

# RESISTANCE DES INTERFACES DANS LES CIRCUITS IMPRIMES (PCBs) : TEST DE PELAGE ET RÔLE DE LA PLASTICITE

E. Simlissi<sup>1,2</sup>, M. Martiny<sup>1</sup>, S. Bahi<sup>1</sup>, S. Mercier<sup>1</sup>, L. Bodin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, CNRS, Arts et Métiers Paris Tech, LEM3, 7 Rue Felix Savart, 57000 Metz, France.

<sup>2</sup>CIMULEC, ZI les Jonquières, 57365 Ennery, France.

## Résumé :

*Cette étude a pour objet de la prédiction du délaminage dans les circuits imprimés entre deux matériaux : composite (fibre de verre plus résine) et un film mince de cuivre. Pour caractériser les propriétés adhésives de l'interface entre les deux matériaux, des tests de pelage ont été effectués à différents angles de manière à déterminer la force de pelage et le rayon de courbure du film. Fort de ses deux informations, un modèle analytique de la littérature permet alors de définir les propriétés adhésives. Enfin, des simulations par éléments finis basées sur le modèle de zone cohésive ont été développées pour prédire le délaminage entre le composite et le film de cuivre, démontrant la validité de cette approche lorsque des propriétés sont déterminées à l'aide de tests de pelage.*

## Abstract:

*This study concerns the prediction of delamination in printed circuit boards between two materials: composite (glass fiber plus resin) and a thin film of copper. To characterize the adhesive properties of the interface between the two materials, peel tests were performed at different peel angles to determine peel force and radius of curvature of the film. From these data, a model of literature enables to evaluate the plastic dissipated energy in the thin copper film due to bending and debending. Finally, finite element simulations based on the cohesive zone model were developed to predict the delamination between the composite and the copper film, showing the validity of a cohesive zone model where the properties are determined using of peel tests.*

**Mots clefs : test de pelage, interface, film mince, éléments cohésives.**

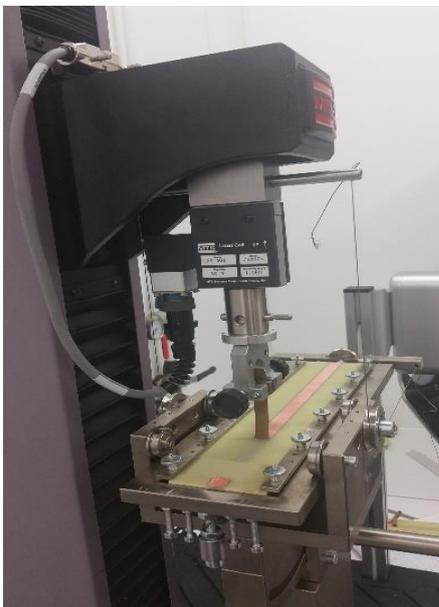
## 1. Introduction

Un circuit imprimé (PCB) est un matériau multicouche constitué de matériaux diélectriques et de cuivre. Pour les applications aérospatiales, la fiabilité des circuits imprimés doit être assurée pendant des décennies pour assurer le fonctionnement des dispositifs électroniques (satellites ou autres équipements). Au cours du processus de qualification, le PCB est soumis à des cycles thermiques dans la plage [-55 ° C, + 125 ° C]. Il est important de vérifier que le cuivre ne présente pas de rupture et que les interfaces restent sûres. Dans cette présentation, nous nous concentrons sur l'interface entre un composite tissé (fibres de verre et résine époxy) et un film mince de cuivre. Le test de pelage est un test mécanique très utilisé pour mesurer la force d'adhérence. Le pelage peut être effectué en appliquant une force constante, mais il est courant de faire le test de pelage à vitesse constante et de mesurer la force appliquée pour séparer les matériaux. En général, l'adhérence entre le métal et le polymère peut être faible, de sorte que dans les applications industrielles, la fiabilité des assemblages reste problématique.

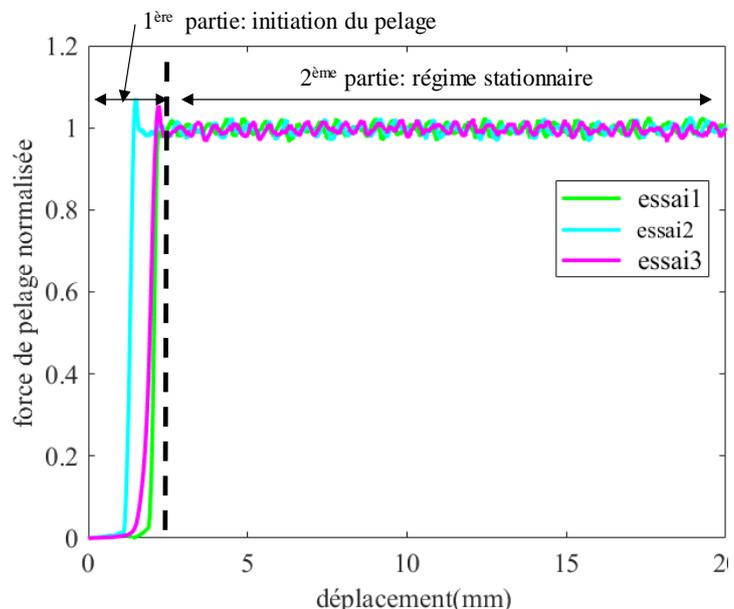
De nombreuses recherches ont été consacrées à l'amélioration des propriétés interfaciales [1,2]. La première analyse théorique du test de pelage a été présentée par Spies [3], qui a examiné le pelage à  $90^\circ$  d'un film mince. L'étude fondatrice est celle réalisée par Rivlin [4] en 1944, où une relation simple a été établie dans le contexte d'un film inextensible entre l'énergie de décohésion dans le processus de pelage et la force de pelage. En ce qui concerne le problème des films minces élastiques sur un substrat rigide, le modèle classique de Kendall [5] montre que la force de pelage dépend non seulement de l'énergie d'adhésion mais également de la déformation élastique du film ainsi que de l'angle de pelage. En ce qui concerne notre problématique, la plasticité est activée lors du pelage. De nombreux travaux de la littérature ont aussi traité ce cas. On peut citer sans être exhaustif l'analyse théorique de pelage d'un film mince élasto-plastique collé sur un substrat élastique développée par Kim et Aravas [6]. Ils ont défini la relation moment-courbure pour la flexion pure d'un matériau élasto-plastique dans des conditions de déformation plane et ont utilisé la théorie des poutres pour analyser la déformation du film mince. Ils ont également présenté une analyse du pelage en régime stationnaire et une méthode de calcul du travail de la force pendant le pelage à l'état stationnaire. De plus en faisant un bilan énergétique, ils ont relié la force de pelage mesurée expérimentalement à l'énergie de décohésion. Wei et Hutchinson [7] ont quant à eux analysé la simulation du processus de pelage en régime stationnaire des couches minces en utilisant la méthode des éléments finis élasto-plastiques (2D).

## 2. Essais de pelage expérimental

Afin de déterminer la résistance de l'interface entre le film mince de cuivre et le substrat composite, un test de pelage expérimental a été mis au point à l'aide d'un dispositif de pelage (machine MTS). Ce dispositif permet de réaliser le test de pelage pour des angles de pelage variant de  $10^\circ$  à  $180^\circ$ . Au cours de l'expérience de pelage, les vitesses de la traverse et de la table sont identiques (0.5 mm/s) car la traverse et la table sont reliées par un câble. Ceci permet de maintenir l'angle de pelage constant pendant l'essai. L'éprouvette est fixée à la table et le film de cuivre est fixé entre les mors du dispositif (Fig.1).

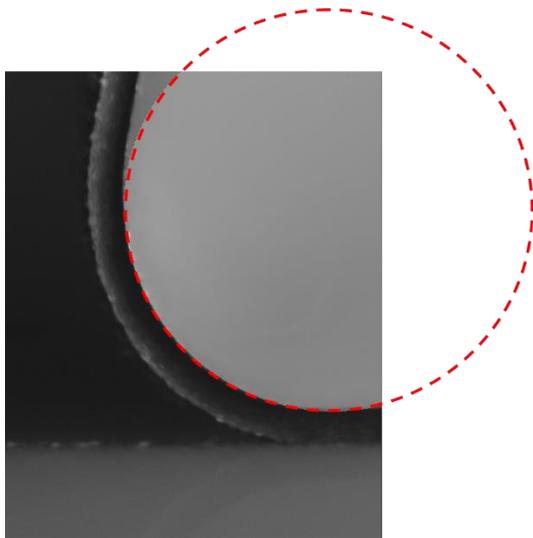


**Fig.1** : Dispositif utilisé dans les tests de pelage

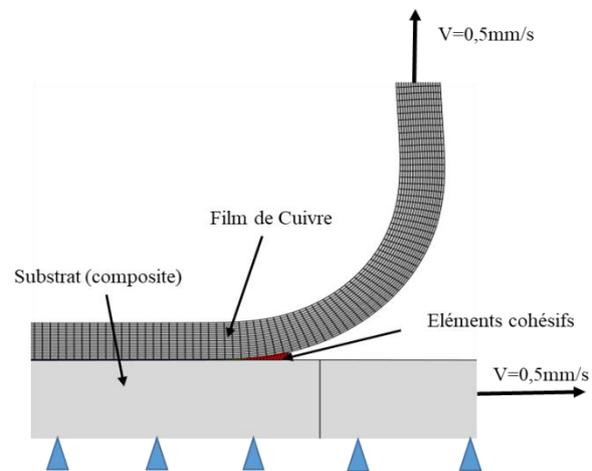


**Fig.2** : Courbe force-déplacement lors du test de pelage, montrant les deux phases d'initiation et stationnaire.

Des échantillons représentatifs sont réalisés à partir des matériaux utilisés dans les applications réelles : pré-imprégnés de fibres de verre époxy et feuillard de cuivre ont été assemblés conformément à la norme industrielle. Le pressage à chaud des matériaux assure l'adhésion du cuivre. Des bandes de cuivre (10 mm de largeur, 30 cm de long et 35 $\mu$ m d'épaisseur) sont ensuite gravées à la surface de l'échantillon avant essai. L'expérience est menée à température ambiante. Nous avons réalisé des tests de pelage pour cinq angles de pelage différents (45 °, 60 °, 90 °, 120 °, 135 °). Les tests de pelage ont été répétés plusieurs fois pour chaque angle de pelage. Grâce au capteur de force du dispositif expérimental, on enregistre l'évolution de la force de pelage en fonction du déplacement de la traverse. Sur la figure 2 on présente la réponse force-déplacement pour un essai à 90° grâce au capteur de force du dispositif expérimental. On observe deux parties : il y a une première étape où le film se met en place suivie d'une deuxième étape lorsqu'on atteint le régime stationnaire. Dans cette phase, une force constante est enregistrée tout au long du pelage.



**Fig.3** : Visualisation de la zone de décohésion avec mesure du rayon de courbure.



**Fig.4** : Modèle Eléments Finis développé pour la simulation du test de pelage

Pour déterminer expérimentalement l'énergie de décohésion entre le cuivre et le substrat (composite), le rayon de courbure du film de cuivre pour chaque angle de pelage donné est mesuré à l'aide d'une caméra haute résolution équipée d'objectifs macro. Des images de la courbure sont prises et enregistrées automatiquement lors de l'essai de pelage. La figure 3 montre la zone de décohésion avec ajustement d'un cercle à la racine du film courbé pour chaque angle de pelage. Le rayon de courbure du film peut alors être obtenu.

### **3. Modèle Numérique**

Pour simuler le test de pelage, un modèle numérique par éléments finis (ABAQUS / standard) en 2D a été développé pour un film d'épaisseur 35 $\mu$ m. La géométrie et les conditions aux limites du modèle numérique sont illustrées sur la figure 4. Une étude de convergence au maillage a été conduite. Pour un essai à 90°, un maillage avec 9 et 18 éléments dans l'épaisseur donne des résultats indépendants de celui-ci. L'interface entre le film de cuivre et le substrat (composite) a été modélisée par les éléments cohésifs avec une loi de traction-séparation, disponible sous ABAQUS. La réponse des éléments cohésifs est régie par l'initiation et la propagation du délaminage. Le critère d'initiation est quadratique comme présenté en Eq (1). Le critère de propagation adopté se met sous la forme d'une loi linéaire Eq (2). Au travers de ces deux lois, un couplage entre le mode normal et le mode tangentiel opère.

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{n,c}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{t,c}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$\frac{G_n}{G_{n,c}} + \frac{G_t}{G_{t,c}} = 1 \quad (2)$$

où,  $G_{n,c}$  et  $G_{t,c}$  sont les énergies de décohésion critiques pour les modes de traction et cisaillement.  $\sigma_{n,c}$  et  $\sigma_{t,c}$  sont les contraintes critiques en traction et en cisaillement. Comme dans la littérature (voir par exemple Martiny et al [8]), on adopte :  $G_{n,c}=G_{t,c}$  et  $\sigma_{n,c} = \sigma_{t,c}$ .

#### **4. Théorie sur le pelage**

Dans notre étude, la plasticité joue un rôle fondamental dans le processus de pelage. Comme dans la littérature, un bilan énergétique permet de relier le travail des forces extérieurs  $dW_{ext}$  à l'énergie d'interface  $dU_s$ , l'énergie élastique stockée dans le film  $dU_{el}$  et l'énergie dissipée plastiquement lors du pelage  $dU_p$ .

$$dW_{ext} = dU_{el} + dU_s + dU_p \quad (3)$$

avec :

$$dW_{ext} = F(1 - \cos \theta)\Delta l \quad (4)$$

$$dU_{el} = \frac{F^2}{2Ebh} \Delta l \quad (5)$$

$$dU_s = bG_c \Delta l \quad (6)$$

En termes de géométrie,  $b$ ,  $h$ ,  $E$  et  $\theta$  sont respectivement la largeur, l'épaisseur du film mince, le module d'Young et l'angle de pelage. Dans notre étude,  $b=10$  mm,  $h=35$  microns. L'énergie élastique du film mince est souvent très faible et même nulle dans le cas où le film est inextensible, donc l'équation (1) peut s'écrire :

$$(1 - \cos \theta)F\Delta l = G_c b \Delta l + dU_p \quad (7)$$

On aboutit à la relation proposé dans Aravas et al. [9]

$$G_c = (1 - \cos \theta) \frac{F}{b} - \varphi \quad (8)$$

Où

$$\varphi = \frac{1}{b} \cdot \frac{dU_p}{\Delta l} \quad (9)$$

Pour un matériau parfaitement plastique (voir Aravas et al [9]), l'énergie dissipée plastiquement vaut :

$$\varphi = \frac{3F}{\eta} \left( 2k_B - 5 + \frac{10}{3k_B} \right) \quad (10)$$

$$\eta = \frac{6EF}{h\sigma_0^2 b} \quad (11)$$

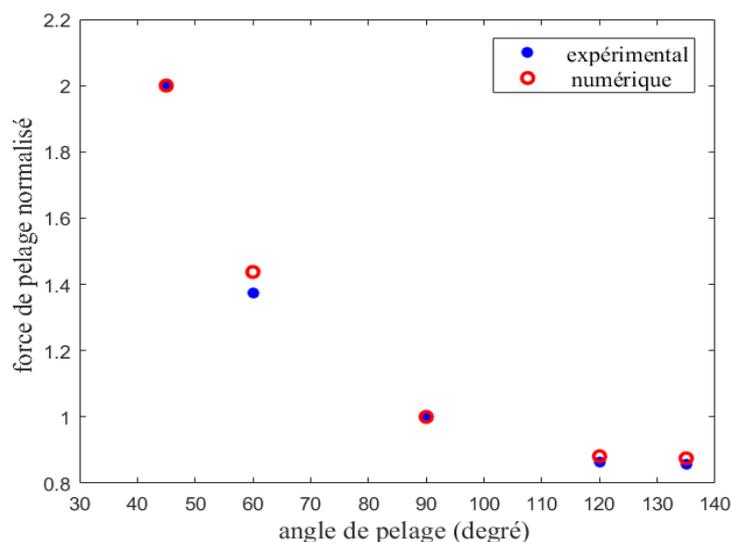
$$K_e = \frac{\sqrt{3}\sigma_0}{Eh} \quad (12)$$

$$k_B = \frac{K_B}{K_e} \quad (13)$$

où  $\eta$  est la force de pelage adimensionnelle,  $K_e$  la courbure limite pour laquelle le film reste entièrement élastique. La courbure du film  $K_B = \frac{1}{R_C}$  est issue de la mesure expérimentale (voir Fig. 3).  $k_B$  représente la courbure adimensionnelle et  $\sigma_0$  la limite d'élasticité du film de cuivre (ici approche parfaitement plastique).

## 5. Résultats et discussion

Les forces de pelage et les rayons de courbure pour les angles 45°, 60°, 90°, 120° et 135° ont été mesurés. Au moins trois tests ont été réalisés pour chaque angle afin d'obtenir des résultats fiables voir figure 2. Il a été remarqué expérimentalement et numériquement dans ce travail que la force de pelage diminue lorsque l'angle de pelage augmente, ce qui est en accord avec des travaux précédents [10-11]. Dans le cas de pelage du film mince de cuivre sur un substrat en composite, il est essentiel de tenir compte de la flexion et de la déflexion du film de cuivre pour déterminer les propriétés de l'interface. A partir de la force de pelage et du rayon de courbure déterminés à chaque angle de pelage, les paramètres de la loi cohésive ont pu être obtenus. La figure 5 montre que les forces de pelage simulées par éléments finis concordent bien avec les résultats expérimentaux.



**Fig.5** Force de pelage normalisée en fonction de l'angle. Comparaison entre expérience et simulation.

## **6. Conclusion**

Des tests de pelage ont été réalisés pour mesurer les forces de pelage et les rayons de courbure à différents angles afin de définir les propriétés adhésives entre le cuivre et le substrat (composite). Une simulation par éléments finis du processus de pelage a été réalisée en utilisant des éléments cohésifs entre le film de cuivre et le substrat (composite) pour représenter l'interface. On a montré qu'il y a un bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques en termes de force de pelage.

**Remerciement** : Les auteurs remercient le soutien de l'ANR via le programme Labcom ANR-14-LAB7-0003-01 et la création du Labcom LEMCI. La recherche conduite dans le cadre de cette thèse a reçu le soutien financier du programme européen ITN H2020 (European Union's Horizon2020 Programme, Excellent Science, Marie-Sklodowska-Curie Actions) sous le numéro d'agrément : REA grant agreement 675602 (OUTCOME Project).

## **Références**

- [1] J. Venables. Adhesion and durability of metal-polymer bonds. *J Mater Sci*; 19 (1984): 2431–53.
- [2] I. Mathieson, R. Bradley. Improved adhesion to polymers by UV/ozone surface oxidation. *Int J Adhes Adhes*; 16 (1996): 29–31.
- [3] J. G. Spies. The peeling test on re-bonded joints. *J. Aircraft Engng* 25, (1953) 64.
- [4] R.S. Rivlin. The effective work of adhesion. *Paint Technol* 9: (1944) 215–6.
- [5] K. Kendall. Thin film peeling-the elastic term. *J Phys D Appl Phys*; 8: (1975)1449–5.
- [6] K-S. Kim, N. Aravas. Elastoplastic analysis of the peel test. *Int. J. Solids Struct*, 24 (1988) 417-35.
- [7] Y. Wei, J. W. Hutchinson. Interface strength, work of adhesion and plasticity in the peel test. *Int. J. Fracture* 93, (1998) 315–333.
- [8] Ph. Martiny, F. Lani, A.J. Kinloch, T. Pardoën, "Numerical analysis of the energy contributions in peel tests: a steady-state multilevel finite element approach," *Int. J. Adhes* 28, pp. 222-236, 2008.
- [9] N. Aravas, K-S. Kim, M.J. Loukis. On the mechanics of adhesion testing of flexible films. *Materials science and Engineering A* 107 (1989) 159-168.
- [10] J. A. Williams, J.J. Kauzlarich: The influence of peel angle on the mechanics of peeling flexible adherends with arbitrary load–extension characteristics. *Tribology International* 38 (2005) 951–958.
- [11] A. Molinari, G. Ravichandran. Peeling of elastic tapes: effects of large deformations, pre-straining, and of a peel-zone model. *J Adhes*; 84 (2008) 961–95.