

Mesure des épaisseurs de peinture sur matériaux composites

Capacitive measurement of paint thickness on composite materials

L. BOYER, M. WEBER & H. TRÉTOU (Dassault Aviation), D. ROZIERE (FOGALE Nanotech)

Résumé : Le contrôle des épaisseurs de peinture de pièces en matériaux composites essentiellement à base de fibres de carbone reste une problématique critique pour les constructeurs aéronautiques qui ont un besoin urgent d'un appareil portable pour cette mesure que les méthodes traditionnelles ne permettent pas. En effet des épaisseurs de peinture trop importantes ont trois conséquences très pénalisantes, le surpoids, la résistance à la foudre et la mauvaise transparence des radomes d'antennes. Un prototype a été développé par la société Fogale Nanotech en collaboration avec Dassault Aviation et de nombreux essais ont permis sa mise au point. Le principe de fonctionnement est basé sur une mesure capacitive entre le capteur et le support à base de fibres de carbone ou pour les pièces critiques une couche de métallisation sous la forme d'un grillage de bronze. La capacité mesurée est convertie en épaisseur et affichée sur un écran en μm . La mesure des épaisseurs sur des substrats métalliques, aluminium et titane est aussi applicable.

Abstract: *The measurement of paint thickness on composite materials is a relevant challenge. The aircraft manufacturers are interested in this measurement for thunder related behaviour of the plane structures. As well known, a structure too well insulated would not play the role of a lightning conductor and is therefore dangerous for the plane. For civil aircraft, the outside appearance has to be irreproachable and painting thickness may sometimes overpass the safety threshold. Thus, despite the metallic grid layered on the composite part, the thickness of the paint has to be precisely evaluated and kept under given brackets to ensure the plane safety. The Paintscope developed by Fogale Nanotech in partnership with Dassault Aviation, is based on a capacitive measurement. Several types of probes were tested; the measurements on representative samples have been confronted to destructive testing (micrograph) in order to correlate the data provided by the developed prototype and the real painting thickness. The "Paintscope" has a strong potential to be applied to the measurement of paint thickness on metallic substrates such as aluminium and titanium.*

INTRODUCTION

Une des problématiques des constructeurs aéronautiques est la mesure des épaisseurs de peinture sur les matériaux composites. Si cette mesure est relativement aisée et précise sur des structures métalliques par ultrasons hautes fréquences, par induction magnétique ou par courants de Foucault, celle-ci n'a pas encore été résolue de manière suffisamment simple (contrôle sur pièce ou avion en service) avec les méthodes traditionnelles pour les matériaux composites à base de fibres de carbone et de résine époxyde. Une solution semble encore plus lointaine pour les matériaux composites complètement diélectriques tels ceux à base de fibres de verre ou de Kevlar, pour lesquels à priori seules des mesures hyperfréquences pourraient apporter une solution. Les développements menés depuis 2001 par la société

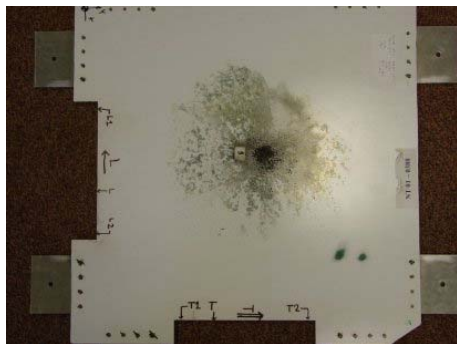
Fogale Nanotech¹ spécialiste de la mesure capacitive ont abouti avec la coopération de Dassault Aviation à la réalisation d'un appareil portable appelé « le Paintscope ». Le principe de la mesure et les résultats de l'étude expérimentale sont présentés.

PROBLEMATIQUE

Afin de protéger, de résorber les imperfections d'état de surface et d'obtenir un bon aspect sur le plan esthétique et/ou fonctionnel, les avions civils de type jet d'affaire reçoivent plusieurs couches de peinture allant d'une dizaine de microns pour le primaire qui permet un bon accrochage des peintures de finition, à plus de 200 microns après finition.

Pour trois raisons principales l'épaisseur finale de la peinture par rapport au substrat en matériau composite est critique :

- à contrario des matériaux métalliques la résistance à la foudre d'un matériau composite est directement fonction de cette épaisseur de peinture, voir Figures 1 à 5. Une épaisseur trop élevée rend la structure trop isolante et ne permet pas l'écoulement des charges électriques, entraînant des endommagements importants,
- une épaisseur trop élevée sur les différentes antennes ne permet pas une transmission optimale des ondes radios et perturbent les communications,
- une épaisseur trop élevée ajoute une masse supplémentaire pénalisante.



Figures 1 et 2 - Foudre simulée sur une pièce en matériau composite avec 60 microns d'épaisseur de peinture, à gauche face foudroyée, à droite face opposée saine.



Figures 3, 4 et 5 - Foudre simulée sur une pièce en matériau composite avec plus de 300 microns d'épaisseur de peinture, à gauche face foudroyée, au centre face opposée endommagée, à droite agrandissement de l'endommagement de types multi-délaminages et perforation.

¹ Fogale Nanotech : Nimes , France

Tout en contrôlant l'épaisseur de chaque couche déposée, le peintre doit s'assurer que l'épaisseur finale ne dépasse pas une valeur limite, plus ou moins 10 microns. Cette opération manuelle de peinture déjà lourde peut alors se compliquer avec des actions supplémentaires de ponçage. Un des moyens actuellement mise en œuvre consiste à disposer des pastilles d'épargne auto-adhésives avant toute opération de peinture et d'effectuer la mesure par comparateur après retrait des pastilles. Un autre moyen étant soit de percer un petit trou ou de réaliser des rayures calibrées et d'effectuer des mesures optiques à l'aide d'un microscope portable, avant de procéder à des retouches de peinture. Ces procédures ne peuvent pas être généralisées à toute la surface et tout en étant fastidieuses ne garantissent pas l'homogénéité de l'épaisseur de la peinture.

PAINTSCOPE

Principe de la mesure

Le principe de fonctionnement est basé sur une mesure capacitive : la valeur de la capacité électrique créée entre le capteur et le support composite carbone ou le grillage de bronze dépend de la distance qui les sépare et de la permittivité relative du revêtement (voir Figure 6). Cette capacité est mesurée et convertie en valeur d'épaisseur, affichée sur l'écran après lui avoir fait subir un traitement numérique de type linéarisation d'ordre 2.

Caractéristiques principales :

- Plage de mesure : 0 -2000 μm ,
- Résolution : $\pm 1 \mu\text{m}$
- Précision : $\pm 10 \mu\text{m}$

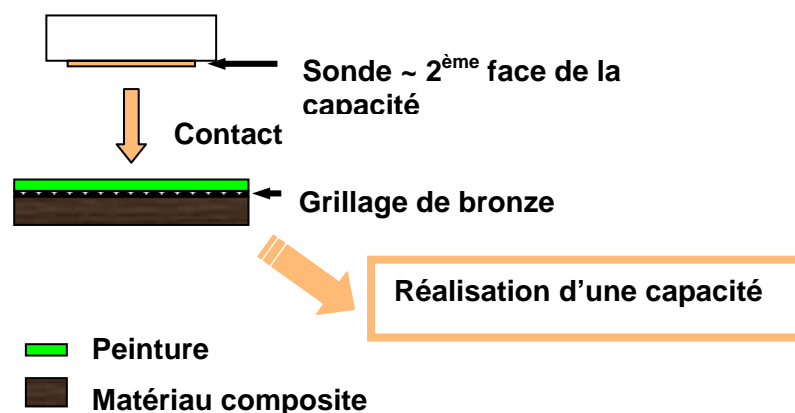


Figure 6 – Principe de la mesure capacitive d'épaisseur de peinture.

Description de l'appareil

Le Paintscope est un appareil portable qui comprend un module de conditionnement capacitif offrant une voie de mesure, une interface à micro-contrôleur pour traiter l'information intégré dans un clavier à touches avec écran, une fiche de masse qui est nécessaire pour un travail sur pièce séparée ou éprouvette et une liaison RS 232 qui permet le transfert des données stockées (voir Figure 7).

La sonde comprend une électrode constituée d'un matériau optimisé et conducteur d'électricité qui est de plus montée sur un ressort pour assurer la pression de maintien pendant la mesure. L'électrode est entourée d'un isolant et d'un guide maintenant les lignes de champs perpendiculaires à la pièce (voir Figure 8).



Figure 7 – Paintscope avec sonde et fil de masse.



Figure 8 – Sonde

ETUDE EXPERIMENTALE

Cales de référence

Plusieurs cales du type présenté en Figure 9 ont été réalisées en fonction des différentes peintures appliquées sur les avions civils et militaires. Ces cales présentent des zones pour la mesure mécanique décrite ci-après et des micrographies.

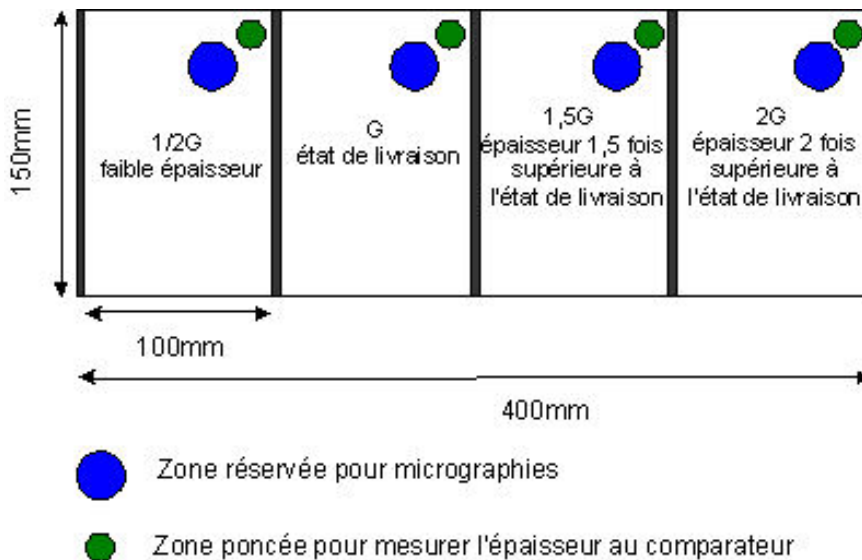


Figure 9 : Cale CR76

La cale ci-dessus est représentative d'un empennage de Falcon. Un grillage de bronze couvre le composite. La peinture est déposée sur ce grillage de bronze de façon à obtenir quatre zones d'épaisseurs différentes telles que définies sur la Figure 9, G étant l'épaisseur nominale.

Deux autres cales de ce type ont été réalisées et utilisées, la cale CR77 avec une gamme d'épaisseurs de peinture beaucoup plus importantes et la cale CR78 représentative de la

gamme de peinture des avions militaires. La cale CR78 a été divisée en deux parties : avec et sans grillage métallique.

Mesures actuelles au comparateur sur trépied

Une région circulaire de 15mm de diamètre a été préservée de toute peinture sur chacune des zones de la cale. La mesure au comparateur se fait en réglant le zéro sur ces régions.



Figure 10 : Mesure d'épaisseur mécanique au comparateur

Compte tenue des variations d'épaisseur pour une même zone, le tableau 1 ci-dessous donne une fourchette des résultats obtenus qui montrent la difficulté d'obtenir les épaisseurs désirées.

Gamme	1/2G	G	1,5G	2G
Épaisseur de peinture CR76	40µm - 50µm	60µm - 70µm	70µm - 85µm	90µm - 105µm
Épaisseur de peinture CR77	195µm - 205µm	265µm - 275µm	340µm - 350µm	370µm - 380µm
Épaisseur de peinture CR78	30µm - 50µm	80µm - 90µm	130µm - 140µm	190µm - 200µm

Tableau 1: Mesures d'épaisseur au comparateur

Mesures au PaintScope

L'électrode étant montée sur un ressort, la mesure nécessite une légère pression sur la sonde, voir Figure 10.

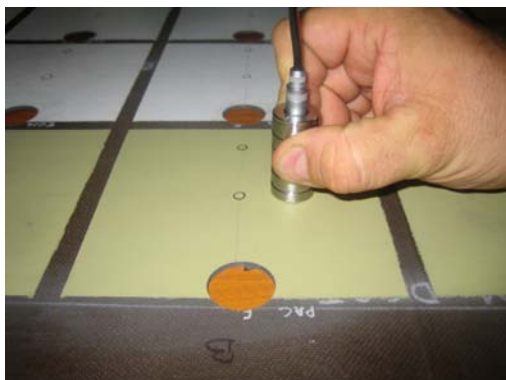


Figure 10 : Mesure avec la sonde du Paintscope

Le calibrage de l'appareil doit s'effectuer sur deux points représentatifs des valeurs mini et maxi à mesurer. Ces deux points ont logiquement été pris au centre des premières et dernières marches pour chaque cale. Les valeurs saisies pour le calibrage sont déterminées suite aux mesures réalisées à l'aide du comparateur voir tableau 2:

Cale	CR76	CR77	CR78
Première marche	45 µm	200 µm	40 µm
Dernière marche	100 µm	380 µm	200 µm

Tableau 2: Cale CR76 - Relevé cartographique des épaisseurs de peinture

Relevé cartographique des épaisseurs

Un relevé cartographique des épaisseurs de peinture a été dressé pour chacune des quatre zones de la cale CR 76, il est présenté dans le tableau 3.

Épaisseur de peinture (µm)	1/2G					G					1,5G					2G				
	48	43	48	*	51	63	67	66	*	68	66	66	67	*	62	88	85	75	*	66
64	48	60	*	49	70	70	73	*	70	79	76	78	*	84	90	90	10 1	*	97	
40	50	50	50	50	73	65	68	70	57	74	84	85	82	81	97	91	92	10 8	98	
53	47	41	43	55	72	65	73	64	67	73	86	86	80	75	10 2	10 2	10 0	10 5	91	
52	49	49	44	50	59	74	68	59	66	79	82	83	88	83	10 9	92	90	10 0	97	
45	40	39	47	42	50	51	57	55	59	72	74	70	62	72	96	10 8	94	10 2	10 2	
Moyenne = 48					Moyenne = 65					Moyenne = 77					Moyenne = 95					
Écart-type = 5,7 (12%)					Écart-type = 6,7 (10,4%)					Écart-type = 7,5 (9,8%)					Écart-type = 9,5 (10%)					
Écart absolu = 20µm					Écart absolu = 21µm					Écart absolu = 20µm					Écart absolu = 33µm					

* Zone sans peinture pour mesures au comparateur

xx Valeurs extrêmes

xx Valeurs min et max (hors valeurs extrêmes) pour détermination de l'écart absolu

Tableau 3 : Cale CR76 - Relevé cartographique des épaisseurs de peinture

Reproductibilité et linéarité des mesures

Des essais de reproductibilité ont été effectués. Pour cela, trente mesures successives ont été effectuées en un même point au centre de chaque zone (voir Tableau 4).

	1/2G					G					1,5G					2G				
Epaisseur de peinture (µm)	41	42	46	44	48	63	67	67	65	67	79	81	79	78	77	92	95	93	96	95
	44	41	48	45	47	67	68	66	69	68	79	79	78	84	83	96	94	95	93	90
	45	51	46	46	49	66	64	63	63	63	76	79	79	82	83	91	94	98	94	92
	44	47	46	43	49	64	65	68	64	66	79	85	85	86	75	97	96	96	93	91
	44	52	48	49	50	60	57	63	61	58	72	83	77	87	84	95	99	97	95	97
	44	48	40	44	40	61	65	65	69	66	84	83	80	80	83	94	93	93	90	95
	Moyenne = 46					Moyenne = 65					Moyenne = 81					Moyenne = 94				
	Écart-type = 3,2 (6,9%)					Écart-type = 3 (4,7%)					Écart-type = 3,5 (4,4%)					Écart-type = 2,3 (2,4%)				
	Écart absolu = 10µm					Écart absolu = 10µm					Écart absolu = 11µm					Écart absolu = 7µm				



Valeurs extrêmes



Valeurs min et max (hors valeurs extrême) pour détermination de l'écart absolu

Tableau 4 : Cale CR76 - Reproductibilité des mesures

La Figure 11 ci-dessous montre pour un autre type de cale et une première version du prototype la linéarité de la mesure et les écarts types obtenus sur une grande plage d'épaisseurs, une moins bonne précision aux faibles épaisseurs était alors obtenus.

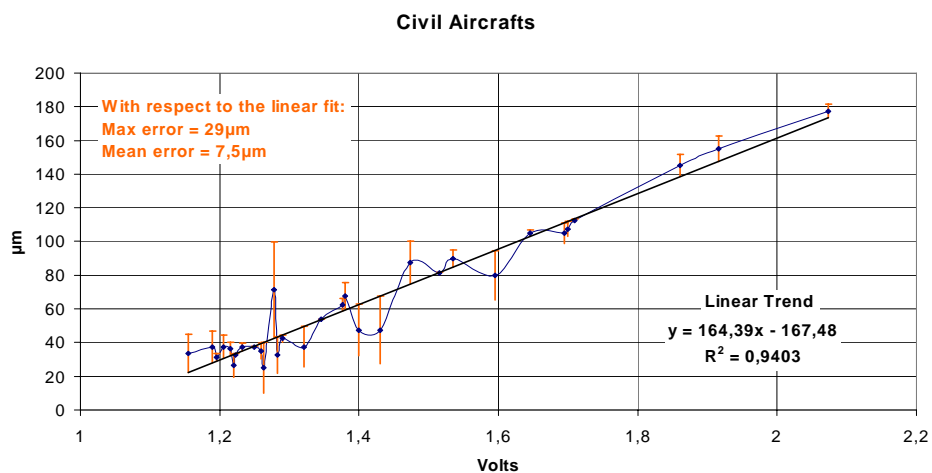


Figure 11 : Mesure avec le Paintscope

DISCUSSION

Les mesures relevées à l'aide du PaintScope sont cohérentes et en adéquation avec les mesures obtenues à l'aide du comparateur, procédé actuellement utilisé sur un nombre de points limités en sortie d'atelier de peinture. De plus, la reproductibilité des mesures est satisfaisante (de l'ordre de 10µm) et relativement fiable pour les épaisseurs de peintures considérées de 40 à 200µm. Les mesures seront donc d'autant plus précises que le calibrage sera effectué en des points dont les valeurs seront bien identifiées.

Il est important de souligner que les cales de référence réalisées et utilisées permettent d'avoir une épaisseur de résine sur le grillage métallique constante par rapport aux

premières fibres. La dispersion est donc représentative des variations d'épaisseur de peinture (voir micrographies Figure 12).

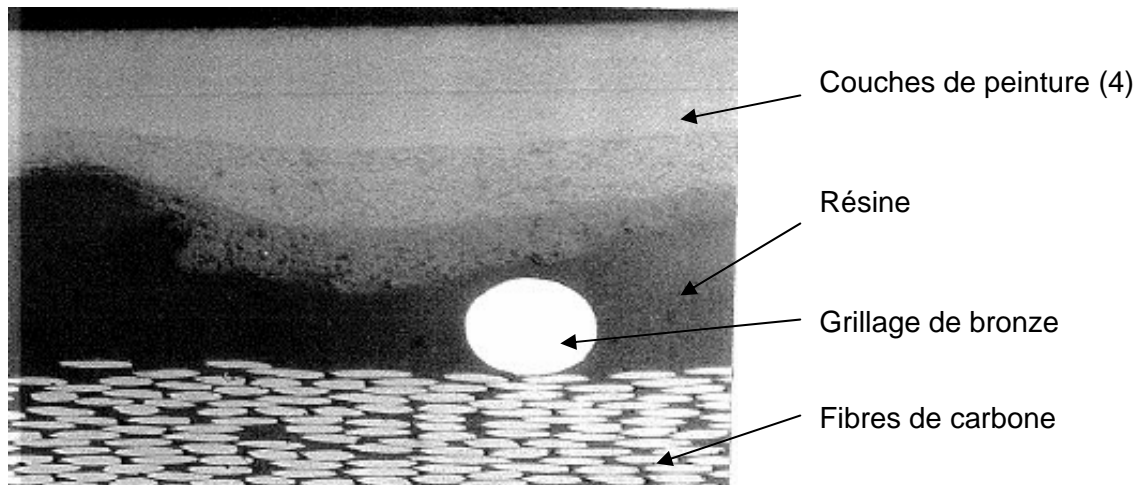


Figure 12 Micrographies d'une pièce composite métallisée et peinte

Une prise de masse est nécessaire sur éprouvettes ou pièces de petites dimensions, sur avion la mesure ne nécessite pas de prise de masse supplémentaire.

Les essais sur la cale CR78 ont montré la possibilité de mesurer l'épaisseur de peinture sur des pièces n'ayant pas de grillage de bronze avec la même fiabilité et précision.

Les mesures comparatives ont montré que le Paintscope propose une alternative bien plus réaliste et fiable que la mesure mécanique car la mesure prend en compte l'épaisseur réelle du composé diélectrique (résine plus peinture) en chaque point ce qui est difficilement réalisable avec la procédure actuelle qui ne peut pas être totalement représentative. Cela impose du soin pour confronter ces valeurs aux critères établis à partir de mesures « crêtes » obtenues par les moyens mécaniques.

CONCLUSION

Les bons résultats obtenus permettent d'envisager l'industrialisation et la commercialisation de cet équipement qui offre la seule solution validée pour la mesure des épaisseurs de peinture sur matériaux composite à base de fibres de carbone avec ou sans métallisation.

La mesure capacitive propose une alternative aux moyens actuels, qui est facile d'emploi, précise, et souple et qui devrait libérer les avionneurs et les autres fabricants de structures à partir de matériaux composites (éoliennes, bateaux,...) d'une contrainte importante vis-à-vis de la foudre. La rapidité de la mesure permet aussi d'effectuer autant de points que nécessaire.

Les capacités de l'appareil permettent de s'étalonner pour des peintures de permittivité différente et sur une grande gamme d'épaisseurs, la mesure des épaisseurs sur des substrats métalliques, aluminium et titane est aussi applicable.