profondeur des mesas. Nous avons exposé différents arguments qui ont mis en avant un possible comportement « conducteur » du liquide isolant (utilisé lors des essais) sous fort champ électrique.

Les substrats céramiques métallisés en forme de mesa pourraient donc être une des solutions à utiliser dans des applications de plus grandes tensions de fonctionnement à condition de l'associer à un agent d'encapsulation de très bonne capacité isolante pour pallier les reports de contraintes engendrée par la structure. Pour connaître le réel potentiel de la structure par rapport à la tension de fonctionnement visée au départ (15 kV), les essais de décharges partielles et de ruptures diélectriques devront être réalisés dans un matériau encapsulant très bon isolant, pour supporter le report de contraintes sur l'encapsulant causé par la structure mesa et minimiser l'effet de conduction du milieu isolant sous fort champ. Les perspectives de ce travail concerneront aussi l'optimisation de la géométrie mesa en fonction des performances du module visé, selon la tenue en tension souhaitée, la rigidité du milieu encapsulant retenu, et la puissance des pertes à dissiper. L'optimisation devra passer la recherche du meilleur compromis entre l'augmentation de l'épaisseur de la céramique pour garantir la tenue en tension souhaitée (de la zone amincie), et l'intégration d'une mesa qui devra être suffisamment haute pour conserver son effet bénéfique sur la répartition du champ, sans pénaliser la dissipation thermique au sein du module en fonctionnement.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. Azemar, "Power Electronics Overview: What are the markets and trends ? Yole Developpement, 2015.," 2015.
- [2] ABB. (2017) <http://new.abb.com/semiconductors/fr>.
- [3] C. Raynaud, D. Tournier, H. Morel, D. Planson, "Comparison of high voltage and high temperature performances of wide bandgap semiconductors for vertical power devices. Diamond and Related Materials, 2010, Elsevier, 2010, 19 (1), pp.1-6," 2010.
- [4] Tetsuro Hayashida, Takuma Nanjo, Akihiko Furukawa, Mikio Yamamuka, "Vertical GaN merged PiN Schottky diode with a breakdown voltage of 2 kV. Published 24 May 2017 • © 2017 The Japan Society of Applied Physics Applied Physics Express, Volume 10, Number 6," 2017.
- [5] C. Buttay, D. Planson, B. Allard, D. Bergogne, P. Bevilacqua, C. Joubert, M. Lazar, C. Martin, H. Morel, D. Tournier, C. Raynaud, "State of the art of high temperature power electronics. Materials Science and Engineering : B, vol. 176, no. 4, pp. 283–288, 2011.," 2011.
- [6] Cree. (2017) Cree custom\_power\_services\_overview.pdf.
- [7] Tetsu Negishi, Ryo Tsuda, Kenji Ota, Shinichi Iura, Hiroshi Yamaguchi, "3.3 kV All-SiC Power Module for Traction System Use. PCIM Europe 2017; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of, 2017," 2017.
- [8] Yole Developpement, "Power Module Packaging - Material Market and Technology Trends 2017," 2017.
- [9] ABB, "Semi-conducteurs de puissance et transport électrique".
- [10] C. Menguy, "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides. Technique de l'ingénieur," 1997.
- [11] F. Kreuger, *Partial discharge detection in high-voltage equipment*, 1990.
- [12] Thi Anh Tho Vu, "Etude de l'origine des décharges partielles sur les substrats céramiques enrobés. 2011. Thèse de doctorat. Université de Grenoble," 2011.
- [13] T. Lebey, "Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques.

2005. J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 4, Hors-Série 4, 3," 2005.
- [14] A. Toureille, "Mesures électriques des matériaux diélectriques solides," 2009.
- [15] B. Mammano, L. Bahra, "Safety Considerations in Power Supply Design," 2005.
- [16] Dean. P. Hamilton, S. Riches, M. Meisser, L. Mills, P. Mawby, "High temperature thermal cycling performance of DBA, AMB and thick film power module substrates. CIPS 2016; 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, p. 1-5".
- [17] J.-H. Fabian, S. Hartmann, A. Hamidi, "Analysis of Insulation Failure Modes in High Power IGBT Modules. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005, vol. 2,p. 799-805," 2005.
- [18] N. Wang, I. Cotton, J. Robertson, S. Follmann, K. Evans, D. Newcombe, "Partial discharge control in a power electronic module using high permittivity non-linear dielectrics," 2010.
- [19] M. Berth, "Partial Discharge Behaviour of Power Electronic Packaging Insulation. 1998.," 1998.
- [20] J. Zhou, S. Ang, A. Mantooh, J. C. Balda, "A nano-composite polyamide imide passivation for 10 kV power electronics modules. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE," 2012.
- [21] G. Mitic, T. Licht, G. Lefranc, "IGBT Module Technology with High Partial Discharge Resistance. Siemens AG, Corporate Technology Department, CT MS 4, 81730 Munich, Germany 2 eupec GmbH, D-59581 Warstein, Germany," 2001.
- [22] L. Donzel, J. Schuderer, "Nonlinear resistive electric field control for power electronic modules. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, vol. 19, no 3, p. 955-959.," 2012.
- [23] M. Kozako, Z. Valdez-Nava, S. Diaham, S. Dinculescu, T. Lebey, "Fundamental investigation of dielectric phenomena in epoxy composites during curing process under a uniform electric field. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2012 Annual Report Conference on. IEEE, 2012. p. 574-550.," 2012.
- [24] G. Belijar, S. Diaham, Z. Valdez-Nava, T. Lebey, "Online optical and dielectric monitoring of anisotropic epoxy/BaTiO<sub>3</sub> composite formation tailored by

- dielectrophoresis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 49, no 4, p. 045501.," 2015.
- [25] L. Leveque, "Nouveaux matériaux composites à gradient de permittivité structurés par un champ électrique et leur application pour la gradation de potentiel. 2017. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.," 2017.
- [26] Minh Tuan Do, "Propriétés diélectriques des gels isolants : application aux composants d'électronique de puissance. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier Grenoble 1," 2008.
- [27] C. Duchesne, "Contribution à l'étude de la gradation de potentiel dans les modules de puissance haute tension. 2009. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.," 2009.
- [28] D. Frey, J. L. Schanen, J. L. Auge, O. Lesaint, "Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurements. Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the. IEEE, 2003. p. 1000-1005," 2003.
- [29] C. Wesley Tipton, Dimeji Ibitayo, Damian Urciuoli, Gregory K. Ovrebo, "Development of a 15 kV Bridge Rectifier Module Using 4H-SiC Junction-barrier Schottky Diodes. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, Vol. 18, no. 4, pp. 1137-1142," 2011.
- [30] Multiphysics Comsol. (2017) [www.comsol.fr](http://www.comsol.fr).
- [31] V. Manet, "La Méthode des Eléments Finis: Vulgarisation des aspects mathématiques, Illustration des capacités de la méthode. DEA. Eléments finis pour l'ingénieur, ViM2, Lyon, 2012, pp.306.," 2012.
- [32] R. Riva, "Solution d'Interconnexions pour la Haute Température. 2014. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon," 2014.
- [33] C. F. Bayer, E. Baer, U. Waltrich, D. Malipaard, A. Schletz, "Simulation of the Electric Field Strength in the Vicinity of Metallization Edges on Dielectric Substrates. 2015. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, p. 257-265," 2015.
- [34] G., Licht, T., Lefranc, G. Mitic, "IGBT Module Technology with High Partial Discharge Resistance. Siemens AG, Corporate Technology Department, CT MS

- 4, 81730 Munich, Germany 2 eupec GmbH, D-59581 Warstein, Germany," 2001.
- [35] Curamik. (2017) <https://www.rogerscorp.com/documents/3009/pes/curamik/curamik-Ceramic-Substrates-Product-Information.pdf>.
- [36] Isola group. (2017) <http://www.isola-group.com/products/all-printed-circuit-materials/370hr/>.
- [37] M. Bouarroudj-Berkani, L. Dipont, "Fatigue des composants électroniques de puissance – Physique de la défaillance. Technique de l'ingénieur," 2010.
- [38] H. A. Naseem, A. P. Malshe, R. A. Beera, M. S. Haque, W. D. Brown, L. W. Schaper, "CVD-diamond substrates for multi-chip modules (MCMs). Proceedings of the 8th International Conference on VLSI Design, p. 194-195, 1995," 1995.
- [39] Curamik. (2017) <https://www.rogerscorp.com/pes/curamik/products/3/curamik-Ceramic-Substrates.aspx>.
- [40] O. Mathieu, "Rogers Germany, Symposium Mittelspannungs-Leistungselektronik Medium Voltage in power electronic, Fraunhofer Institute Solar Energiesystem, 28. September 2017, Berlin, Germany," 2017.
- [41] Rogers Corporation Curamik. <http://www.rogerscorp.com/documents/3009/pes/curamik/curamik-Ceramic-Substrates-Product-Information.pdf>.
- [42] Xiulan He, Feng Ye, Haijiao Zhang, Zhiqiang Zhou, "Study on microstructure and thermal conductivity of Spark Plasma Sintering AlN ceramics. Materials and Design, vol. 31, n° 9, p. 4110-4115," 2010.
- [43] Bassem Mouawad, "Assemblages innovants en électronique de puissance utilisant la technique de « Spark Plasma Sintering ». 2013. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon," 2013.
- [44] C. Estournes, "Mise en forme de matériaux par frittage flash. Technique de l'ingénieur," 2006.
- [45] CTTC, Centre de Transfert de Technologies Céramiques, "ETCHEGOYEN, Gregory. Additive manufacturing of ceramics and multimaterial components. PowerPoint CTTC," 2017.

- [46] M. Hirsch , S. Catchpole-Smith, R. Patel, P. Marrow, W. Li, C. Tuck, SD. Sharples, AT. Clare, "Meso-scale defect evaluation of selective laser melting using spatially resolved acoustic spectroscopy. 2017, Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences," 2017.
- [47] <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>.
- [48] J.A. Gonzalez, J. Mireles, Y. Lin, R.B. Wicker, "Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. 2016, Ceramics International Vol. 42, n° 9, pp. 10559–10564," 2016.
- [49] <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>.
- [50] V. Muthu, P. Chatterjee, T. King Jet, "Review on application of additive manufacturing for electrical power converters. 2016, IEEE Region 10 Conference (Tencon), pp: 2327 - 2333," 2016.
- [51] P. Laurens, C. Dubouchet, D. Kechemair, "Application des lasers aux traitements de surface. Techniques de l'Ingénieur," 1996.
- [52] S. Valette, "Effets thermiques dus à l'interaction laser-matière dans les métaux en régime femtoseconde. 2003. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Université Jean Monnet de Saint-Etienne," 2003.
- [53] Alphanov, "Vogel, W. Le laser comme outil pour l'usinage des céramiques. PowerPoint Alphanov," 2017.
- [54] M. Decup, "Impact des procédés industriels de traitement sur les propriétés diélectriques des substrats d'Alumine utilisés dans les modules de commutation haute tension. 2010. Thèse de doctorat. Université Toulouse III-Paul Sabatier," 2010.
- [55] Femto-ST, "J. Boy. Usinage abrasif par ultrasons quel usage peut-on en faire ? PowerPoint Femto-ST".
- [56] D. Kremer, "Usinage par ultrasons. Techniques de l'Ingénieur ," 1998.
- [57] Isola group. isola group. [https://www.pragoboard.cz/download/is400\\_eng.pdf](https://www.pragoboard.cz/download/is400_eng.pdf).
- [58] Novec 649. <http://multimedia.3m.com/mws/media/5698650/3mtm-novectm-649-engineered-fluid.pdf>.
- [59] Galden HT55. [http://www.behlke.com/pdf/datasheets/galden\\_ht135.pdf](http://www.behlke.com/pdf/datasheets/galden_ht135.pdf).
- [60] FC 72. <https://multimedia.3m.com/mws/media/648920/fluorinert-electronic->

liquid-fc-72.pdf.

- [61] J.S. White, "The Moments of Log-Weibull Order Statistics," *Technometrics*, 11(2), pp. 373-386," 1969.
- [62] R. Danzer, P. Supancic, J. Pascual, T. Lube, "Fracture statistics of ceramics – Weibull statistics and deviations from Weibull statistics. *Engineering Fracture Mechanics* Volume 74, Issue 18, December 2007, Pages 2919-2932 ," 2007.
- [63] V. Bley, F. Talbi, F. Lalam, D. Malec, "Contribution to the understanding of the relationship between mechanical and dielectric strengths of Alumina. *Journal of the European Ceramic Society*. Volume 30, Issue 15, November 2010, Pages 3117-3123," 2010.
- [64] L. Roske, "Packaging de composants grand gap haute température et haute tension. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier," 2015.
- [65] Y. Segui, "Diélectriques – Courant de conduction. *Technique de l'Ingénieur*, D2301, 2000," 2000.
- [66] Mohamad Ghaffarian Niasar, "Partial Discharge Signatures of Defects in Insulation Systems Consisting of Oil and Oil-impregnated Paper," 2012.
- [67] D. König, Y. Narayana Kao, "Partial discharges in electrical power apparatus. *Vde Verlag*, 1993.," 1993.
- [68] F.H Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-voltage Equipment. *Butterworths & Co. (Publishers) Ltd*, pp. 6 - 7, 1989.," 1989.
- [69] R. Bartnikas, "Engineering Dielectric, Corona Measurement and Interpretation. Vol.1, *ASTM*, 1979.," 1979.
- [70] D.A. Nattrass, "Partial Discharge Measurement and Interpretation. *IEEE, Electr.Insul. Mag.* Vol. 4, n° 3, pp. 10 - 23, 1988.," 1988.
- [71] A.E.W. Austen, S. Whitehead, "Discharge in Insulation under Alternating Current Stresses. *Journal IEE*, Vol. 88, Part. II, pp. 18 - 22, 1941.," 1941.
- [72] T. Lebay, D. Malec, S. Dinculescu, V. Costan, F. Breit, E. Dutarde, "Partial Discharges Phenomenon in High Voltage Power Modules. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* , Vol.13, pp. 810 - 819, 2006.," 2006.
- [73] F. Breit, "Contribution à l'intégration hybride de puissance : étude de

- l'environnement diélectrique des semiconducteurs," 2003.
- [74] L. Caliap, "Étude de l'optimisation diélectrique des isolants pour les contraintes des Postes haute tension sous enveloppe métallique (PSEM). Jcge ,2008.," 2008.
- [75] L.E. Lungaard, "Partial discharge-Part XIII, Acoustic partial discharge détection fundamental considerations. IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 8, N°. 4, pp. 25 - 31,1992.," 1992.
- [76] A. G. Sellars, O. Farish, B. F. Hampton, L. S. Pritchard, "Using the UHF technique to investigate PD produced by defects in solid insulation. IEEE Trans. Dielectr. Ekectr. Insul., Vol. 2, N°. 3, pp. 448 - 459, 1995.," 1995.
- [77] N. Dubus, "« Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique »," 2009.
- [78] N. Naudé, "« Etude de la physique d'une décharge de townsend à la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur : modèle et expérience »," 2005.
- [79] Comsol Multiphysics. (2017) [www.comsol.fr](http://www.comsol.fr).





## ANNEXE 1

Dans cette partie, nous revenons sur la notion de décharges, notamment sur le phénomène de décharges partielles et des méthodes utilisées pour leur détection car elles s'accompagnent souvent d'une émission de son, de lumière, d'énergie et de réactions chimiques.

### *Le phénomène des décharges partielles*

Une décharge partielle (DP) est une décharge électrique locale apparaissant en général sous l'application d'une tension élevée. Elle ne court-circuite que partiellement le milieu dans lequel elle se déclenche.

Les conséquences des décharges partielles sont variables selon leur intensité et le milieu dans lequel elles apparaissent. Elles peuvent déclencher la dégradation des matériaux (en particulier les solides) sous l'action d'une contrainte thermique locale (carbonisation), ou chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (ozone ou acide nitrique), ou d'une érosion mécanique suite au bombardement par des espèces chargées.

Un milieu fluide (gaz ou liquide) est moins affecté par une dégradation car ce court-circuit est libre de circuler. En milieu fluide, les contraintes thermiques et produits de dégradation sont rapidement dispersés dans le volume, alors que dans le cas d'un solide, la dégradation est localisée et irréversible [13].

#### **a. Classification des décharges partielles**

Les décharges sont classées d'après Kreuger [11] en fonction de leur localisation, définissant ainsi quatre catégories:

- Les décharges 'internes' (voir Figure 97 (a)), qui apparaissent dans l'isolant aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple une vacuole dans un solide ou une bulle dans un liquide ;
- Les décharges 'de surface' (Figure 97 (b)), qui sont des décharges prenant naissance à la jonction de trois matériaux (point triple) lorsqu'il y a un défaut (goutte d'eau, pollution, poussière, etc.) et se développent en surface de l'isolant. Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique ;

- Les décharges ‘couronne’ (Figure 97 (c)) qui prennent naissance dans le matériau aux endroits où le champ électrique est très renforcé (par exemple par un effet de pointe). La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe ;
- Les arborescences dans les solides (Figure 97 (d)) : un ‘arbre électrique’ prend naissance sur un défaut de l’isolation. Il y a ensuite croissance d’une structure ramifiée comprenant différentes branches qui sont le siège de décharges. Les arborescences constituent le phénomène de claquage à long terme.

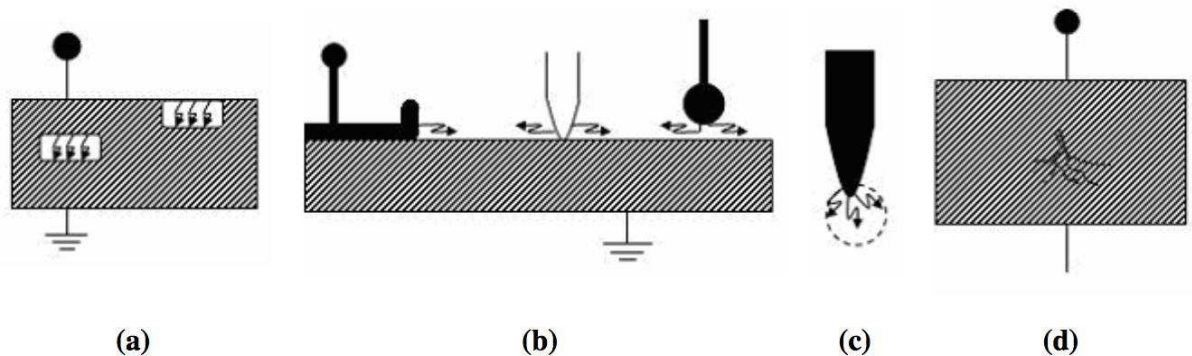


Figure 97 : Différents types de décharges d’après Kreuger

Nous nous intéressons plus précisément à deux types de décharges partielles auxquelles nous sommes confrontés dans nos essais expérimentaux : les décharges se trouvant dans une vacuole et les décharges de type couronne.

### b. Décharges dans une cavité

On considère une vacuole gazeuse dans un isolant solide placé entre deux électrodes. Si une tension alternative est appliquée aux électrodes, un champ électrique est généré dans la vacuole. Lorsque le gaz est soumis à un champ électrique, les électrons libres présents dans le volume de la cavité s’orientent et acquièrent une énergie cinétique supplémentaire. Ils peuvent alors ioniser les molécules avec lesquelles ils entrent en collision. Des électrons secondaires sont libérés et l’ensemble des électrons participent alors par des collisions successives à la génération d’une avalanche électronique. Celle-ci a pour conséquence le développement d’un *streamer*, un canal conducteur à travers la vacuole d’une durée de quelques nano-secondes.

La valeur de la tension pour laquelle une décharge s’amorce correspond par définition à la tension de rupture du gaz. Selon la loi de Paschen, deux facteurs sont prépondérants :

- la densité des particules dans le volume gazeux, elle s'exprime globalement par la pression  $p$  ;
- la longueur du canal de conduction que doit parcourir l'avalanche, elle correspond à la distance inter-électrodes  $d$ .

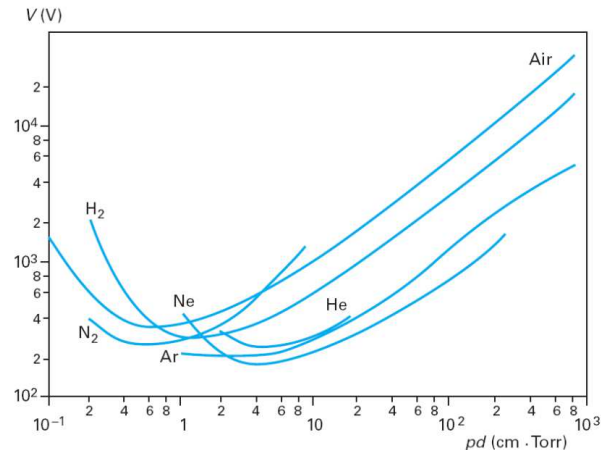


Figure 98 : Courbe de Paschen pour quelques gaz simples [65]

Le produit  $pd$  (sur l'axe des x en Figure 98) détermine le facteur d'accélération des électrons via l'énergie cinétique conférée par la tension appliquée. La tension disruptive est atteinte quand cette énergie cinétique est suffisante pour entretenir l'ionisation des molécules contenues dans le gaz.

Donc, l'application d'un champ supérieur ionise le gaz et provoque l'apparition d'une décharge dans la cavité. Cette décharge ne court-circuite pas les deux conducteurs toujours isolés par le reste du matériau isolant (d'où le nom de décharge partielle).

La conductivité du *streamer* réduit le champ électrique de la cavité. Une fois que ce champ chute au-dessous de celui nécessaire pour maintenir le *streamer*, le *streamer* s'éteint. Cependant il laisse de grandes quantités de charges positives et négatives (charges d'espace). Ces charges érodent progressivement les parois de la vacuole. Le bombardement ionique et l'agression chimique qu'elles exercent parviennent à rompre les chaînes de l'isolant solide. Ce phénomène est amplifié par l'augmentation locale de la température générée par les décharges.

Pendant les décharges, la conductivité du streamer conduit à une augmentation de la capacité entre les électrodes, ce qui a comme conséquences :

- soit une diminution de la tension aux bornes des électrodes pour une charge constante,
- soit une quantité de charges transportée aux électrodes pour une tension constante.

La quantité de charges due aux changements de la configuration du champ électrique détermine l'intensité de la décharge. Celle-ci est liée à la géométrie de l'échantillon et la taille, la forme et la position de la vacuole dans le diélectrique.

Après qu'une charge d'espace s'est formée, et donc après que la valeur moyenne du champ électrique dans la vacuole est réduite, une nouvelle activité de décharges partielles peut apparaître si le champ dans la vacuole dépasse le champ de claquage. En principe, il y a deux situations qui peuvent conduire à de nouvelles décharges partielles :

- pour une tension appliquée continue constante, le champ électrique dans la vacuole atteint à nouveau la valeur critique, du fait de la recombinaison et la diffusion des porteurs de charge. Ce phénomène suppose un temps comparativement long.
- la tension appliquée aux électrodes est augmentée de sorte que le champ dû à la charge d'espace dans la vacuole est compensé. C'est les cas des tensions alternatives et des tensions transitoires comme des tensions de commutation.

Le comportement d'une décharge électrique dans une cavité sous tension alternative peut être décrite par un schéma équivalent de capacités (Figure 99). La cavité est modélisée par la capacité  $C_c$  et par un éclateur en parallèle. Lorsque la tension de claquage de la cavité est atteinte, l'éclateur se met en court-circuit. La capacité du diélectrique en série avec la cavité est représentée par  $C_b$ . La partie saine du diélectrique est représentée par la capacité  $C_a$ .

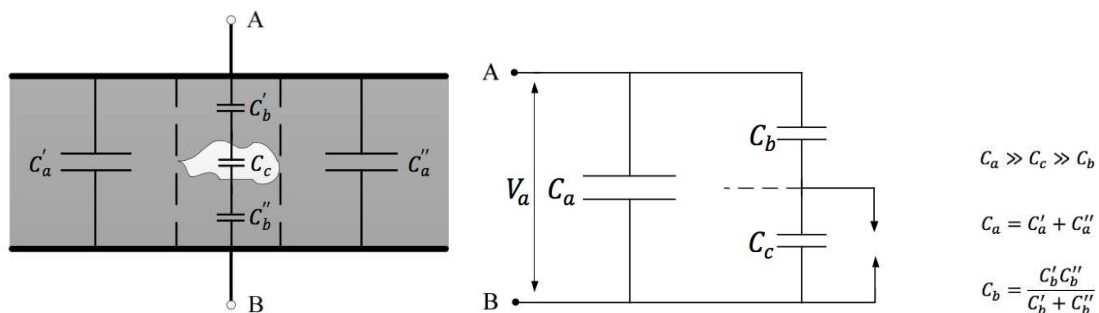


Figure 99 : Circuit équivalent d'un défaut dans un diélectrique

Une tension alternative  $V_a$  est appliquée sur le diélectrique et une tension  $V_{c0}$  apparaît à travers la cavité (Figure 100). Lorsque la tension de la cavité  $V_c$  dépasse une certaine valeur critique  $U^+$  correspondant à la tension d'apparition, une décharge partielle se produit. Alors  $V_c$  chute à une valeur d'extinction  $V^+$  et la décharge disparaît. Cette chute de tension se produit sur une durée de quelques nano-secondes par rapport à la période de la tension sinusoïdale appliquée (50 Hz). Puis la tension aux bornes de la cavité augmente à nouveau,

lorsque sa tension arrive à la valeur  $U^+$ , une nouvelle décharge se produit, ceci se répète jusqu'à ce que la haute tension  $V_a$  n'augmente plus (phase à  $90^\circ$ ). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative (arrêt des décharges à  $270^\circ$ ) avec des seuils d'apparition et d'extinction de décharges à  $U^-$  et  $V^-$ . Les décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides dans l'échantillon et le circuit extérieur.

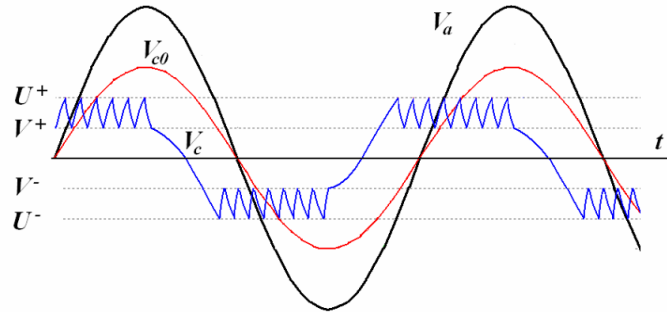


Figure 100 : Signature électrique du défaut en présence de décharges partielles [66]

### c. Décharges couronnes

Les décharges couronnes apparaissent dans les configurations géométriques qui induisent un renforcement local du champ électrique, comme par exemple une configuration pointe-plan. Par une démarche similaire à celle décrite précédemment pour les décharges partielles en volume, le développement des décharges couronnes peut être approximativement décrit en utilisant le circuit équivalent de la Figure 101 (a). Lorsque la tension appliquée  $V_a$  dépasse une certaine valeur critique  $U^+$  correspondant au seuil d'apparition des décharges, l'ionisation se produit et le phénomène de décharge couronne se manifeste. Ceci se répète jusqu'à ce que la tension appliquée  $V_a$  devienne inférieure au seuil de décharge  $U^+$  (Figure 101 (b)). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative. Les distributions de décharges sont centrées sur les phases  $90^\circ$  et  $270^\circ$  pendant les alternances.

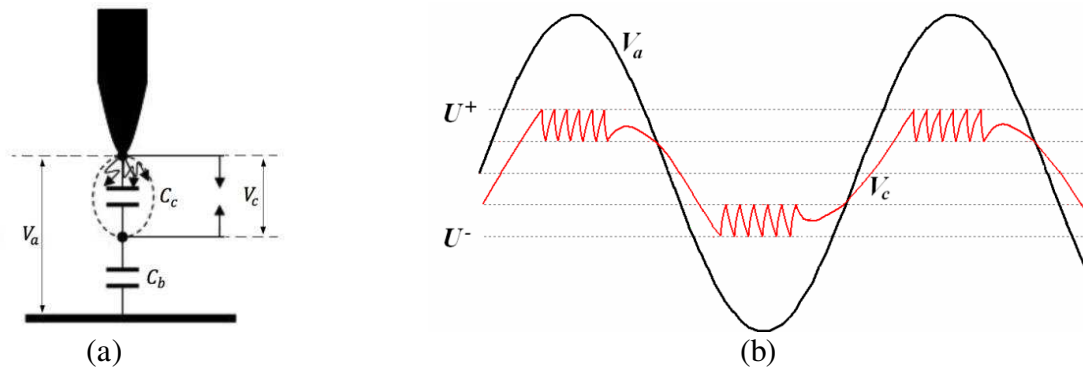


Figure 101 : (a) Circuit équivalent et (b) signature électrique de décharges couronnes [67]

### *Méthodes de détection des décharges partielles*

Les décharges partielles induisent plusieurs phénomènes comme des rayonnements lumineux (UV et visibles) et électromagnétiques, la génération de sons, des pertes diélectriques, des réactions chimiques, une augmentation de la pression du gaz et des impulsions de courant électrique. Il est donc possible de les détecter par plusieurs méthodes.

#### **a. Détection des décharges partielles par la méthode électrique**

La détection des décharges partielles par mesure électrique repose sur la mesure de la charge apparente. La charge apparente d'une décharge partielle est la charge qui, si elle était injectée instantanément entre les bornes de l'objet en essais, changerait momentanément la tension entre ses bornes de la même quantité que la décharge elle-même. Il apparaît alors clairement que la charge apparente est une fraction de charge réelle libérée par la décharge.

Lorsqu'une décharge partielle se déclenche dans un endroit indéterminé de l'isolant solide, elle met en circulation une faible quantité de charge. Les impulsions de courant associée à cette quantité de charge dépendent de l'amplitude de la tension appliquée et de la caractéristique de l'objet à tester.

De nombreux travaux ont été publiés sur les techniques de détection et de mesure des décharges. On citera celles de Kreuger [68], Bartnikas [69] et Natras [70]. Des avancées notables ont été enregistrées et ne cessent d'améliorer l'analyse des décharges partielles par un traitement numérique des données de décharges. Les montages actuellement utilisés sont dérivés du dispositif mis au point par Austen et Whitehead en 1941 [71].

Il existe deux montages principaux pour la mesure des décharges partielles, soit direct, (échantillon non relié à la terre), soit indirect (échantillon relié à la terre). Dans le circuit

direct (Figure 102 (a)), l'impédance de mesure  $Z_{det}$  est en série avec l'échantillon sous test. Tandis qu'en circuit indirect (Figure 102 (b)), l'impédance de mesure  $Z_{det}$  est en parallèle cet échantillon.

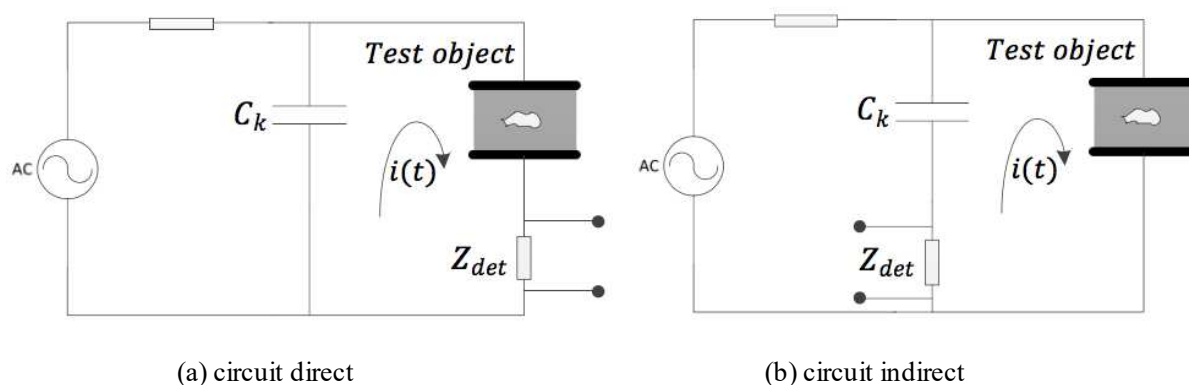


Figure 102 : Schéma des deux types de circuit de mesure direct (a) et indirect des décharges (b)

La détection directe étant la plus couramment utilisée, nous allons en décrire le fonctionnement un peu plus précisément (le principe reste dans les deux cas le même).

La cellule de mesure nommée *Test object* est connectée en série avec une impédance de mesure  $Z_{det}$ . Un condensateur de couplage  $C_k$  haute tension, exempt de décharges fournit la tension de manière transitoire à la cellule sous test. Lorsqu'une décharge se produit, une impulsion de courant de quelques nano-secondes circule dans le circuit extérieur, correspondant à la quantité de charge appelée charge apparente. Cette impulsion peut être mesurée à l'aide de l'impédance de mesure  $Z_{det}$ , souvent composée par un circuit *RLC* parallèle. L'inductance  $L$  atténue fortement les composantes basses fréquences du signal mesuré, la capacité  $C$  intègre les impulsions rapides de décharges partielles, et la résistance  $R$  amortit les oscillations du circuit. Après calibration, ce circuit permet de mesurer un signal proportionnel à la charge apparente des décharges partielles.

L'ensemble de l'installation comporte l'inconvénient majeur d'être sensible aux perturbations électriques hautes fréquences provenant aussi bien du réseau d'alimentation que de l'environnement de l'appareillage (câbles, connexions, etc.). D'autres part, ce système ne fonctionne qu'avec une tension d'alimentation sinusoïdale basse fréquence. Dans le cas d'une tension d'alimentation impulsionnelle, la présence d'harmoniques enlevées sur la tension rend la détection des décharges problématique, le filtre *RLC* classique étant inadapté pour dissocier les harmoniques de la source de tension de celles des signaux des décharges partielles situées dans la même gamme de fréquences.



### **b. La calibration de la mesure de charge des décharges partielles**

Une calibration du montage est nécessaire avant toute mesure de décharges partielles. Celle-ci est réalisée en injectant aux bornes de la cellule de mesure *Test object*, des impulsions de courant brèves et de charge connue (une référence en pico-Coulombs en fonction de la plage des valeurs attendues). Le niveau de calibration permet d'apprécier la sensibilité de la mesure. Il dépend de la configuration de l'échantillon sous test. Le calibrage de l'appareil de mesure étant fonction des paramètres diélectriques de l'objet, il faut nécessairement opérer cette calibration à chaque changement d'objet.

### *Le dispositif expérimental de détection des décharges partielles par la méthode électrique*

Dans ce paragraphe, nous présentons le dispositif expérimental utilisé pour l'étude des décharges partielles sur les échantillons en Chapitre 4. Il permet la détection par mesure électrique. Nous relevons principalement les tensions d'apparition et d'extinction des décharges, respectivement **TADP** et **TEDP** et leur distribution dans la phase d'après leur signature (par acquisition des diagrammes de décharges). La configuration électrique du circuit de mesure du banc de test est faite en indirect, l'échantillon relié à la terre.

L'ensemble du système de mesure des décharges partielles est composé de plusieurs parties :

- Source de tension variable :

Un générateur de tension (alternative sinusoïdale), commandé manuellement permet d'appliquer une tension d'amplitude variable pour atteindre la tension de seuil d'apparition des décharges partielles. Il s'agit soit de l'association auto transformateur/transformatrice, soit d'un générateur basse fréquence (GBF) alimentant un amplificateur de puissance. La valeur seuil observée dépend de nombreux paramètres : sensibilité de la mesure (perturbation par des signaux parasites), ainsi que de l'attention de l'opérateur.

- Le système de détection et de mesure électrique de décharges partielles :

Le système utilisé est « ICM system » de la société **Power Diagnostix Systems GmbH**. Grâce à ce système de mesure on extrait

l'intensité des décharges, leur nombre ainsi que la valeur du courant de décharge absolu.

- La cellule test pour la mesure électrique de décharges partielles :

La cellule de mesure est composée d'un support en téflon contenant deux électrodes en acier mises en pression l'une avec l'autre par un système de ressort. L'échantillon à tester est placé entre ces deux électrodes et maintenu par la force exercée par le ressort. La configuration des électrodes est donc plan/plan.

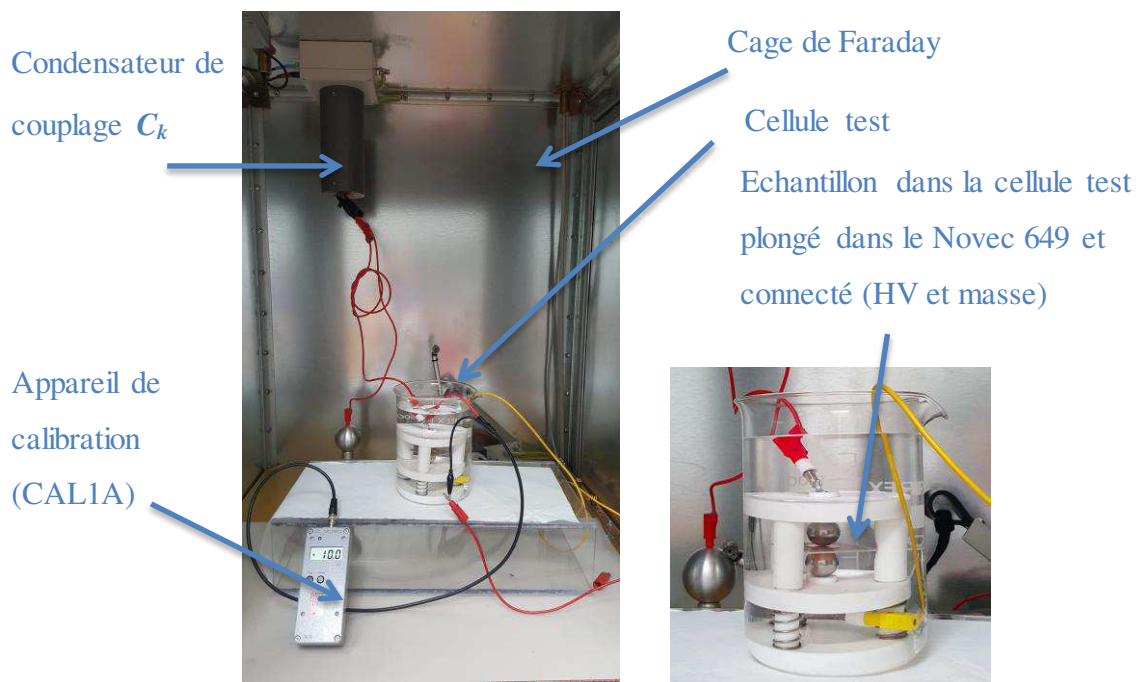


Figure 103 : Photo du banc test du Lab. LAPLACE et d'un échantillon mis en place dans la cellule de mesure

Le protocole de mesure qui a été suivi pour tous les échantillons testés en chapitre 4 a consisté en l'application par palier, d'une tension sinusoïdale de 50 Hz sur l'échantillon.

Partant d'une tension nulle, celle-ci est augmentée jusqu'à la détection de premières décharges partielles d'intensité 1 pC (**TADP** à 1pC), puis elle est encore augmentée jusqu'à la détection d'un second seuil d'intensité de 10 pC (**TADP** à 10 pC). Cette tension au seuil de 10 pC est alors maintenue pour une durée de 60 secondes permettant un temps suffisant pour l'établissement des décharges. Ensuite, la tension est diminuée jusqu'à ce que l'intensité des décharges soit inférieure à 1 pC, correspondant au seuil d'extinction des décharges partielles (**TEDP**). La tension est remise à zéro pour procéder à une nouvelle montée par palier pour

une seconde détection des seuils à 1 pC puis 10 pC. La tension relevée pendant le second passage à 10 pC est la tension de seuil qui servira pour l'exploitation des données.

#### a. Acquisition de signature de décharges partielles en alternatif

Un exemple de signature de décharges partielles obtenue sur un échantillon est présenté en Figure 104, sur une base de temps alternatif qui permet d'identifier et/ou de localiser la décharge :

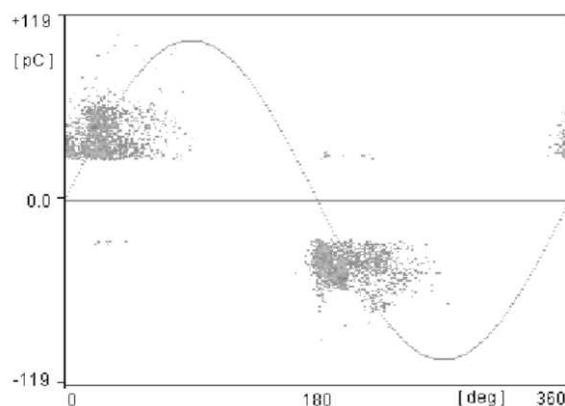


Figure 104 : Exemple d'acquisition de signature de DP en alternatif [72]

D'après la signature de la décharge, on peut en déduire que les décharges sont internes, se produisant dans un défaut. En effet, les formes de ces décharges sont symétriques entre l'alternance positive et négative, il y a donc la même intensité des impulsions sur les deux alternances et la même distribution des impulsions en fonction de l'angle de phase.

Lorsque la signature est purement symétrique, la décharge se produit dans une cavité dont les parois sont de même nature (diélectrique homogène, gel, céramique). En revanche, lorsqu'une différence existe entre le nombre de décharges au cours des deux demi-périodes, la décharge se produit plutôt dans une cavité dont les parois sont de nature différentes (interface encapsulant/céramique). Le cas extrême est lorsque la décharge dissymétrique se produit dans une cavité dont les limites sont un diélectrique et un métal. Dans ces deux derniers cas, le comportement dissymétrique est associé à la différence de coefficient d'émission secondaire entre le métal et le diélectrique n'injectant ainsi pas la même quantité d'électrons et d'ions dans le gap de la décharge [73].

## *Détection des décharges partielles par les méthodes non électriques*

Parallèlement à la méthode de mesure électrique, d'autres méthodes basées sur des phénomènes physico-chimiques qui se produisent lors de l'apparition d'une décharge peuvent être utilisées :

- La lumière émise lors d'une décharge se situe généralement dans le domaine visible-UV. La technique optique a plusieurs avantages car elle est beaucoup plus sensible que les techniques de détection conventionnelles et elle permet aussi la détection des décharges partielles sous des régimes de tension transitoires pour lesquels les mesures des décharges partielles sont extrêmement difficiles. La lumière émise par les décharges partielles produit une image qui est enregistrée par une camera sensible. Cette méthode permet de localiser les décharges avec précision, mais la corrélation entre l'amplitude de la décharge et l'intensité lumineuse est difficile à établir d'où la nécessité d'utiliser un photomultiplicateur [74].
- La décharge partielle produit souvent des ondes acoustiques (sonores et ultrasonores) perceptibles au voisinage de l'endroit où il y a la décharge. Une détection acoustique permet dans certains cas de localiser la décharge et de mesurer également son énergie qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux captés [75].
- La détection radiofréquence [76] est basée sur la capture des ondes électromagnétiques générées par les décharges partielles à l'aide d'une antenne. Cette méthode ne permet pas de localiser ou d'avoir des informations quantitatives sur la décharge partielle.



## ANNEXE 2

### *Bibliographie : Phénoménologie*

Cette annexe décrit dans ses principes fondamentaux une décharge électrique : les conditions d'obtention et d'entretien, les différents régimes de décharge ainsi que leurs transitions [77] [78].

#### a. Les décharges électriques

Une décharge à barrière diélectrique est un plasma froid hors équilibre généré à la pression atmosphérique entre deux électrodes recouvertes de diélectrique. Ce plasma faiblement ionisé ( $n_e = 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^3$ ) est caractérisé par une température électronique de quelques électron-Volts (eV) bien supérieure à celle des espèces neutres ( $\sim 300 \text{ K}$ ) qui sont majoritaires.

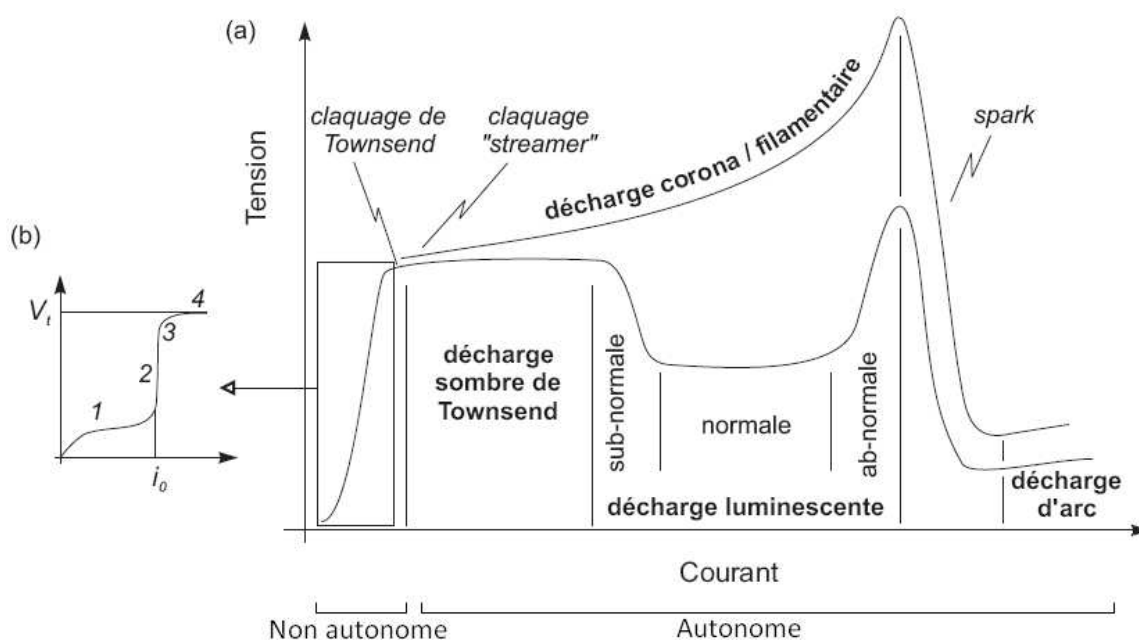


Figure 105 : (a) Caractéristiques courant-tension de différents types de décharges dans les gaz, (b) zoom sur la caractéristique de la décharge non-entretenu

En fonction de la pression, de la distance inter-électrodes et du matériau des électrodes, différents types de décharges peuvent être distingués. Celles-ci sont classifiées par rapport à leurs caractéristiques courant-tension, comme présenté à la figure ci-dessus. La courbe supérieure correspond aux décharges observées à haute pression (autour de la pression atmosphérique) et la courbe inférieure aux décharges à basse pression. A haute pression, la décharge est donc de type filamentaire. Cependant, sous certaines conditions, énoncées dans

la section suivante, il est possible d'obtenir une décharge luminescente à la pression atmosphérique.

On distingue quatre catégories de décharges stables ou quasi-stables :

- la *décharge sombre de Townsend*, caractérisée par un courant très faible ( $\sim 10^{-8}$  A).
- la *décharge luminescente*, largement utilisée dans les procédés industriels, principalement à basse pression ( $< \text{mbar}$ ) à faible courant ( $\sim 10^{-2}$  A) et moyenne tension ( $\sim 1$  kV). C'est un plasma faiblement ionisé et hors équilibre. Comme pour la décharge de Townsend, les électrons sont émis par impacts ioniques à la cathode.
- la *décharge corona* ou *filamentaire* que l'on rencontre généralement à la pression atmosphérique. Courant faible ( $\sim 10^{-6}$  A), elle se développe localement sous un champ électrique non-uniforme.
- la *décharge d'arc*, caractérisée par un fort courant ( $> 100$  A), une faible tension ( $< 100$  V) et une émission lumineuse très intense. A la différence de la décharge luminescente, les électrons sont émis par un procédé thermoïonique dû au chauffage de la cathode. Le plasma d'arc haute pression peut être considéré comme étant à l'équilibre thermodynamique.

A l'enclenchement de ces décharges on distingue deux, voir trois types de claquage : le claquage de type Townsend, le claquage de type Streamer et le claquage de type Spark (étincelle).

Pour une décharge à barrière diélectrique, on rencontre les deux premiers types de claquage qui sont présentés ci-après. Ces deux claquages résultent en deux décharges différentes, la décharge de Townsend et la décharge filamentaire.

Quel que soit le type de claquage, l'origine du procédé de claquage est une avalanche électronique. Elle se développe dans le gaz lorsqu'un champ électrique suffisamment intense est appliqué. La distinction entre le claquage de Townsend et le claquage Streamer vient des différents processus secondaires, issus de l'avalanche primaire, qui vont gouverner la décharge.

On définit le claquage comme le seuil de tension au-delà duquel la décharge est auto-entretenu par les processus secondaires.

### **b. Claquage de type Townsend et décharge de Townsend**

Le processus de claquage à basse pression ou pour de faibles valeurs du produit  $pd$  (pression-distance) (quelques Torr.cm) est de type Townsend. La courbe de la Figure 105 (b) présente une vue détaillée, avant le claquage, de la caractéristique courant-tension.

Si l'on considère deux électrodes planes séparées par une distance  $d$  et que l'on applique une tension  $V$  à leurs bornes, il va se former un champ électrique, considéré comme homogène, de la forme,  $E = V/d$ . Des électrons germes provenant de sources externes (rayons cosmiques, radioactivité naturelle ou source ionique artificielle) vont être accélérés et rejoindre l'anode si le champ est suffisamment intense et s'ils ne se sont pas attachés à une molécule électronégative. En conséquence, le courant  $i$  généré dans le circuit, en fonction du nombre d'espèces chargées ayant rejoint les électrodes, va croître, dans un premier temps, avec la tension appliquée  $V$  (étape 1 sur la Figure 105 (b)). A partir d'une certaine tension, presque toutes les espèces chargées (ions et électrons) rejoignent les électrodes. Le courant sature ( $i_0$ , Figure 105 (b)) et cesse de dépendre de la tension (étape 2, Figure 105 (b)). Cette saturation est déterminée par le taux de charges créées par les sources externes. Si la tension augmente encore, le gaz s'ionise par impact électronique, amplifiant le courant dû aux sources externes. C'est l'avalanche électronique résultant de ces processus primaires.

Le courant est multiplié par un facteur  $e^{\alpha d}$ , qui correspond au nombre de paires d'ions produites par une avalanche électronique traversant l'espace inter-électrodes.  $d$  est la distance séparant les électrodes.  $\alpha$  est le premier coefficient de Townsend, le coefficient d'ionisation, il définit le nombre d'électrons produits sur le chemin d'un électron parcourant  $1\text{ cm}$  dans le sens du champ électrique.

La courbe verticale de saturation du courant s'adoucit (étape 3, Figure 105 (b)), mais le courant n'est toujours pas auto-entretenu. Pour cela il faut augmenter encore la tension pour que les processus d'émission secondaire (photo-ionisation, bombardement ionique et métastables) entrent en jeu : création d'électrons par les particules issues des processus primaires d'ionisation ou d'excitation par impact électronique. Les processus d'émission secondaire sont d'autant plus efficaces, pour la multiplication des avalanches, s'ils se produisent à la cathode : les électrons sont ainsi accélérés sur tout l'espace inter-électrodes jusqu'à l'anode, fournissant une ionisation plus importante qu'un électron provenant du milieu de l'espace inter-électrodes. En tenant compte de ce processus, l'amplification du courant peut s'écrire :



$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Où  $\gamma$  est le second coefficient de Townsend, qui dépend du matériau de la cathode, du gaz et qui tient compte de la contribution des ions positifs, des photons et des espèces métastables.

Le claquage a lieu quand la tension aux bornes des électrodes atteint un seuil  $V_t$  (seuil de claquage, étape 4, Figure 105 (b)), tel que l'amplification du courant entre les électrodes tende vers l'infini :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

Cette équation représente l'établissement d'un courant stable auto-entretenu sous un champ électrique homogène  $E_t = V_t/d$ . Le processus d'auto-entretien dans l'espace inter-électrodes peut être décrit de la manière suivante : un électron émis par la cathode produit  $e^{\alpha d} - 1$  ions qui, en interagissant avec la cathode, extraient  $\gamma$  électrons chacun (dans le cas d'une émission ion-électron). Un électron primaire est remplacé par un électron secondaire ( $\mu = \gamma(e^{\alpha d} - 1)$ ).

Cependant, le claquage ne peut être entretenu si la tension appliquée est exactement  $V_t$ , car cette tension permet uniquement d'entretenir la première reproduction d'électrons :  $\mu = 1$ . Afin d'augmenter la quantité d'électrons germes à la cathode, il faut augmenter légèrement la tension appliquée ( $V > V_t$ ) et ainsi accéder au régime d'auto-entretien.

On introduit donc une légère surtension,  $\Delta V = V - V_t > 0$  pour assurer un renouvellement étendu d'électrons :  $\mu > 1$ .

Cette condition de claquage a été définie de manière empirique par la loi de Paschen (Figure 106). Selon cette loi, la tension de claquage, pour un gaz et un matériau d'électrode donnés, dépend uniquement du produit entre la pression et la distance inter-électrodes,  $V_t = f(pd)$ . Un exemple de la représentation de la tension de claquage en fonction du produit  $pd$  pour différents gaz, communément appelé courbe de Paschen, est proposé sur la Figure 106 ci-dessous :

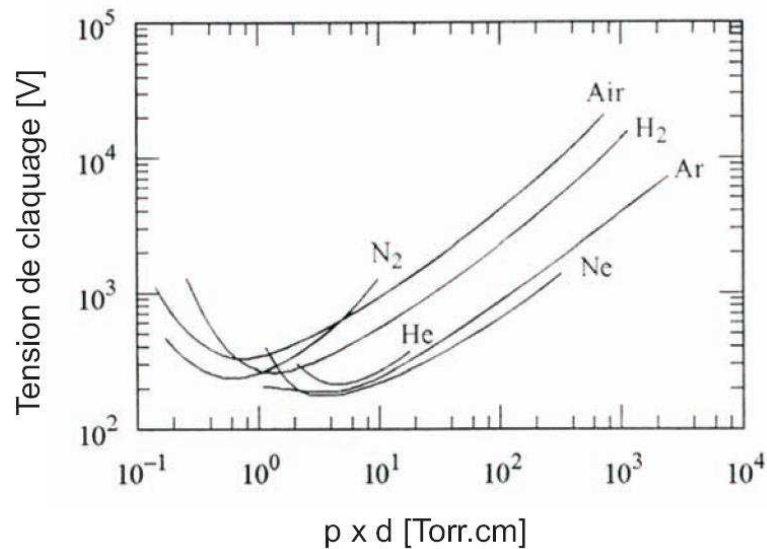


Figure 106 : Courbes de Paschen pour des claquages en air,  $N_2$ ,  $H_2$ , He, Ne, Ar

Une fois la tension de claquage atteinte et la condition d'auto-entretien remplie, un premier type de décharge s'établit : la décharge sombre ou décharge de Townsend. Pour l'établissement de cette décharge, la résistance du circuit doit être très grande afin de limiter le courant de décharge à une valeur suffisamment faible pour que la charge d'espace positive qui s'accumule entre les électrodes ne déforme pas le champ électrique appliqué.

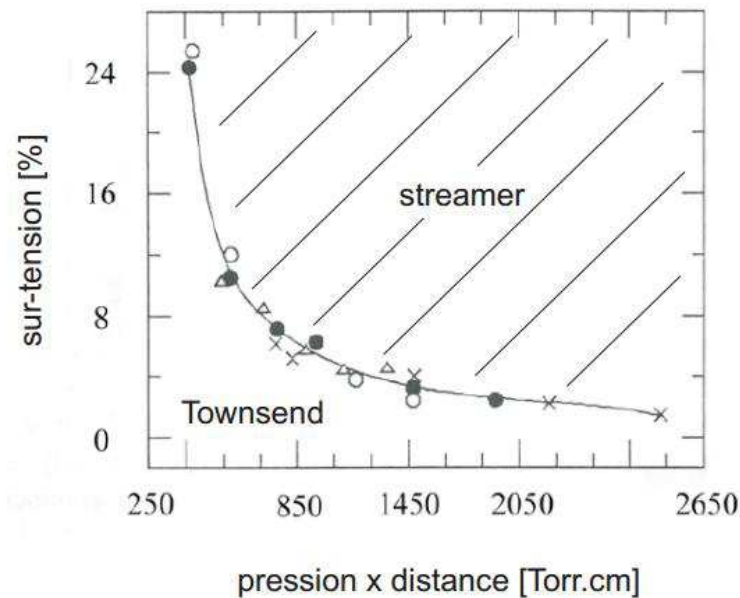
Si le courant augmente, le champ devient spatialement inhomogène et la décharge de Townsend transite en décharge luminescente. Le champ de charges d'espace devenant plus important, la tension nécessaire pour maintenir la décharge diminue. Une chute cathodique se forme, caractérisée par une région de charges d'espace positives autour de la cathode avec des champs électriques élevés. Une colonne positive de plasma quasi-neutre se crée entre l'anode et la cathode.

Durant le processus de claquage chaque avalanche s'étend généralement transversalement à cause de la diffusion des électrons. D'autre part, un processus ne débute pas nécessairement avec un seul électron, plusieurs peuvent être émis simultanément à des endroits différents. Ainsi, le claquage de Townsend occupe le plus souvent tout le volume inter-électrodes par diffusion. Il en va de même pour les décharges, dites, de ce fait, homogènes résultantes : décharge de Townsend ou décharge luminescente. Ceci constitue une différence importante par rapport aux décharges filamenteuses, issues d'un claquage de type Streamer, qui sont très localisées, comme nous allons le voir à la partie suivante.

### c. Claquage de type Streamer et décharge filamentaire

La plupart des décharges que l'on rencontre à la pression atmosphérique (corona, arc) sont initiées par un claquage de type Streamer.

Dans l'air, lorsque le produit pression-distance inter-électrodes devient supérieur à 1000 Torr.cm on peut s'attendre à un claquage de type Streamer et à un claquage de type Townsend s'il est inférieur. Une surtension trop importante résulte aussi en un claquage de type Streamer. La courbe de la Figure 107 propose une limite entre ces deux types de claquage dans l'air en fonction de la surtension appliquée et du produit pd :



**Figure 107 :** Courbe séparant les conditions en air résultant d'un claquage de Townsend (région inférieure) d'un claquage de type streamer (région supérieure)

Dans ces conditions ( $pd > 1000$  Torr.cm ou sur-tension élevée), le processus de claquage observé est trop rapide pour être expliqué par un mécanisme d'avalanches électroniques successives assistées par l'émission d'électrons secondaires à la cathode. Cette émission secondaire due à l'impact des ions à la cathode n'est tout simplement pas possible car le temps de propagation de l'avalanche primaire est beaucoup plus rapide que le temps de transit des ions à la cathode.

D'autre part, une des caractéristiques essentielles du claquage de Townsend est que le champ de charges d'espace d'une seule avalanche électronique ne modifie pas le champ électrique appliqué dans l'espace inter-électrodes. Cependant, quand le nombre d'électrons dans l'avalanche dépasse un seuil critique  $N_{cr}$  ( $\sim 10^8$ ) avant d'atteindre l'anode,

l'accumulation de charges d'espaces locales engendre un mécanisme de claquage complètement différent. Le critère de Meek définit ce seuil :

$$e^{\alpha d} \leq N_{cr}$$

Avec  $\alpha$ , premier coefficient d'ionisation de Townsend et  $d$ , distance inter-électrodes. On parle alors de claquage de type streamer. Ce claquage est beaucoup plus rapide ( $\sim 10^{-9}$ s) que le claquage de Townsend et résulte en un fin canal de décharge, constituant un filament.

Le mécanisme de claquage de type Streamer se décompose en plusieurs phases :

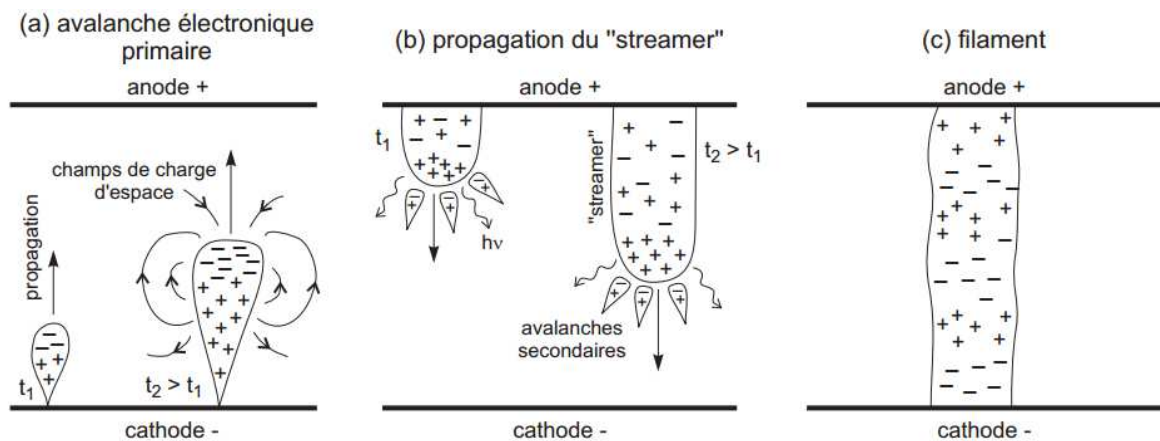


Figure 108 : Mécanisme de claquage de type Streamer. Propagation de : (a) l'avalanche primaire ; (b) du Streamer. Décharge : (c) filament.

- Avalanche primaire (Figure 108 (a)) :

Une avalanche intense se forme et croît très rapidement de la cathode vers l'anode. Les charges d'espace forment une sorte de dipôle au sein même de l'avalanche : les électrons sont en tête d'avalanche alors que les ions positifs restent en queue. Le champ de charges d'espace résultant va distordre localement le champ appliqué. Puis, la croissance rapide de l'avalanche et son amplification lui permettent d'atteindre une taille telle que le champ de ces charges d'espace va devenir aussi important que le champ appliqué. A ce moment, le nombre d'électrons atteint son seuil critique  $N_{cr} \approx 10^8$ . Ce champ s'additionne au champ appliqué et une zone faiblement ionisée peut alors se créer. Lorsque l'avalanche atteint l'anode, il ne reste plus que les charges d'espace positives de la queue de l'avalanche dans l'espace inter-électrodes. Le champ est formé par ces charges ioniques et leur image à l'anode.

Pour que l'avalanche primaire se transforme en Streamer, il faut qu'elle atteigne un niveau d'amplification très élevé. Le champ de charge d'espace doit atteindre la valeur du

champ appliqué, sinon il n'y aurait aucune raison que l'évolution normale de l'avalanche soit perturbée.

C'est ce point particulier qui permet de distinguer la transition de l'avalanche primaire vers le Streamer et le claquage de type Streamer de la multiplication des avalanches et du claquage de type Townsend.

- Transition avalanche - Streamer et propagation (Figure 108 (b)) :

Lorsque l'avalanche primaire rejoint l'anode, au moment où son amplification est maximum et où la zone faiblement ionisée se crée, le Streamer va se former. Il va ensuite se propager et croître de l'anode vers la cathode. Cette croissance est causée par des avalanches secondaires qui se créent au voisinage de la tête du Streamer. Elles sont initiées par des électrons émis par photo-ionisation. Ces électrons sont rapidement attirés dans le Streamer et se mélangent aux ions issus de l'avalanche primaire pour former un plasma quasi-neutre. Les ions de l'avalanche secondaire, se déplaçant bien plus lentement que les électrons, sont à leur tour intégrés à la tête du Streamer. Ils forment la nouvelle tête, chargée positivement, du Streamer qui s'étend de cette manière. Ces charges attirent à leur tour les électrons issus d'une deuxième génération d'avalanche secondaire et ainsi de suite jusqu'à rejoindre la cathode.

Cette description correspond à la propagation d'un Streamer positif, comme on peut l'observer avec une distance inter-électrodes faible et une surtension peu élevée, ce qui est le cas pour les DBD. Lorsque la distance inter-électrodes est grande et que la surtension appliquée est importante, un Streamer négatif peut se propager.

Dans ce cas, le champ de charge d'espace de l'avalanche primaire peut être suffisamment grand pour initier un Streamer avant d'atteindre l'anode et la transition avalanche-Streamer a lieu dans l'espace inter-électrodes.

- Etablissement d'un canal de décharge (Figure 108 (c)) :

Une fois que le Streamer a rejoint l'anode, la phase de claquage est terminée et un filament, mince canal de décharge partiellement ionisé, se forme. Dans une DBD, la présence du diélectrique empêche la transition du filament à l'arc (canal hautement ionisé), Figure 105 (a), et limite sa durée de vie à une dizaine de nanosecondes.

Une décharge filamentaire est par définition composée d'une multitude de filaments, initiés par un claquage de type Streamer, apparaissant de manière aléatoire et indépendante dans l'espace inter-électrodes. Suivant la densité d'avalanches primaires simultanées, ce type de claquage peut aussi conduire à une décharge homogène dite « par couplage de streamer ».



**AUTEUR** : Hélène HOURDEQUIN

**TITRE** : Contribution à la conception et mise en oeuvre de structures de packaging pour la montée en tension des modules de puissance : contraintes sur l'isolation

**DIRECTEUR DE THÈSE** : Lionel LAUDEBAT

**CO-DIRECTEUR DE THÈSE** : Marie-Laure LOCATELLI

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE** : Génie Électrique

---

**RÉSUMÉ** : L'électronique de puissance est à l'orée d'une importante évolution avec l'introduction dans les systèmes de nouveaux composants de puissance à semi-conducteur 'grand gap'. En effet, l'évolution de la filière technologique à base de carbure de silicium (SiC) permet le développement de puces de tailles plus petites, capables de fonctionner à plus haute fréquence de commutation, et de supporter des tensions supérieures aux tensions actuelles, restreintes depuis plusieurs dizaines d'années par les propriétés physiques du silicium. L'introduction de ces composants impose par conséquent d'adapter leur environnement pour prendre en compte ces nouvelles performances. D'un point de vue électrique, les contraintes imposées aux matériaux isolants deviennent proches de leurs limites admissibles, notamment dans les configurations de packaging des modules de puissance actuellement utilisées.

L'objectif de cette thèse est de proposer une solution originale permettant d'intégrer les composants de tenue en tension 15 kV, actuellement en phase de développement, dans une structure telle que le module de puissance. Après avoir étudié différentes solutions de packaging, l'étude s'est notamment focalisée sur une zone particulière, appelée zone de point triple située à l'intersection entre le substrat isolant, la métallisation et l'encapsulation. Nous proposons, à partir de simulations par la méthode des éléments finis, une nouvelle géométrie du substrat céramique métallisé capable de réduire l'intensité du champ électrique au point triple. La modification de la structure consiste en la création d'une gorge dans le substrat au bord de la métallisation. Cette nouvelle structure optimisée a montré en simulation une réduction remarquable de l'intensité du champ électrique au point triple du fait d'une meilleure répartition des équipotentielles.

Après une revue des différentes techniques de réalisation, l'usinage par ultrasons a été retenu, ce mode d'usinage est particulièrement efficace pour des matériaux durs et cassants telles que les céramiques et permet d'obtenir un profil de gravure présentant notamment un excellent alignement du bord du métal avec celui de la céramique. Les résultats expérimentaux sur des échantillons tests ont permis de procéder à des essais montrant des résultats intéressants et encourageants en terme de décharges partielles et de tenue en rigidité électrique.

Grâce à l'analyse en simulation par FEM et après les premiers résultats expérimentaux, la nouvelle structure géométrique du substrat céramique métallisé proposée pour les modules de puissances haute tension, apparaît comme une solution intégrable technologiquement pour l'optimisation du packaging en vue de la montée en tension du module. Par ailleurs, l'intérêt de la solution proposée comparée avec d'autres stratégies publiées, telles que l'emploi de matériaux d'encapsulation innovants a été discuté, ainsi que l'avantage offert de pouvoir combiner les atouts de deux types d'approches.

---

Mots clés : module de puissance ; substrat céramique métallisé ; point triple ; méthode des éléments finis

**TITLE** : Design of Packaging Structures for High Voltage Power Electronics Devices: Electric Field Stress on Insulation

---

**ABSTRACT**: The power electronics is at the beginning of a major evolution by the introduction of new power components semiconductor 'wide bandgap' in the systems. Indeed, the evolution of silicon carbide (SiC) technology allows to develop small chips, which can operate at a higher switching frequency, and support higher voltages than current one, limited during several decades by the physical properties of silicon. Therefore, the introduction of these components must be adapted to their environment in order to take into account these new performances. From an electrical point of view, the stresses imposed on insulating materials are close to their limits, particularly in the packaging configurations currently used in the power modules.

The aim of this thesis is to propose an original solution allowing to integrate the 15 KV components currently in development phase, in a structure such as power module. After studying some packaging solutions, the study focused on a particular area, called the triple point between the metallization, the substrate and the encapsulation materials. We propose, from simulations by the finite element method analysis, a new geometry for the metallized ceramic substrate able to reduce the electric field intensity at the triple point. The structure modification consists in the creation of a gap in the substrate at the edge of the metallization. This new geometric structure has shown by simulation a significant reduction of the electric field intensity at the triple point thanks to a better spreading of the equipotential lines.

After reviewing several technical manufacturing, ultrasonic machining was selected, this process is particularly efficient for hard and brittle materials such as ceramics and provides an etching profile with an excellent alignment to the edge of the metallization with the ceramic. Experimental results based on samples tests made it possible to carry out tests showing interesting and encouraging results in terms of partial discharges and resistance to dielectric strength.

Thanks to the simulation under FEM analysis and after first experimental results, the new geometric structure for the metallized ceramic substrate proposed for the high voltage power modules, seems to be a technologically integrable solution for the optimization of the packaging for the purpose of the voltage rise in module. Moreover, the interest of the proposed solution compared with other published strategies, such as the use of innovative encapsulation materials was discussed, as well as the advantage offered of being able to combine the strengths of two types of approaches.

---

Keywords: power module; metallized ceramic substrate; triple point; finite element method