
Mesure de l'épaisseur des parois métalliques épaisses par la méthode des courants de Foucault

1 Introduction

Pour la mesure des épaisseurs métalliques, les méthodes de contrôle non destructif par courants de Foucault et par ultrasons constituent un binôme parfaitement complémentaire. Quand les ultrasons sont surtout efficaces pour les fortes épaisseurs et deviennent imprécis pour les faibles épaisseurs, c'est l'inverse pour les courants de Foucault. Ces derniers sont surtout utilisables pour les faibles épaisseurs ou le contrôle de surface.

Ceci est dû au fait qu'à faibles épaisseurs, l'écho ultrasonore revient tellement vite que le temps de parcours du son est difficilement à mesurer avec précision. Par contre, quand l'épaisseur de la paroi métallique est importante, le champ magnétique d'une sonde à courants de Foucault s'épanouit avant de pouvoir traverser cette paroi.

Malheureusement, il existe en pratique des situations où ces deux méthodes se trouvent toutes les deux sur leurs points faibles : il s'agit du cas des parois de grandes épaisseurs avec une surface rugueuse ou cachées sous une couche de peinture, de revêtement ou d'emballage. Les ultrasons y sont inutilisables car le faisceau émis est fortement dispersé ou revient avec de multiples échos. Pour les courants de Foucault, l'important lift-off engendré par la rugosité ou la couche de protection crée une erreur de mesure parfois rédhibitoire.



Figure 1. Une surface rugueuse

Les courants de Foucault ont toutefois prendre un avantage : 1) l'épaisseur mesurée correspond au volume du métal disponible, elle est donc moins perturbée par la présence de grains superficiels, contrairement à la mesure par palpeurs avec contacts et 2) si le signal est correctement traité, l'épaisseur sera correctement mesurée, malgré les difficultés citées plus haut.

Cette note d'application explique comment on peut améliorer la précision de la mesure de l'épaisseur d'une paroi épaisse avec la méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault.

2 A propos de la mesure de l'épaisseur d'une paroi

La mesure de l'épaisseur d'une paroi a souvent pour but de vérifier la conformité d'une structure ou celle d'un produit neuf en sortie de la fabrication. La paroi à examiner peut faire partie d'une structure très large ou fermée ce qui empêche l'inspection à l'aide d'un palpeur à contacts.

2.1 Difficulté liée à l'état de surface

Comme exposé plus haut, lorsque la surface de la paroi examinée est sous peinture ou protection, ou bien elle est très rugueuse, la méthode ultrasons ne fournit pas de résultats suffisamment fiables.

De même, la méthode des courants de Foucault classique rencontre également beaucoup de difficultés lorsque la sonde doit rester éloignée de la surface inspectée. La sensibilité vis à vis du lift-off (l'entrefer) est bien supérieure à la sensibilité vis à vis de l'épaisseur. Une variation de l'épaisseur est très souvent noyée dans le bruit de lift-off.

2.2 Problème d'étalonnage

Les méthodes de contrôle non destructif, qu'elles soient ultrasonique ou à courants de Foucault, nécessitent un étalonnage préalable de l'instrument de mesure. Ceci consiste à faire des mesures sur des épaisseurs connues afin d'établir la fonction de transfert qui permet de calculer l'épaisseur à partir des signaux obtenus par la sonde.

Pour la méthode des courants de Foucault classique, l'étalonnage doit s'effectuer sur des cales étalons de matière identique à celle de la pièce à inspecter. Si la pièce à inspecter est incurvée, il faudra que les cales étalons aient la même courbure également. La fabrication de ces cales étalons ne sera donc pas facile.

Si la pièce à inspecter est une structure qui existe depuis plusieurs années et sa matière n'est pas bien documentée, il est également très difficile de faire des cales de matière identique.

2.3 Difficulté liée à l'homogénéité de la pièce inspectée

Le métal de la paroi inspectée peut ne pas être homogène sur une grande zone. Des variations locales de la conductivité électrique peuvent exister. Or, ceci a un impact direct sur la valeur de l'épaisseur mesurée.

Avec la fabrication additive (impression 3D), les structures métalliques sont synthétisées par un rayon laser qui fait fondre la poudre métallique. Ce nouveau procédé est particulièrement séduisant car il permet de créer des formes très complexes, impossibles à faire avec l'usinage classique, sans perte de matière première, mais il a aussi ses problèmes : l'évaluation de l'épaisseur de la structure par ultrasons devient très difficile à cause de la présence de grains. Ces grains dispersent les faisceaux ultrasonores et créent de multiples échos. La mesure de l'épaisseur par ultrasons devient alors impossible. Cependant, là où l'ultrason s'arrête, les courants de Foucault circulent encore.

2.4 Solution de Sciorsoria

Sciorsoria utilise une méthode de contrôle non destructif par courants de Foucault améliorée qui s'appuie sur l'acquisition d'impédance multi-fréquences et l'estimation robuste de l'épaisseur réalisée par ordinateur.

L'acquisition de données multi-fréquences permet d'obtenir des informations riches et complémentaires sur la pièce à inspecter. La richesse des informations permet de « détromper » le système face aux variations de plusieurs paramètres en même temps.

La méthode d'estimation robuste utilise les informations multi-fréquences de manière à extraire uniquement l'information sur l'épaisseur sans être influencée par la variation de la largeur de l'entrefer (lift-off), ou par la variation locale de la conductivité électrique.

La solution de Sciorsoria offre l'avantage considérable de pouvoir estimer la *valeur absolue* de l'épaisseur d'une pièce sans étalonnage préalable. Cette possibilité permet d'éviter la phase de

V141010-150209

fabrication des cales étalons, qui est aussi coûteuse que difficile¹. Ceci a été possible grâce à un logiciel que nous avons développé qui permet d'étalonner le système virtuellement sans avoir recours aux cales d'étalonnage.

¹ Une cale étalon avec plusieurs marches reste néanmoins nécessaire afin de vérifier l'exactitude du système de mesure contre toutes dérives ou défauts fonctionnels.

3 Présentation du système ConducSENS™ de Sciensoria

Le système ConducSENS™ de Sciensoria est composé d'une sonde spécialement étudiée pour une application donnée, un impédance analyseur piloté par un ordinateur où le logiciel d'analyse Eddysens™ est installé.

Grâce à notre expertise en matière de conception de sonde, à la souplesse et la précision de l'analyseur d'impédance, et à la puissance du logiciel d'application Eddysens™, ConducSENS™ peut traiter de très nombreuses applications avec une facilité de mise en œuvre exceptionnelle.

Selon la conception de la sonde et de la version associée d'Eddysens™, le système ConducSENS™ peut être dédié à différentes applications particulières.

3.1 Sondes

Il existe une sonde optimale pour une application précise. A titre d'exemple, il y a des sondes suivantes :

- Sonde pour la mesure de dépôt métallique très mince (150 nm)
- Sonde pour la mesure de faibles épaisseurs 0,5 mm – 1,5 mm
- Sonde pour la mesure de fortes épaisseurs (3 mm – 6 mm)
- Sonde pour la mesure de conductivité électrique des métaux
- Sonde pour la mesure de conductivité électrique des composites carbone (CFRP)

3.2 Analyseurs d'impédance

Plusieurs modèles d'analyseur d'impédance de différentes marques sont compatibles avec le logiciel Eddysens™. Parmi les marques les plus connues : Keysight (ex-Agilent et Hewlett-Packard), Hioki.

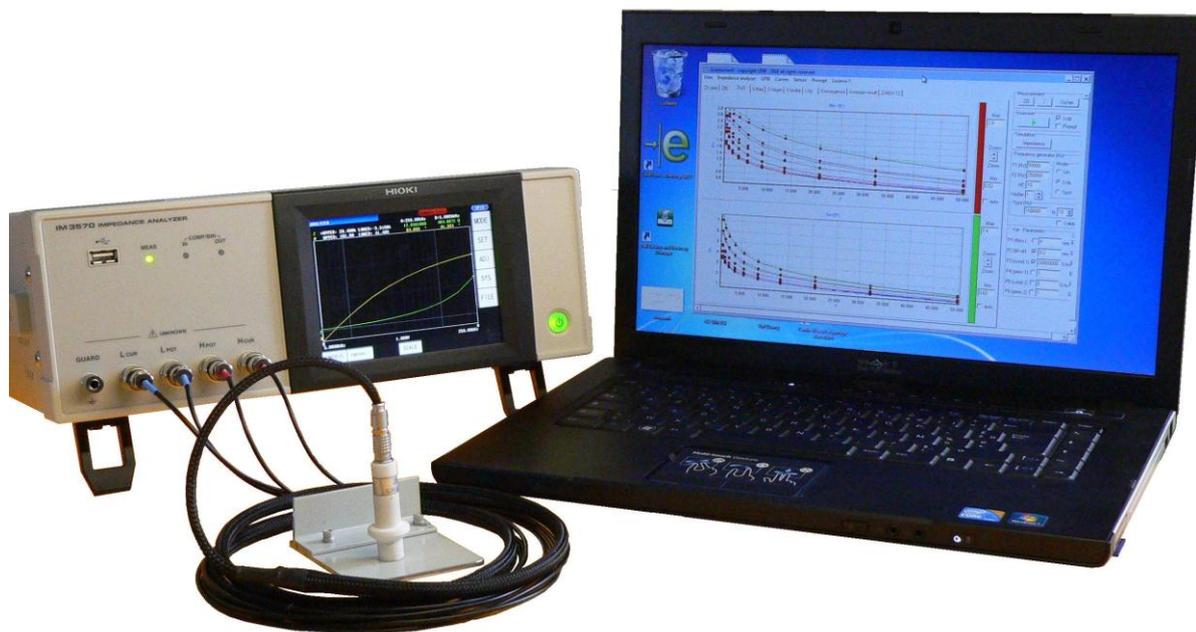


Figure 2. ConducSENS™ utilisant un analyseur d'impédance Hioki IM3570 qui va jusqu'à 5 MHz

3.3 Versions d'Eddysens™

Eddysens™ est optimisé pour chaque application particulière, la version finale comporte un suffixe qui indique l'application à laquelle le logiciel est destiné. Par exemple, Eddysens™-Inconel 4 mm indique que cette version est dédiée à la mesure de l'épaisseur d'inconel ayant une valeur nominale de 4 mm.

4 Etude de cas

4.1 Mesure d'une épaisseur d'alliage aluminium AU4G de 4 mm d'épaisseur nominale

4.1.1 Objet

Cet essai est destiné à démontrer la stabilité de la mesure de l'épaisseur lorsque la sonde n'est pas à une distance stable de la cible (plaque AU4G 4 mm d'épaisseur)



Figure 3a.

L'épaisseur exacte mesurée par un pied-à-coulisse $e=3,9$ mm



Figure 3b.

Insertion des cales afin de simuler une variation du lift-off

4.1.2 Caractéristiques

1. Matière : AU4G (alliage aluminium, conductivité entre 14 MS/m – 20 MS/m)
2. Epaisseur : 3,9 mm
3. Lift-off initiale (liée à la sonde) : 0,12 mm
4. Lift-off ajoutés : de 0 à 0,9 mm

4.1.3 Description de l'essai

Une sonde à courants de Foucault a été utilisée pour mesurer l'épaisseur de la plaque. L'objectif est de mesurer l'épaisseur en valeur absolue (mm), sans étalonnage préalable (mesure à l'aveugle).

Afin de simuler la rugosité de la surface, des cales de 0,1 mm d'épaisseur ont été insérées entre la sonde et la plaque. Jusqu'à 6 cales ont été insérées pendant l'essai.

Ci-dessous, la figure 4 montre les courbes d'impédance normalisée pour différents nombres de cales insérées au cours de la mesure.

ConducSens™ peut mesurer la valeur du lift-off en même temps que l'épaisseur (figures 5, 6). Ceci est très utile : on peut ainsi mesurer l'épaisseur d'une couche de revêtement non conductrice (peinture, emballage) à la surface du métal. On peut aussi savoir si la sonde est correctement installée, car dans le cas contraire le lift-off aurait des valeurs très importantes.

La figure 7 présente la répétabilité de la mesure de l'épaisseur sur 88 mesures, pendant que le lift-off varie de 0,12 mm à 1,04 mm. La valeur moyenne de l'épaisseur obtenue sur 88 mesures est de 3,903 mm.

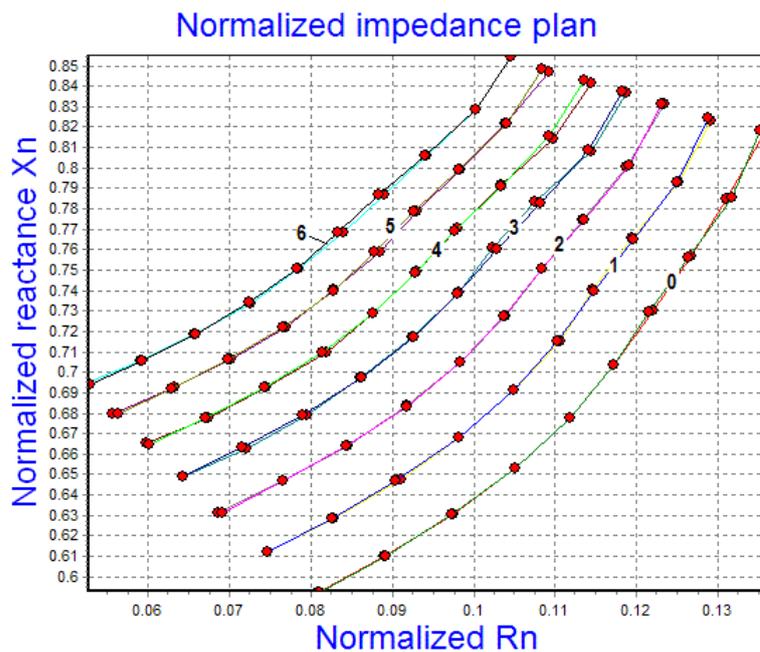


Figure 4. Courbes d'impédance normalisées multi-fréquences obtenues à 7 valeurs du lift-off. Le numéro de chaque courbe correspond au nombre de cales (0,1 mm d'épaisseur) insérées entre la sonde et la plaque

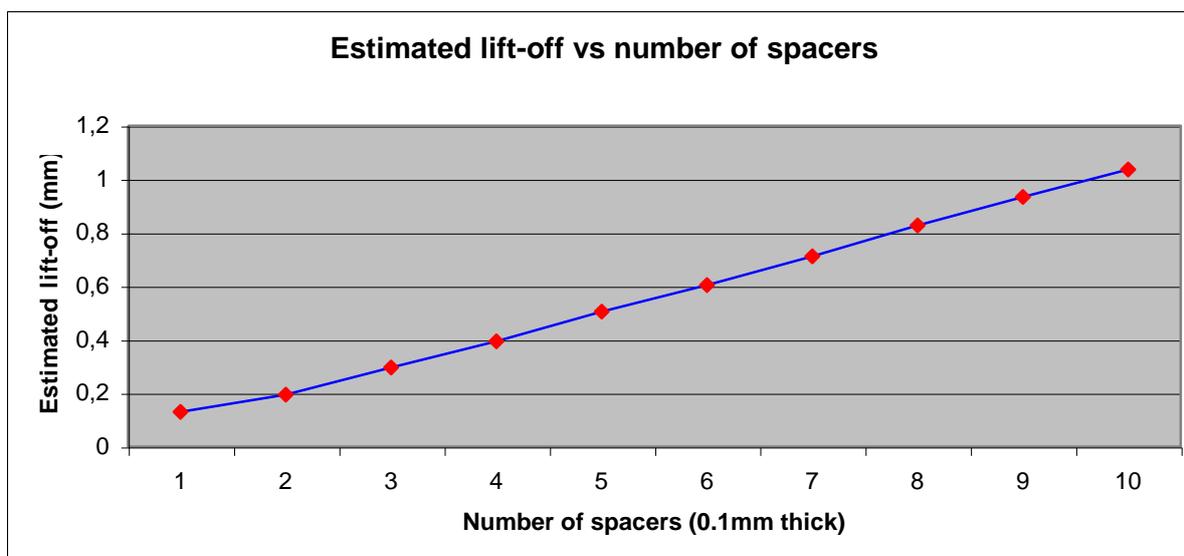


Figure 5. Estimation du lift-off par Conducens™ vs le nombre de cales de 0,1 mm d'épaisseur. Le résultat est quasiment linéaire.

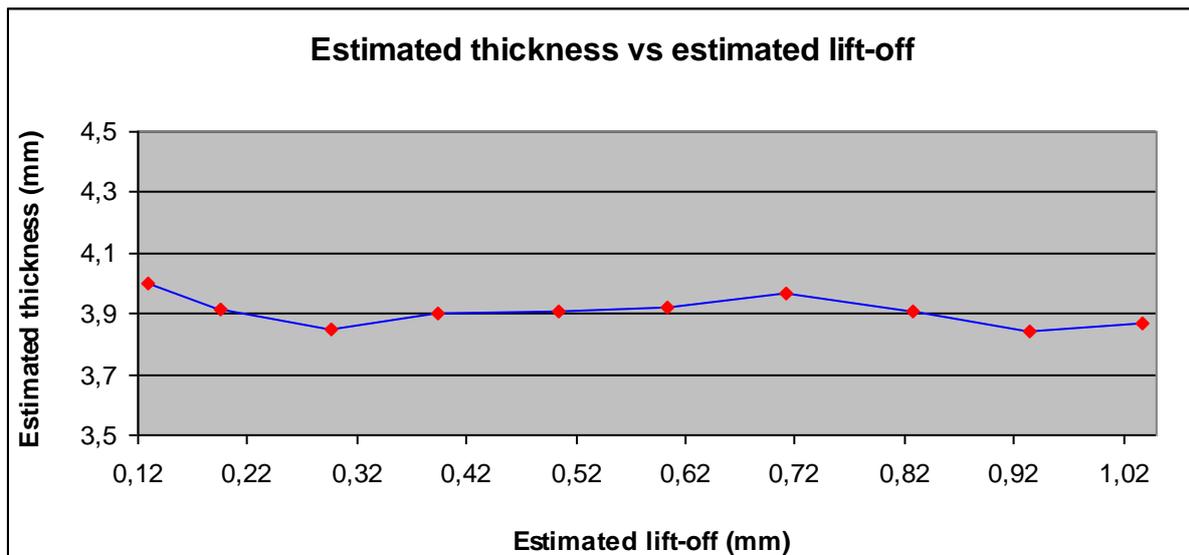


Figure 6. Epaisseur estimée sur lift-off estimé

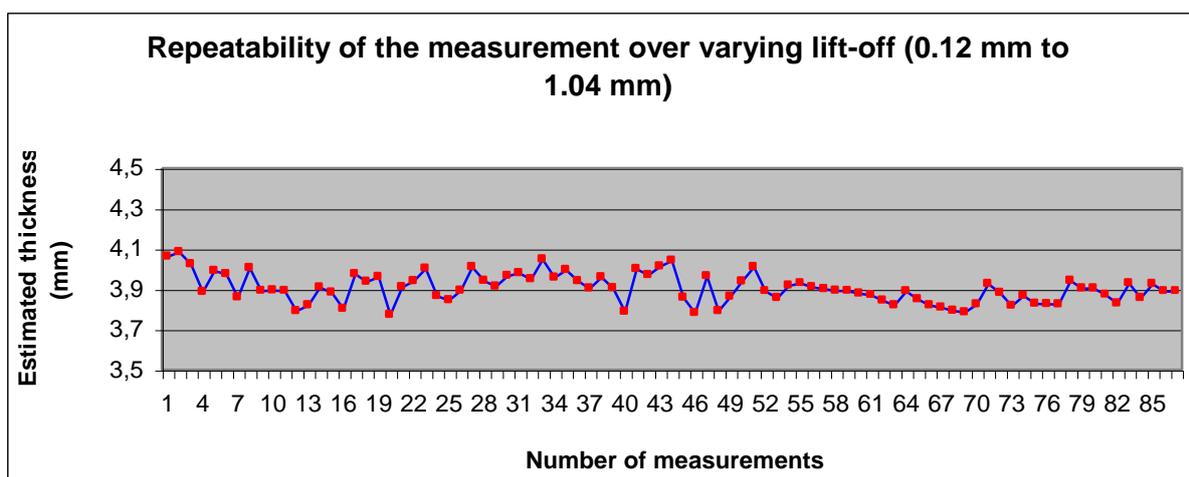


Figure 7. Répétabilité de la mesure de l'épaisseur sur 88 mesures, pendant que le lift-off varie de 0,12 mm à 1,04 mm. La valeur moyenne de l'épaisseur obtenue sur 88 mesures est de 3,903 mm.

4.1.4 Conclusion

Une tentative de mesurer l'épaisseur d'une plaque de 3,9 mm d'épaisseur par courants de Foucault a été réalisée dans les conditions très difficiles :

1. le lift-off varie de 0,1 à plus de 1 mm pendant la mesure
2. le matériau de la cible est très conducteur (AU4G)
3. la conductivité électrique du matériau devait être mesurée en même temps que l'épaisseur

Les résultats de mesure démontrent que le système Conducens™ est capable d'effectuer de telles mesures avec succès.

4.2 Mesure de l'épaisseur d'une coque d'avion en AU4G de 3 mm d'épaisseur nominale



Figure 8a

Plaque en AU4G d'aviation, présentant une légère courbure



Figure 8b

Epaisseur mesurée par un pied-à-coulisse $e=3,0$ mm

4.2.1 Objet

Cet essai est destiné à démontrer l'effet de la courbure sur l'estimation de l'épaisseur. La cible est un morceau de coque d'avion en AU4G, d'épaisseur 3 mm (mesurée par un pied-à-coulisse).

4.2.2 Caractéristiques

1. Matière : AU4G (alliage aluminium, conductivité entre 14 MS/m – 20 MS/m)
2. Epaisseur : 3,0 mm
3. Courbure : légère courbure

4.2.3 Description de l'essai

Une sonde CF a été utilisée pour mesurer l'épaisseur. Les mesures ont été effectuées aussi bien du côté concave (de l'extérieur de la coque d'avion) que du côté convexe (de l'intérieur de la coque d'avion).

Résultats de mesure :

CONVEXE SIDE			CONCAVE SIDE		
Lift-off	Conductivity	Thickness	Lift-off	Conductivity	Thickness
0,29026342	19470870,5	3,00481977	0,28674402	19343578,9	3,02156632
0,29196844	19402350	3,00224587	0,28745697	19298652,4	2,98889418
0,29167689	19504345	3,028311	0,29183448	19413022,5	3,03711352
0,2894139	19357788,6	3,04771559	0,29742319	19372443,1	3,05117988
0,29271808	19478527	3,05095263	0,30013288	19363141,8	3,13557551
0,29527676	19461067,8	3,06184643			

Note :

- Lift-off & thickness are in mm. Conductivity in MS/m

Tableau 1

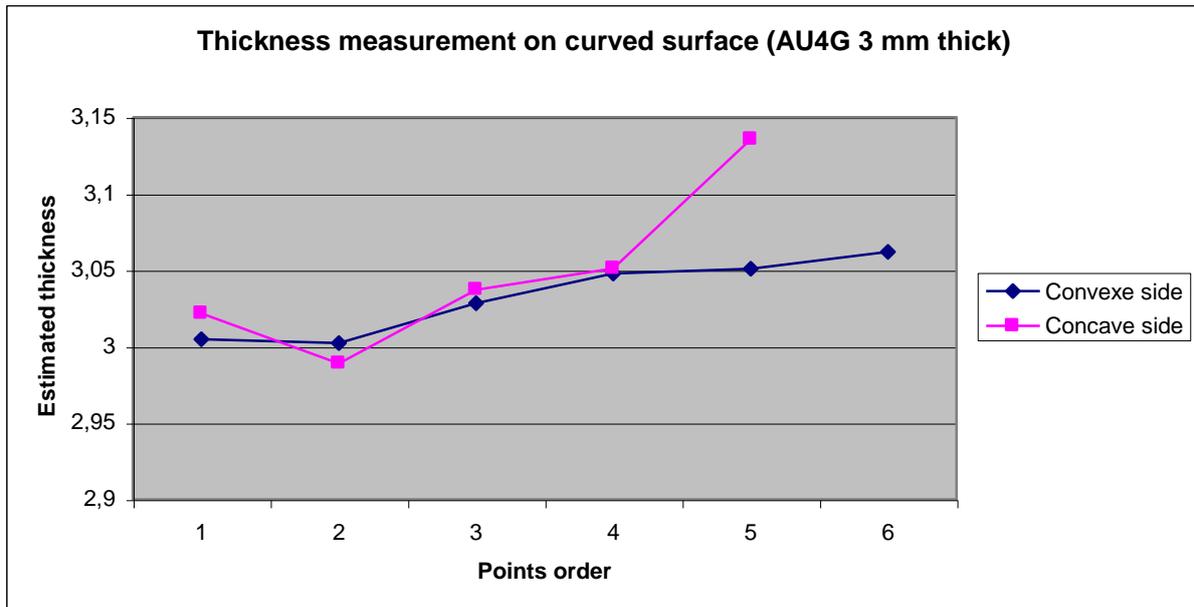


Figure 9. Résultat de mesure d'épaisseur sur les 2 faces de la plaque de coque d'avion

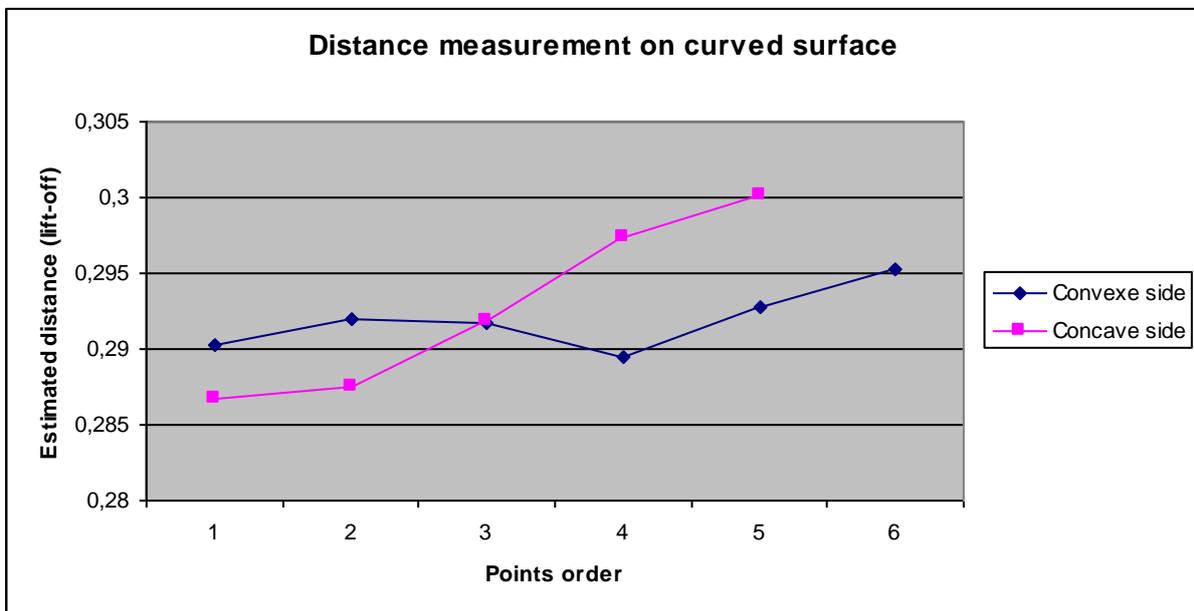


Figure 10. Valeurs du lift-off correspondant aux valeurs d'épaisseur estimée à la figure 8.

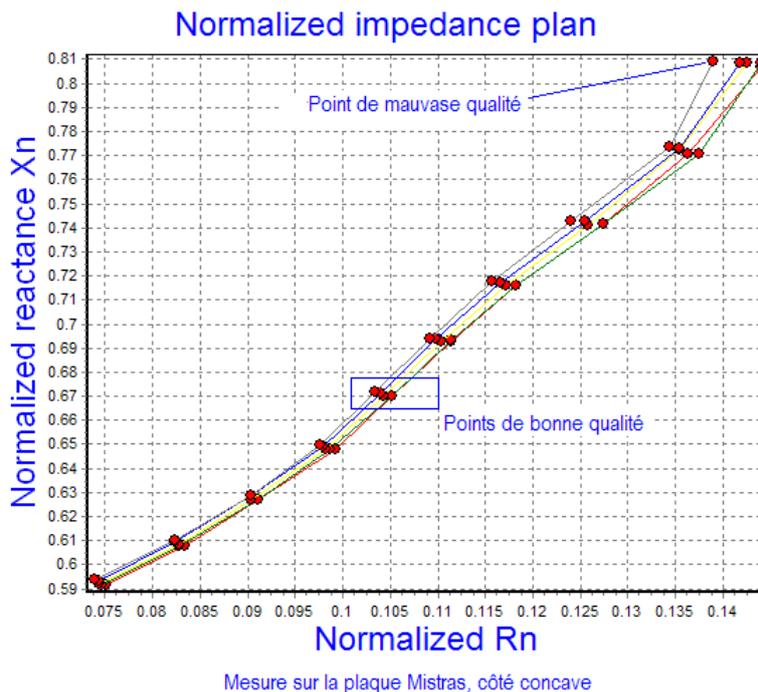


Figure 11a

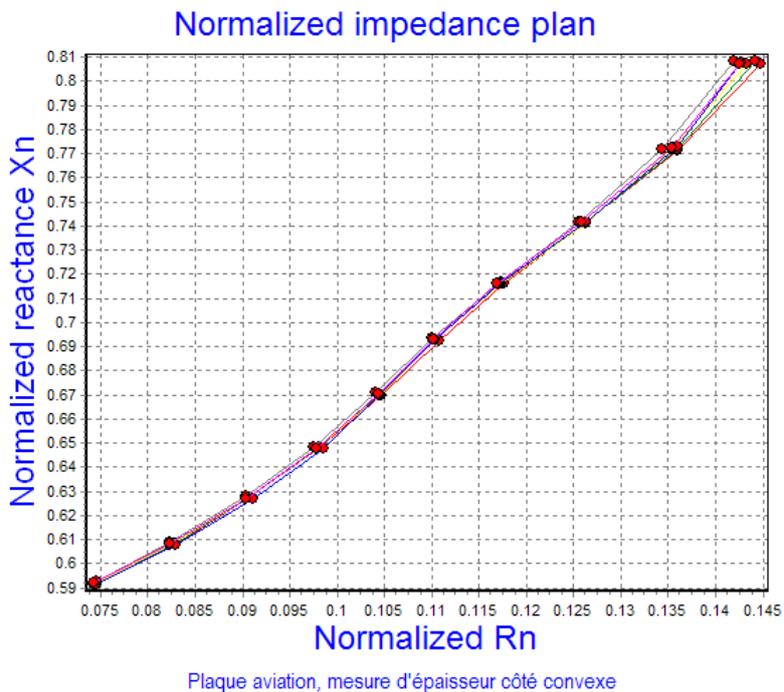


Figure 11b

Figure 11. Courbes d'impédance normalisée obtenues sur le côté concave (a) et convexe (b)

4.2.4 Conclusion

Pour la courbure traitée, la mesure par CF donne quasiment le même résultat sur les 2 faces de la plaque incurvée.

Sur le côté concave (extérieur), la sonde est en moins bon maintien, d'où une dispersion plus grande du lift-off (figure 9). C'est pourquoi l'épaisseur estimée de ce côté connaît plus de dispersion (figure 8), y compris un point aberrant (point 5, courbe violette).