



HAL
open science

Etude des potentialités du Parylene HT comme isolant au sein des modules de puissance Haute Température

Marie-Laure Locatelli, Sombel Diahm, Rabih Khazaka, Mireille
Bechara-Keyrouz

► **To cite this version:**

Marie-Laure Locatelli, Sombel Diahm, Rabih Khazaka, Mireille Bechara-Keyrouz. Etude des potentialités du Parylene HT comme isolant au sein des modules de puissance Haute Température. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065166

HAL Id: hal-01065166

<https://hal.science/hal-01065166>

Submitted on 18 Sep 2014

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.

Etude des potentialités du Parylene HT comme isolant au sein des modules de puissance ‘haute température’

Marie-Laure Locatelli^{1,2}, Sombel Diahm^{1,2}, Rabih Khazaka^{1,2}, Mireille Bechara-Keyrouz^{1,2}

¹Université de Toulouse; UPS ; INPT; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie); 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse cedex 9, France - ²CNRS; LAPLACE; F-31062 Toulouse, France

RESUME - Cette présentation a pour objectif d'évaluer le parylène AF4 en tant que candidat à l'isolation électrique ‘haute température’ au sein des nouvelles structures de modules de puissance. La propriété de rigidité diélectrique et la stabilité thermique du Parylene HT (forme commerciale du parylène AF4) sont plus particulièrement détaillées ici, en fonction de l'épaisseur du film déposé, de sa température, et du temps de stockage dans l'air. Un lien avec l'état de la structure semi-cristalline du matériau est proposé. La durabilité des propriétés physico-chimiques et diélectriques du Parylene HT, au-delà de 2000 heures dans l'air à 300 °C, est présentée pour la première fois. L'étude des propriétés électriques du Parylene HT dans une gamme de température étendue jusqu'à 400 °C, constitue plus généralement l'originalité des travaux menés.

Mots-clés— *Parylène-AF4, dépôt conforme, isolation de surface, stabilité thermique, rigidité diélectrique, vieillissement isotherme, haute température*

1. INTRODUCTION

De plus en plus intégrés, ou placés au plus près des actionneurs en milieux ambiants chauds, les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance voient les contraintes électriques et thermiques sur tout ou partie de leurs constituants s'accroître. La disponibilité de composants à semi-conducteur à grand gap capables de fonctionner à plus forte densité de courant, sous plus haute tension, à plus haute température de jonction, autorisent aujourd'hui ces évolutions. Les matériaux isolants de surface ou d'encapsulation au sein des composants et modules de puissance sont concernés au premier chef par cette tendance, du fait de leur triple fonction de protection (électrique, mécanique et chimique), et du fait que les matériaux actuellement utilisés (gels silicone ou époxy) sont parmi les plus limitants vis-à-vis de la montée en température des dispositifs. Des procédés de fabrication, adaptés à la mise en œuvre de ces matériaux au sein des nouvelles architectures de packaging, sont de plus recherchés. Dans ce contexte, un matériau de la famille des parylènes (ou poly(p-xylylènes)) est apparu prometteur pour contribuer à l'amélioration de performances et de la fiabilité de l'isolation électrique des composants et modules de puissance capables de fonctionner à température de jonction supérieure à 200 °C.

Les parylènes sont des polymères thermoplastiques, mis en œuvre sous forme de films minces (de la dizaine de nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres), principalement par dépôt

en phase vapeur selon le procédé de Ghoram ^[1]. La polymérisation du parylène lors de la condensation de l'espèce monomère réactive en phase gazeuse, sur la pièce à revêtir (à température proche de la température ambiante ou légèrement inférieure), constitue un des atouts majeurs de ce procédé. Ce procédé sans solvant, en phase vapeur sous basse pression, conduit à des dépôts très conformes et pénétrants, sans contraintes thermo-mécaniques résiduelles, adaptés à tout type de géométries et natures d'objets. Présentant de plus des propriétés électriques, chimiques, mécaniques intéressantes, les films parylènes sont utilisés dans de nombreux domaines (microélectronique, micromécanique, spatial, médical, ...), comme revêtement électriquement isolant, barrière de contamination, protection aux solvants, surface biocompatible ... De nombreux fournisseurs de services de dépôt existent dans le monde, offrant différents types de parylènes (nommés N, C, D, F, DiX-F, HT, ...). Ces matériaux (et leurs dimères précurseurs respectifs) diffèrent par la nature de l' (ou des) atome(s) qui se substitue(nt) à un atome d'hydrogène, et son (leurs) site(s) d'occupation, dans la structure chimique du précurseur pur [2.2]-paracyclophane. Ainsi pour exemples, le Parylène N correspond à la forme non substituée (C₈H₈)_n, le Parylène C (C₈H₇Cl)_n comporte un atome de Chlore en substitution d'un atome d'hydrogène du cycle benzénique, le Parylène D (C₈H₆Cl₂)_n comporte deux atomes C en substitution de deux atomes H du cycle benzénique. Des fournisseurs de dimères précurseurs, et de bâtis de dépôts sont également présents sur le marché, majoritairement pour l'obtention de films de Parylene N, Parylene C et Parylene D, qui sont les plus largement employés à ce jour. La présence d'atomes de fluor F au sein d'une chaîne de polymère organique est favorable à la réduction de la polarisabilité électrique et à l'augmentation de la stabilité à température élevée, qui sont des qualités recherchées pour les couches diélectriques d'interconnexion à faible permittivité des dernières générations de dispositifs microélectroniques. Ceci explique le développement et l'offre de dépôts de différentes formes de parylènes fluorés, le plus souvent sous licence exclusive. La découverte tardive d'un procédé de production économiquement viable du précurseur [1,1,2,2,9,9,10,10-octafluoro[2.2]-paracyclophane] a permis la commercialisation de films du parylène AF4 (-CF₂-C₆H₄-CF₂-)_n au début des années 2000, par la société SCS ^[2], sous le nom de Parylene HT. Contrairement aux trois parylènes cités précédemment, les quatre atomes F se substituant aux atomes H sont liés aux

atomes C aliphatiques, comme le montre sa structure chimique représentée en figure 1. Malgré les excellentes potentialités annoncées pour ce nouveau matériau, en particulier pour les applications en électronique de puissance^[3], du fait de sa nette supériorité en termes de stabilité sous haute température et sous radiations UV, très peu d'études ont été consacrées à l'évaluation de ses propriétés électriques et de leur durabilité à haute température (> 250 °C) et sous fort champ électrique. Bien que plus facilement disponible sur le marché, et moins onéreux, un autre type de parylène fluoré, le parylène VT4 ($-\text{CH}_2-\text{C}_6\text{F}_4-\text{CH}_2-$)_n (les quatre atomes F sont portés par quatre atomes de C du cycle benzénique)^[4] a également rarement fait l'objet de ce type de recherches^[4].

A l'étude depuis plusieurs années au LAPLACE^{[5] [6] [7]}, en vue d'évaluer son intérêt pour répondre aux besoins de l'isolation électrique au sein des nouveaux dispositifs de puissance (plus haute tension, plus haute température ou plus forte densité de puissance), les propriétés électriques et thermiques du Parylene HT (en collaboration avec la société SCS^[2]) ont pu être quantifiées, sous différentes configurations (de substrats, d'environnement, ...) et pour différents lots de production, et s'intéressant à la compréhension des mécanismes physiques dans une gamme étendue de températures (jusqu'à 300 °C et au-delà). Dans cet article, la caractéristique de rigidité diélectrique du Parylene HT, et son vieillissement, en fonction de l'épaisseur du film, de la température, et du temps d'exposition des dépôts à haute température en présence d'air seront plus particulièrement présentés. Au préalable, les résultats d'analyses thermogravimétriques isothermes effectuées pour les films de Parylene HT sur 1000 minutes seront tout d'abord présentés et comparés à ceux obtenus sur des films de parylène VT4, fournis par la société COMELEC^[8] (sous le nom Parylene F). Cette première indication de la stabilité thermique du matériau en présence d'air sera complétée par l'examen de l'évolution de l'épaisseur des films stockés à haute température observée sur des durées beaucoup plus longues (jusqu'à 3000 heures).

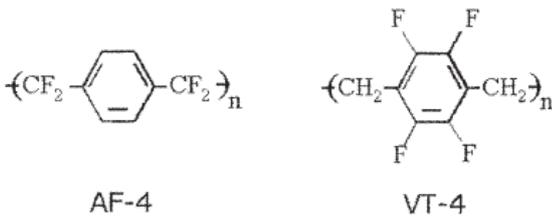


Fig.1 Structures chimiques des parylènes AF4 et VT4.

2. STABILITE THERMIQUE ET PROPRIETES STRUCTURALES

2.1. Perte de masse en présence d'air à 350 °C

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est généralement la première analyse effectuée lorsqu'il s'agit d'évaluer la stabilité thermique d'un matériau. L'ATG isotherme consiste à mesurer l'évolution de la perte de masse d'un échantillon du matériau exposé à température constante en fonction du temps, sur des durées de l'ordre du millier de minutes. La Figure 2 permet de comparer les pertes de masse du parylène AF4 (Parylene HT) avec celles du parylène VT4 (Parylene F), au cours de leur exposition à 350 °C en présence d'air (la rampe de montée initiale en température utilisée est de 10 °C/min). Cette analyse

semble indiquer une très bonne aptitude du Parylene HT à résister à 350 °C dans l'air, avec une faible perte de masse de moins de 1 % au bout de 1000 min, contrairement au résultat obtenu pour le parylène VT4, qui présente une dégradation beaucoup plus rapide et très importante dans les mêmes conditions. Ceci est également un excellent résultat en comparaison des pertes de masses supérieures mesurées pour des films de polyimides parmi les matériaux organiques les plus stables à haute température, mais pouvant se dégrader rapidement par attaque thermo-oxydative en présence d'oxygène comme dans le cas du polyimide BPDA-PDA^[9]. L'ATG à 400 °C également présentée sur la figure 2 montre que la perte de masse du Parylene HT reste encore très faible (moins de 3 %) au bout de 1000 min, mais celle-ci ne semble cependant pas se stabiliser. Si elle permet à ce stade de préférer le parylène AF4 au parylène VT4 en vue d'une utilisation à haute température, l'analyse thermogravimétrique seule ne permet pas de s'assurer d'un bon comportement à long terme du parylène AF4, même pour des températures inférieures à 350 °C. La stabilité des propriétés physico-chimiques et diélectriques sur plusieurs milliers d'heures à haute température doit être analysée.

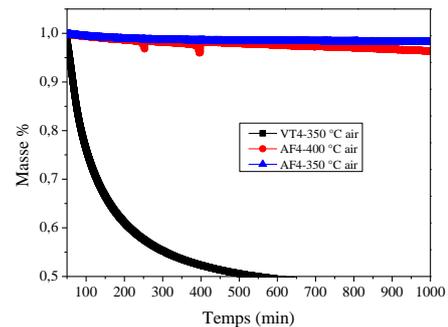


Fig.2 ATG isothermes en présence d'air à 350 °C pour le parylène AF4 (Parylene HT^[3]) et le parylène VT4 (Parylene F^[8]) et à 400 °C pour le parylène AF4.

2.2. Pertes d'épaisseur en présence d'air

Une variation de l'épaisseur du film peut être un indicateur de la modification de ses propriétés physiques ou chimiques au cours du temps d'exposition à haute température. De l'épaisseur du film dépend également sa tenue en tension, donc sa fonctionnalité en tant qu'isolant électrique au sein d'un système. La variation d'épaisseur en fonction du temps de stockage isotherme a donc été mesurée et étudiée pour différents films de Parylene HT déposés sur substrats en acier inoxydable (A.I.), dans l'air, à 300 °C et à 360 °C (l'instrument de mesure est un profilomètre mécanique KLA Tencor Alpha-A, de précision en z ±0,01 µm). Comme le montre les figures 3(a) et 3(b) pour deux films minces, d'épaisseurs initiales différentes (1,3 µm et 5 µm), la perte d'épaisseur en valeur absolue est d'autant plus importante, pour un temps de vieillissement donné, que la température est élevée, et que le film déposé est épais. On peut déduire de ce dernier point que le mécanisme sous-jacent est de nature volumique plutôt que surfacique. Dans le cas d'une exposition à 300 °C (figure 3(a)), la perte en épaisseur se stabilise rapidement à environ 4 % de l'épaisseur initiale. Cette faible et relativement rapide diminution d'épaisseur de films peut être liée à l'évolution

connue de la cristallisation des films de parylène non recuits après dépôt, sous l'effet de leur exposition à une température élevée proche de leur température de transition cristalline (voisine de 400 °C [10]). Cela se traduit en effet par une augmentation de la taille des cristallites et une diminution de la distance inter réticulaire (comme mise en évidence par analyse par diffraction de Rayons X [6]). Une densification du film en résulte se traduisant par aussi par un légère diminution de son épaisseur. La dynamique de l'évolution de la structure cristalline a été évaluée pour plusieurs cas. La structure cristalline se stabilise en quelques minutes pour un recuit/exposition après dépôt à 400 °C [5] [6], en 300 minutes à 300 °C [7] ou en quelques dizaines d'heures à 280 °C [11], pour des films de quelques µm d'épaisseur. La figure 3(a) rappelle la pente obtenue pour l'accroissement linéaire de la perte en épaisseur observée pour les films minces de polyimide BPDA-BDA dans les mêmes conditions de température, de substrat et d'atmosphère [9], mettant en évidence la plus grande stabilité thermique du film de Parylène HT dans ce cas.

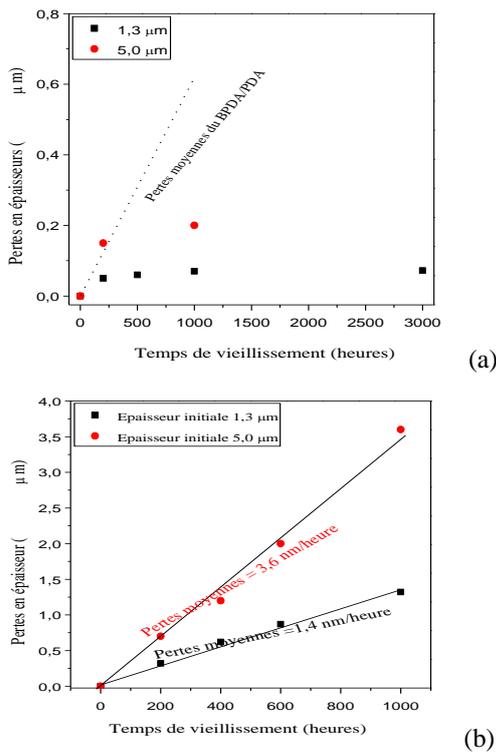


Fig.3 Pertes en épaisseur pour deux épaisseurs de films de Parylène HT déposés sur A.I. en fonction de la durée de stockage sous air a) à 300 °C et b) à 360 °C[5].

En revanche la figure 3b) indique que la perte en épaisseur à 360 °C dans l'air, est linéaire en fonction du temps de stockage, sur toute la durée considérée (soit 1000 heures). Cela se traduit dans l'exemple ici par la disparition du film le plus mince (d'épaisseur 1,3 µm déposé sur A.I.), en moins de 1000 heures de vieillissement. La non stabilisation de la structure cristalline (comme décrite plus haut) indique que d'autres mécanismes, de dégradation thermique et/ou oxydative, interviennent dans ce cas. Il peut donc être préjudiciable d'utiliser des films de Parylène HT très minces pour assurer

une protection fiable aux temps longs en présence d'air, si la température de fonctionnement est supérieure à 300 °C.

3. ETUDE DE LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DU PARYLENE HT

3.1. Etude initiale à 25 °C en fonction de l'épaisseur

Les mesures de rigidité diélectrique ont été effectuées en appliquant un champ électrique DC linéairement croissant de rampe égale à 400 kV/cm/s, sur les films de Parylène HT contactés avec des électrodes métalliques : le substrat métallique pour le contact de masse en face arrière du film, et une électrode de 600 µm de diamètre pour le contact en face avant. Selon l'épaisseur du film, l'électrode supérieure est soit un film d'au déposé par évaporation sous vide et photolithographié, soit une électrode en acier inoxydable de forme Rogowski en contact avec la surface du Parylène HT. Afin d'éviter les contournements de champ en surface dans l'air, les mesures ont été réalisées en immergeant les structures de test dans un liquide isolant. Il a été vérifié que ce faisant, il était possible de considérer que le champ appliqué à la structure est bien uniforme, et que le champ de rupture diélectrique peut être considéré comme égal au rapport de la tension au moment du claquage sur l'épaisseur du film. La tension de claquage du film est la dernière valeur de la tension enregistrée au moment où le courant délivré par la source de tension continue atteint la valeur limite autorisée (fixée à 1 mA). Plusieurs lots de dépôts de différentes épaisseurs, sur substrats de différentes natures (substrats métalliques en A.I., substrats céramiques en Si₃N₄ métallisés Cu/Ni/Au, et substrats céramiques en AlN métallisés Al/Si), (approvisionnés depuis le début de nos travaux en 2008) sont considérés ici. Certains films ont été testés tels que déposés et d'autres ont subi un recuit additionnel à 400 °C sous azote avant de participer aux essais. Le facteur d'échelle E_{bro}, défini classiquement selon l'analyse statistique de Weibull [12] [13] des données de claquage (lots de 20 structures par cas) est le champ considéré ici pour quantifier la rigidité diélectrique. La figure 5 présente une synthèse de l'ensemble des résultats de mesure de la rigidité diélectrique à température ambiante en fonction de l'épaisseur des dépôts. La figure 5(a) concerne les films non recuits après leur élaboration. On observe tout d'abord une bonne reproductibilité des valeurs de la rigidité diélectrique du Parylène HT entre les différents approvisionnements (appelés Run 1, 2 et 4) et les différents types de substrats (métalliques et céramiques métallisés), en particulier pour les épaisseurs de 20-25 µm. La décroissance de la rigidité diélectrique en fonction de l'épaisseur est un comportement classiquement observé pour les films isolants polymères [14] dans cette gamme d'épaisseurs. Si les résultats obtenus pour le Parylène HT suivent cette tendance pour les films d'épaisseur supérieure à environ 5 µm, un comportement inverse atypique est constaté pour les films plus minces. La discussion de l'origine de ce phénomène a fait l'objet d'une publication [15], le reliant à la structure semi-cristalline des dépôts, présentant elle-même des caractéristiques dépendantes de l'épaisseur du film. En particulier un saut dans l'augmentation de la taille des cristallites lorsque l'épaisseur des films augmente a également été mis en évidence dans la plage d'épaisseurs de 3 µm à 12 µm. Aux limites inférieures de cette plage, l'augmentation de l'épaisseur permet le développement de la taille des cristallites

par réduction de l'effet de confinement du volume, ayant un bénéfice pour l'augmentation de la rigidité diélectrique. En revanche, à droite de cette plage, le développement des cristallites sous forme de sphérolites observé uniquement dans les films d'épaisseur supérieure à 5 μm , et l'accroissement de leur nombre par unité de volume dans les films les plus épais (leur taille évoluant à nouveau très peu), sont probablement associés à la décroissance de la rigidité diélectrique des films plus épais.

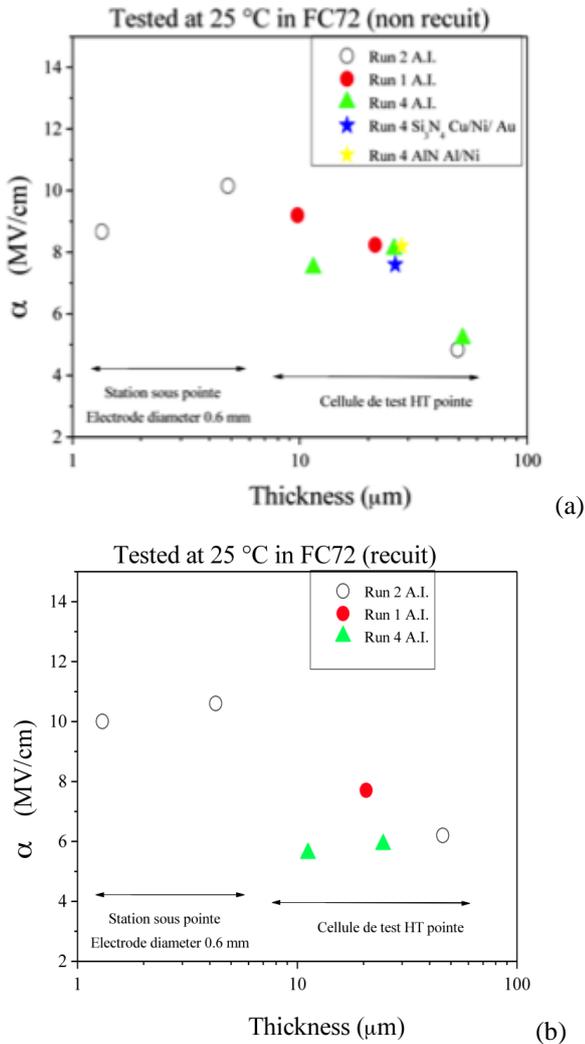


Fig. 5 Evolution du champ de rupture $E_{br\alpha}$ en fonction de l'épaisseur du film de Parylene HT, (a) tel que déposé et (b) recuit, pour différents lots étudiés. (Les films minces sont testés sur structures avec électrode en Au évaporé contacté avec la station sous pointes, les films épais sont testés nus contactés avec une électrode au profil Rogowski dans une cellule de test 'haute tension') Dans tout les cas, l'aire en contact sous l'électrode supérieure a un diamètre de 600 μm .

La figure 5(b) présente les résultats pour des échantillons issus des mêmes lots de fabrication que ceux de la figure 5(a) (identifiés par les mêmes symboles) mais claqués après le traitement thermique additionnel. En comparant les deux figures, on observe que les résultats correspondant aux films d'épaisseurs comprises entre 10 et 25 μm montrent un effet défavorable du recuit post-dépôt sur leur rigidité

diélectrique, alors qu'il a un effet positif en dehors de cette gamme. L'accroissement de la cristallisation du film, dû cette fois-ci au recuit à 400 °C, et son effet à l'échelle nanométrique (augmentation de la taille des petits cristallites et diminution des distances inter réticulaire, comme déjà évoqué au paragraphe 2.2), peut être bénéfique pour améliorer la rigidité diélectrique des films les plus minces et les plus épais. De même, l'effet du recuit sur une cristallisation plus importante à l'échelle microscopique, conduisant notamment à l'accroissement de la taille des sphérolites, peut aggraver la réduction de la rigidité diélectrique pour des couches d'épaisseurs intermédiaires. La figure 6 montre l'exemple pour un film d'épaisseur initial 10 μm , présentant après traitement thermique des sphérolites de diamètre moyen d'environ 10 μm , alors qu'ils n'étaient pas visibles préalablement.

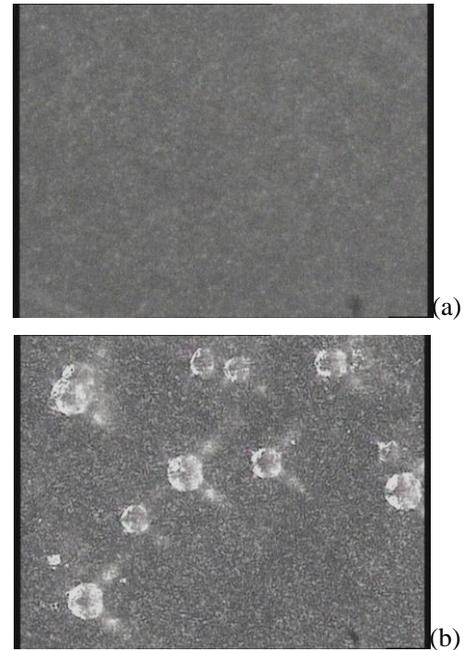


Fig.6 Images au microscope optique polarisé des films de PA-HT d'épaisseur 10 μm (a) non recuit et (b) recuit 400 °C. (Même grandissement, les sphérolites (b) ont un diamètre maximal voisin de 10 μm)^[6].

Il est important de signaler que tous les cas étudiés permettent d'observer les valeurs élevées des champs de rupture à 25 °C des films de Parylene HT, toutes supérieures à 4 MV/cm, y compris pour la plus forte épaisseur (50 μm) ou lorsque le recuit à haute température modifie la structure cristalline du film. Une valeur maximale remarquable, supérieure à 10 MV/cm, est mesurée pour les films d'épaisseur 5 μm .

3.2. Rigidité des films vieillis à 300 °C dans l'air

Les films non traités au préalable par un recuit additionnel à haute température, d'épaisseur initiale de 1 μm à 12 μm , montrent une phase initiale transitoire de diminution en épaisseur (moins de 10 %), d'amélioration des propriétés diélectriques sous faible champ, et de décroissance du champ de rupture. Cette phase est suivie d'une stabilisation rapide de toutes les propriétés contrôlées jusqu'à plusieurs milliers d'heures. La Figure 7 montre l'évolution avec le temps de vieillissement de la tension de rupture et du champ de rupture,

mesurées à 300 °C, pour deux épaisseurs de films. Les performances d'isolation à haute température des films de Parylene HT vieillis à 300 °C restent excellentes après plusieurs milliers d'heures sous air.

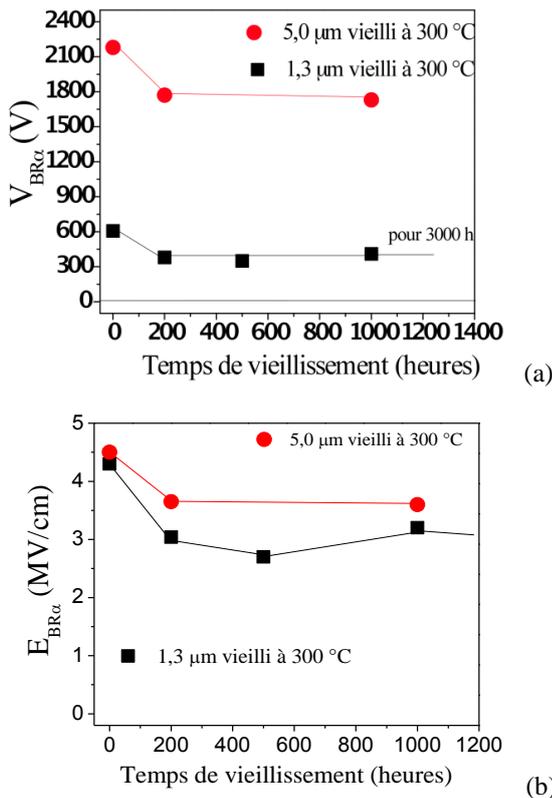


Fig. 7 Effet du vieillissement isotherme à 300 °C dans l'air sur (a) la tension de rupture $V_{BR\alpha}$ et (b) le champ de rupture $E_{BR\alpha}$ pour des films minces de Parylene HT déposés sur substrats en acier inoxydable [7]. Ces valeurs de tension et de champ de rupture ont été mesurées à 300 °C.

L'état de surface des films vieillis dans ces conditions, ainsi que la nature des liaisons physico-chimiques (analysées par 'FTIR') ne sont pas modifiées [7].

Des films plus épais (24 μm), déposés sur différents types de substrats céramiques métallisés (Si_3N_4 (635 μm)/ Cu/Ni/Au (300 μm) et AlN (1 mm) / Al/Ni (300 μm)) ont également été étudiés, montrant que leur vieillissement à 300 °C sous air durant 1000 heures affecte peu la tenue en tension de ces films plus épais (diminution de 20% et $V_{br\alpha}$ #18 kV au bout de 1000 h). Par ailleurs, aucun problème lié à l'adhésion des films n'a été observé pour les films minces, déposés sur A.I. ou sur silicium au cours de nos travaux. En revanche, un cas de perte d'adhérence a été constaté (par simple grattage) sur les films d'épaisseur initiale 24 μm déposés sur les substrats céramiques métallisés.

4. CONCLUSION

En conclusion, les résultats obtenus ont montré l'intérêt des films minces de Parylene HT pour contribuer à l'isolation interne de composants et modules de puissance, par sa capacité à supporter de forts champs électriques à haute température et

de façon stable sur plusieurs milliers d'heures à 300 °C en présence d'air. A titre d'exemple, un film d'épaisseur initiale 5 μm , présente un champ de rupture de l'ordre de 3 MV/cm à 300 °C, après 3000 heures de stockage à 300 °C en présence d'air et des températures pouvant atteindre 300 °C. Une poursuite de l'étude serait nécessaire, en particulier en cyclage thermique, et jusqu'à l'application dans un démonstrateur complet.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement la DGCIS, la FNRAE et la fédération FERMaT-CNRS pour leur soutien financier, ainsi que les société SCS et COMELEC pour leur coopération.

6. REFERENCES

- [1] W. F. Gorham, « A New General Synthetic Method for the Preparation of Linear Poly-pxylylènes », *J. Polym. Eng. Sci. Part A-1*, 4 , 3027, 1966.
- [2] Rakesh Kumar, Dick Molin, Lamar Young and Frank Ke, « New high temperature polymer thin coating for power electronics », *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Vol. 2, pp. 1247-1249, 2004.
- [3] SCS, Specialty Coating Systems, Inc. Indianapolis, USA
- [4] A. Kahouli, A. Sylvestre, J.-F. Laithier, L. Lutsen, S. Pairis, E. André, J.-L. Garden, « Structural and dielectric properties of parylene VT4 thin films », *Materials Chemistry and Physics*, 143 (2014) 908-914.
- [5] Mireille Bechara, S. Diahm, M.L. Locatelli, C. Tenailleau, S. Zemat, Dielectric, « Thermal and Structural Characterizations of Fluorinated Parylene Films for High Temperature Power Device Surface Insulation », *HITEN'09 – High Temperature Electronics Network - 13/16 sept. – Oxford, UK, 2009*.
- [6] Mireille Bechara-Keyrouz, « Etude des matériaux isolants d'encapsulation pour la montée en température des modules de puissance haute tension », Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (2011).
- [7] Rabih Khazaka, « Etude du vieillissement de polymères isolants utilisés dans le packaging des modules de puissance haute température », Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier (2011).
- [8] COMELEC S.A., La Chaux-de-Fonds, Suisse.
- [9] Khazaka, R. ; Locatelli, M.L. ; Diahm, S. ; Bidan, P., « Endurance of Thin Insulation Polyimide Films for High-Temperature Power Module Applications », *Components, Packaging and Manufacturing Technology*, IEEE Transactions on Volume: 3 , Issue: 5 (2013) , Page(s): 811 – 817
- [10] M. Morgen, S. H. Rhee, J. H. Zhao, I. Malik, T. Ryan, H. M. Ho, M. A. Plano, and P. Ho, *Macromolecules* 32, 7555, (1999).
- [11] R. Khazaka, M.L. Locatelli, S. Diahm, C. Tenailleau, C. R. Kumar, « Real-time crystallization in fluorinated parylene probed by conductivity spectra », *Applied Physics Letters*, Vol 104, n°11, (2014), pp. 112902 - 112902-4
- [12] W. Weibull, A statistical distribution of wide applicability, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, 1951.
- [13] C. Chauvet and C. Laurent, Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28, No. 1, 1993.
- [14] R. Bartnikas, R.M Eichhorn, *Engineering Dielectrics, VolIII-Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behavior (ASTM-STP 783, Philadelphia, (1983)*.
- [15] S. Diahm, M. Bechara, M.L. Locatelli, R. Khazaka, C. Tenailleau, R. Kumar, « Dielectric strength of Parylene HT », *Journal of Applied Physics*, Vol 115, n°5, pp 054102 - 054102-7 (2014)