

Détection de défauts et endommagements dans des CMO épais

Defects and damages detection in thick PMC

Camélia Ben Ramdane¹, Enrique Leite¹, Frédéric Taillade¹

1 : EDF Lab
Département PRISME
6 Quai Watier, 78401 Chatou Cedex
e-mail : camelia.ben-ramdane@edf.fr, enrique.leite@edf.fr, frederic.taillade@edf.fr

Résumé

Dans l'objectif d'allonger la durée de vie des pales d'éoliennes, il s'avère aujourd'hui nécessaire d'avoir recours à des inspections reposant sur du contrôle non-destructif. Les pales d'éoliennes (CMO) présentant la particularité d'être épaisses, les techniques d'inspection classiques ne sont pas adaptées à des inspections en conditions opérationnelles. Ainsi, EDF R&D a étudié la possibilité de détecter des hétérogénéités à partir de mesure de permittivité diélectrique sur des éprouvettes représentatives de pales d'éoliennes, saines et avec défauts calibrés. Les mesures de permittivité réalisées par sonde coaxiale et par radar, sur des éprouvettes en composites monolithique et sandwich, ont montré que cette grandeur physique est adaptée à la détection de défauts et endommagements.

Abstract

For lifetime extension of wind turbine blades, it appears mandatory to rely on non-destructive testing for blade inspection. Wind turbine blades (PMC) are characterized by their high thickness, what makes common techniques unsuitable for their inspection in operational conditions. Hence, EDF R&D studied the capability of dielectric permittivity-based techniques to detect heterogeneities in samples representative of blades, both sound and with calibrated defects. Permittivity measurements were performed using coaxial probes and radars, on both monolithic and sandwich composites. The results showed that this physical value is suitable for defects and damages detection.

Mots Clés : inspection, pales, composite épais, permittivité diélectrique

Keywords : inspection, blades, thick composite, dielectric permittivity

1. Introduction

Dans l'objectif d'allonger la durée de vie et d'optimiser la maintenance des pales d'éoliennes, il s'avère aujourd'hui nécessaire d'avoir recours à des techniques de Contrôle Non-Destructif (CND) pour l'inspection. Aujourd'hui, la quasi-totalité des inspections réalisées est, en effet, purement visuelle. Or, des endommagements visibles en surface ont, dans la majorité des cas, atteint le stade où ils sont dangereux pour la tenue structurale des pales. Ainsi, détecter des défauts et endommagements situés au cœur des matériaux permettrait d'anticiper des réparations si nécessaire, en fonction de la criticité des défauts et endommagements, et ainsi d'allonger la durée de vie des pales.

La majorité des techniques de CND, ainsi que les méthodes associées, développées pour les matériaux composites à matrice organique permettent de détecter des défauts peu profonds. Ces techniques ont initialement été développées pour des applications aéronautiques, pour lesquelles les composites ont des épaisseurs inférieures à celle que l'on rencontre aujourd'hui dans les pales d'éoliennes. L'épaisseur de composites monolithiques dans les pales d'éoliennes peut, en effet, aller jusqu'à une quinzaine de centimètres (environ 50 mm pour des pales de taille moyenne utilisées sur des parcs terrestres), tandis que celle des composites *sandwich* peut aller jusqu'à 30-40 mm, environ. Ainsi, il est nécessaire de développer des techniques qui permettent de détecter des défauts profonds dans les pales en tenant compte de la contrainte temporelle liée à l'inspection sur site.

Certaines techniques classiques, telles que la thermographie infrarouge, par exemple, peuvent permettre de détecter des endommagements situés quelques millimètres sous la surface mais cela nécessite des temps d'inspection de plusieurs dizaines de minutes, ce qui est incompatible avec une application sur site. Ainsi, la détection de défauts et endommagements par méthode diélectrique en utilisant, notamment, des sondes coaxiales (méthode capacitive) en partie développées à EDF R&D, a été envisagée pour détecter des défauts profonds. Cette technique présente l'avantage d'être rapide.

2. Matériaux et éprouvettes

Les éprouvettes étudiées sont représentatives de pales d'éoliennes et ont été réalisées par le fabricant de pales Vergnet Composites. Différents matériaux ont été réalisés afin de couvrir l'ensemble des matériaux et zones d'intérêt des pales, à savoir : des composites monolithiques, pour représenter les *spar caps* (renfort unidirectionnel UD) et le pied de pale (renfort biaxial ou triaxial), des composites de type *sandwich* pour représenter les *shear webs* et la coque, ainsi que des assemblages collés pour représenter la zone de collage entre *spar caps* et *shear webs*. Une vue en coupe schématisée de pale d'éolienne est présentée en Fig. 1.

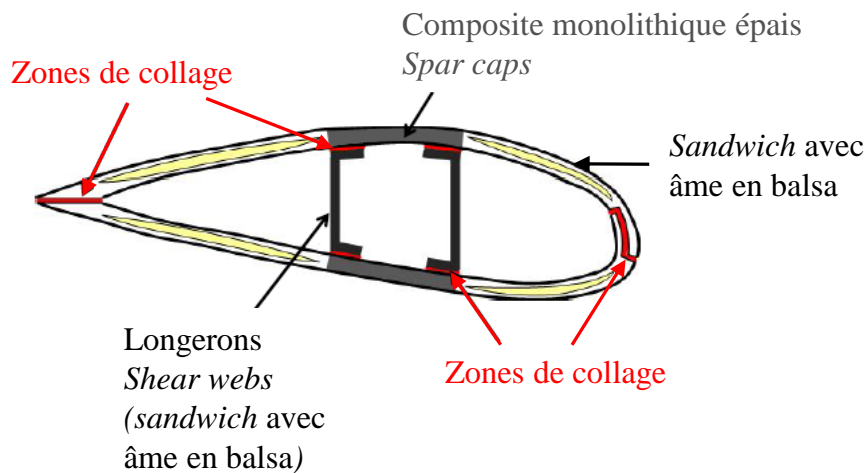


Fig. 1. Représentation d'une géométrie de pale d'éolienne, d'après [1].

Deux lots d'éprouvettes ont été réalisés : un premier lot d'éprouvettes sans défauts de fabrication (éprouvettes de référence), suivi d'un second lot d'éprouvettes avec défauts. Ces défauts de fabrication ont été choisis en fonction des critères d'acceptation d'un fabricant de pale. Dans les deux cas, des éprouvettes de composites monolithique et de type *sandwich* ont été réalisées. Les matériaux utilisés sont les suivants :

- Matrice polyester
- Renforts : fibre de verre *E-glass*
 - UD
 - Biaxial
- Pour les matériaux *sandwich* : âme en balsa
- Pour les éprouvettes collées : adhésif époxy vinyl ester.

Les matériaux utilisés sont identiques à ceux utilisés pour la fabrication des pales d'intérêt ; de même, le procédé de fabrication retenu est l'infusion.

Dans le cas des éprouvettes de référence, et pour chaque type de matériau, trois épaisseurs correspondant aux épaisseurs (i) minimale, (ii) maximale et (iii) à une épaisseur intermédiaire, pour

des pales d'une quarantaine de mètres, ont été étudiées. Ces mesures de permittivité sur éprouvettes de référence ont permis de déterminer les caractéristiques des éprouvettes avec défauts contrôlés, choisies de manière à être dans la configuration la plus critique en termes d'inspection (épaisseur maximale), tout en tenant compte des difficultés liées à l'introduction artificielle de défauts contrôlés. Ainsi, dans le cas des éprouvettes monolithiques à renfort unidirectionnel (*spar caps*), une épaisseur de 50 mm a été choisie, ce qui correspond à l'épaisseur maximale attendue sur les pales d'intérêt. Dans le cas des éprouvettes de type sandwich (*shear webs*), l'épaisseur choisie était d'environ 32 mm : 3,5 mm pour les peaux en verre-polyester (renfort biaxial), avec une âme en balsa de 25 mm. Des exemples d'éprouvettes avec défauts de fabrication sont présentés en Fig. 2.

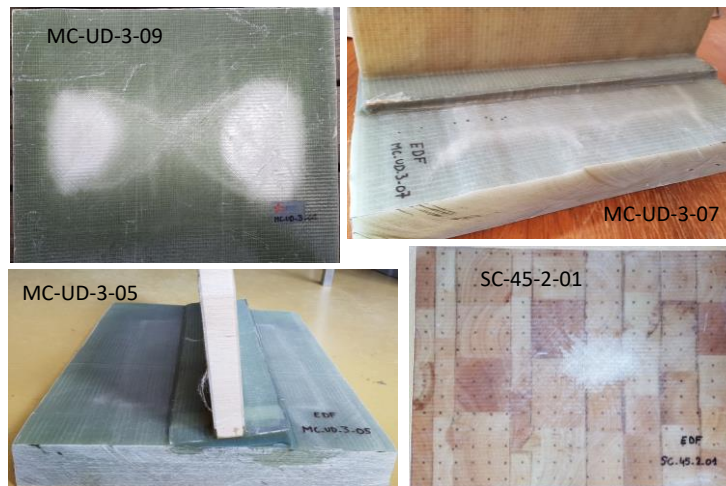


Fig. 2. Exemples d'éprouvettes avec défauts de fabrication. MC-UD-3-09 : composite monolithique, défaut d'infusion - manque de matrice. Assemblages collés : shear web en composite sandwich collé sur une plaque de composite - MC-UD-3-07 : monolithique, avec vides dans l'adhésif, MC-UD-3-05 : variation d'épaisseur de l'adhésif. SC-45-2-01 : composite sandwich, défaut d'infusion - manque de matrice.

3. Principe de mesure et matériel utilisé dans cette étude

3.1 Principe de mesure

Le principe de mesure décrit dans le paragraphe suivant est fondé sur l'ouvrage de Chen *et al.* [2]. La méthode électromagnétique est une méthode non-résonante utilisée pour acquérir des données relatives aux propriétés électromagnétiques d'un matériau pour une gamme de fréquences donnée. Pour ces méthodes, les propriétés électromagnétiques d'un milieu sont déduites de son impédance et de la vitesse de propagation des ondes dans ce milieu. Lorsqu'une onde électromagnétique se propage d'un milieu à un autre, son impédance caractéristique et sa vitesse sont modifiées, ce qui conduit à des phénomènes de réflexion et transmission au niveau de l'interface entre les deux matériaux. Mesurer ces ondes réfléchies et transmises permet ainsi d'établir des relations entre les perméabilités et permittivités des deux matériaux.

La méthode capacitive utilisée dans cette étude repose sur la mesure et l'analyse des ondes réfléchies. Ceci nécessite de pouvoir guider les ondes électromagnétiques vers le matériau étudié et de pouvoir mesurer les ondes réfléchies. Les propriétés électromagnétiques sont déduites du coefficient de réflexion au niveau d'un plan de référence. Ici, ce plan de référence correspond à l'interface entre l'éprouvette et la sonde de mesure.

Dans cette étude, un câble et une sonde coaxiaux ont été utilisés. La permittivité diélectrique du matériau est calculée à partir de la mesure du coefficient de réflexion (voir [2] pour le cas général et

[3] pour le cas particulier de la sonde coaxiale utilisé ici). Le principe de mesure par sonde coaxiale ainsi qu'un schéma de la sonde développée à EDF R&D sont présentés dans [3].

La permittivité (diélectrique) complexe ε peut être exprimée comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \varepsilon'' \quad (\text{Eq. 1})$$

où ε' et ε'' sont, respectivement, les parties réelle et imaginaire de la permittivité. Une autre grandeur d'intérêt est $\tan \delta$, qui représente les pertes et s'exprime comme suit :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (\text{Eq. 2})$$

3.2 Matériel utilisé dans cette étude

Un analyseur de réseau vectoriel (VNA) Anritsu MS46121A ainsi qu'une sonde coaxiale ont été utilisés dans cette étude. Trois sondes coaxiales de diamètres différents ont été utilisées dans cette étude. En effet, une règle empirique (4) (5) permet d'établir que la profondeur d'inspection d'une sonde correspond à son diamètre. Ainsi, plus le diamètre est important, plus la profondeur d'inspection est grande. Néanmoins, lorsque le volume d'intérêt (analysé) augmente, il peut s'avérer difficile de détecter des hétérogénéités contenues dans ce volume. En effet, pour une hétérogénéité donnée, plus le volume d'intérêt est grand, plus la fraction volumique de l'hétérogénéité est faible, et ainsi plus son effet sur la permittivité totale du volume est faible. Ainsi, il semble judicieux de choisir une sonde dont le diamètre est proche de l'épaisseur de l'éprouvette à étudier afin d'éviter de tenir compte de l'air situé en face opposée à celle sur laquelle les mesures sont réalisées. Des sondes coaxiales de 9 mm, 30 mm et 50 mm ont été utilisées dans cette étude.

4. Essais préliminaires sur éprouvettes saines

Des mesures ont été réalisées sur l'ensemble des éprouvettes de référence afin de mesurer la permittivité des matériaux en composites monolithique et sandwich, d'évaluer l'influence de l'orientation des fibres (par comparaison entre les matériaux à renforts unidirectionnel, biaxial et triaxial), de comparer les résultats obtenus avec des sondes différentes, de calculer les fréquences de coupure de chacune des sondes pour chacun des matériaux et, de manière générale, identifier les paramètres (spécifiques aux matériaux composites) qui pourraient avoir une influence sur la mesure de permittivité. Ces premières mesures sur éprouvettes saines (*i.e.* sans défauts induits de manière artificielle) ont permis de montrer que :

- Pour les trois sondes, les mesures sont répétables et reproductibles.
- Il est important de réaliser les mesures sur la face moule, qui est plane et peu rugueuse et permet donc un bon contact entre la sonde et le matériau. La surface correspondant à la face côté moule des pales correspond, par ailleurs, à la surface externe des pales, qui est la plus accessible (si ce n'est la seule) pour des essais d'inspection en conditions opérationnelles réelles.
- La fraction volumique de fibres (dépendant de l'empilement des renforts fibreux) semble avoir une influence sur la permittivité.

Par ailleurs, de manière générale, lorsque l'on réalise des mesures par sonde coaxiale :

- Idéalement, le diamètre de la sonde doit être aussi proche que possible de l'épaisseur du matériau analysé, la profondeur de pénétration étant proche du diamètre.
- Plus le volume d'un défaut est faible, plus il est difficile de le détecter (fraction volumique faible).

- Plus une hétérogénéité est profonde, plus il est difficile de la détecter :
 - La sensibilité décroît avec la profondeur
 - Pour un défaut « plat » (tel qu'une zone sèche due à un manque de matrice, par exemple), plus le défaut est profond, plus sa fraction volumique est faible et moins son influence sur la permittivité totale est importante.

Enfin, les valeurs moyennes de permittivité calculées à partir des mesures réalisées sur les éprouvettes de référence sont 5,0 pour le composite monolithique et 3,7 pour les composites *sandwich*.

5. Essais sur éprouvettes avec défauts contrôlés

Les épaisseurs des éprouvettes monolithiques et des éprouvettes de type *sandwich* sont, en moyenne, de 50 mm et 32 mm, respectivement. L'ensemble des éprouvettes a été scanné avec les sondes de 30 mm et 50 mm de diamètre et un pas de 25 mm (ce qui assure un recouvrement). Pour les deux types de matériau, la présence de défauts ne semble avoir d'influence que sur l'amplitude des signaux, par leur forme.

5.1 Essais sur éprouvettes monolithiques

Les défauts introduits dans les éprouvettes en composite monolithique sont les suivants :

- Porosité interlaminaire
- *Wrinkles* à différentes profondeurs
- Zones sèches (manque de matrice, sur plusieurs plis)
- Inclusions : vis (deux tailles), fil métallique, lame de cutter, fine lame de balsa, tube en plastique, rondelles plates (deux tailles).

Pour ces éprouvettes monolithiques, la majorité des défauts a pu être détecté par mesure de permittivité. Les défauts de type *wrinkles* semblent néanmoins difficiles à détecter : leur présence n'induit pas de variation notable de la permittivité lorsque la surépaisseur induite est faible. Quant aux inclusions, cela dépend de la permittivité du matériau constituant cette inclusion et de sa fraction volumique dans le volume inspecté.

Les cartographies obtenues pour les éprouvettes monolithiques avec *wrinkles* et inclusions sont présentées en Fig. 3 et Fig. 4, respectivement.

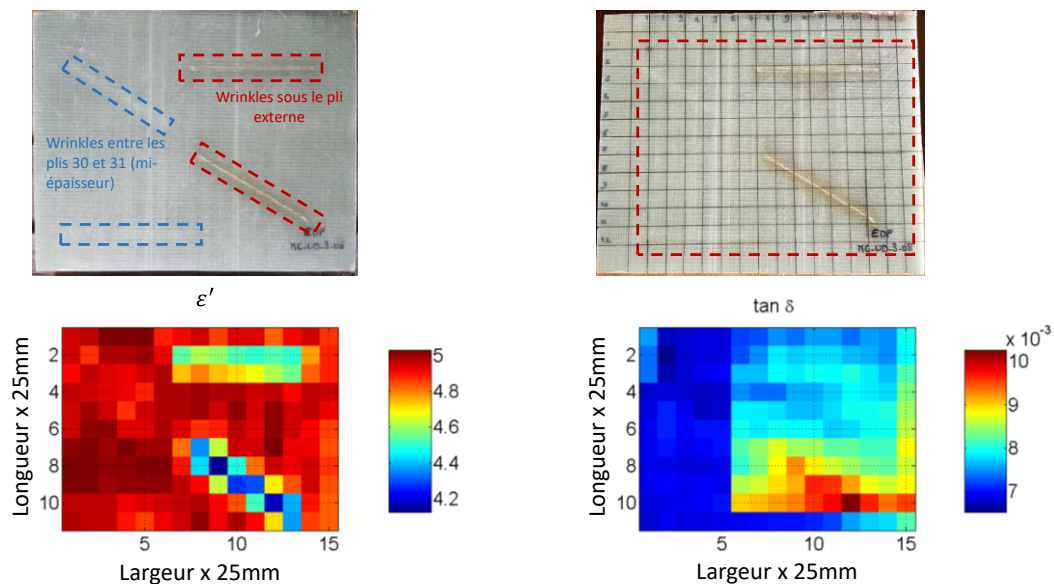


Fig. 3. Éprouvette monolithique avec wrinkles. Mesures de permittivité avec une sonde de 50 mm de diamètre. Wrinkles (2) situés sous le premier pli (pli externe) biaxial et wrinkles (2) situés entre les 30^{ème} et 31^{ème} plis (mi-épaisseur).

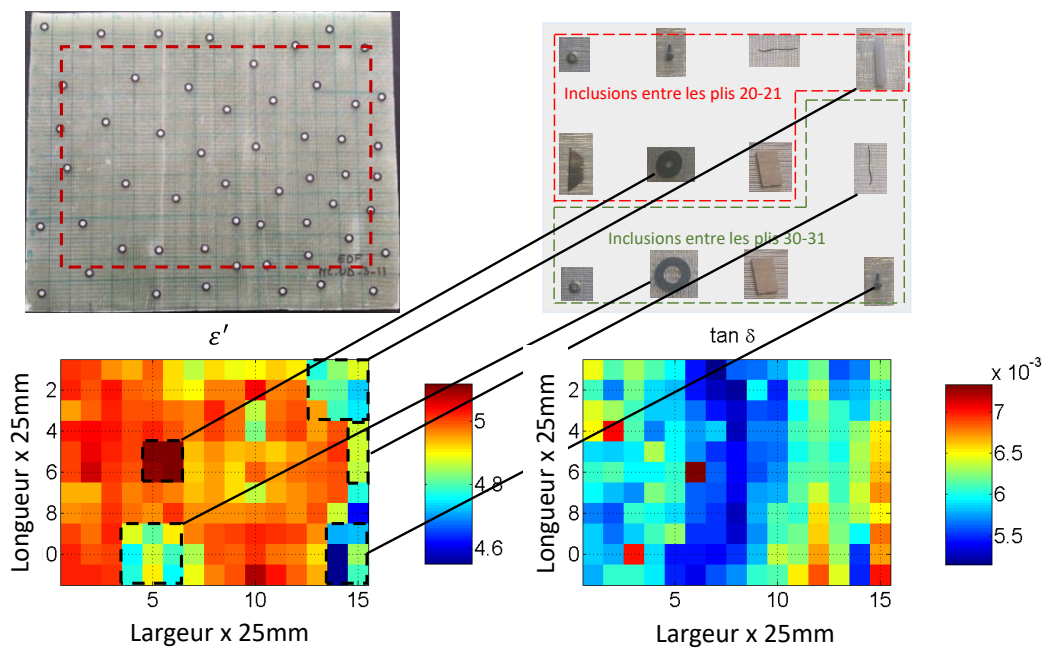


Fig. 4. Éprouvette monolithique avec inclusions. Mesures de permittivité avec une sonde de 50 mm de diamètre.

5.2 Essais sur éprouvettes de type sandwich

Les défauts introduits dans les éprouvettes en composite de type sandwich sont le suivants :

- Porosité interlaminaire
- Inclusions : vis (deux tailles différentes), fil métallique, lame de cutter, fine lame de balsa, tube en plastique, rondelles plates (deux tailles différentes).
- Bulles d'air au niveau de la transition entre le balsa et le composite monolithique

- Bulles d'air entre les blocs de balsa
- Espaces de 1 mm, 2 mm et 4 mm entre les blocs de balsa.

La détection des défauts associés à la présence d'air dépend de la quantité d'air présente, et donc de sa fraction volumique. La porosité interlaminaire est donc facilement détectable dans les composites de type sandwich lorsque le manque de matrice est important, comme on peut le constater en Fig. 5, tandis qu'il est plus difficile de détecter des bulles d'air situées entre des blocs de balsa. Pour les inclusions, le constat est identique à celui pour les éprouvettes monolithiques.

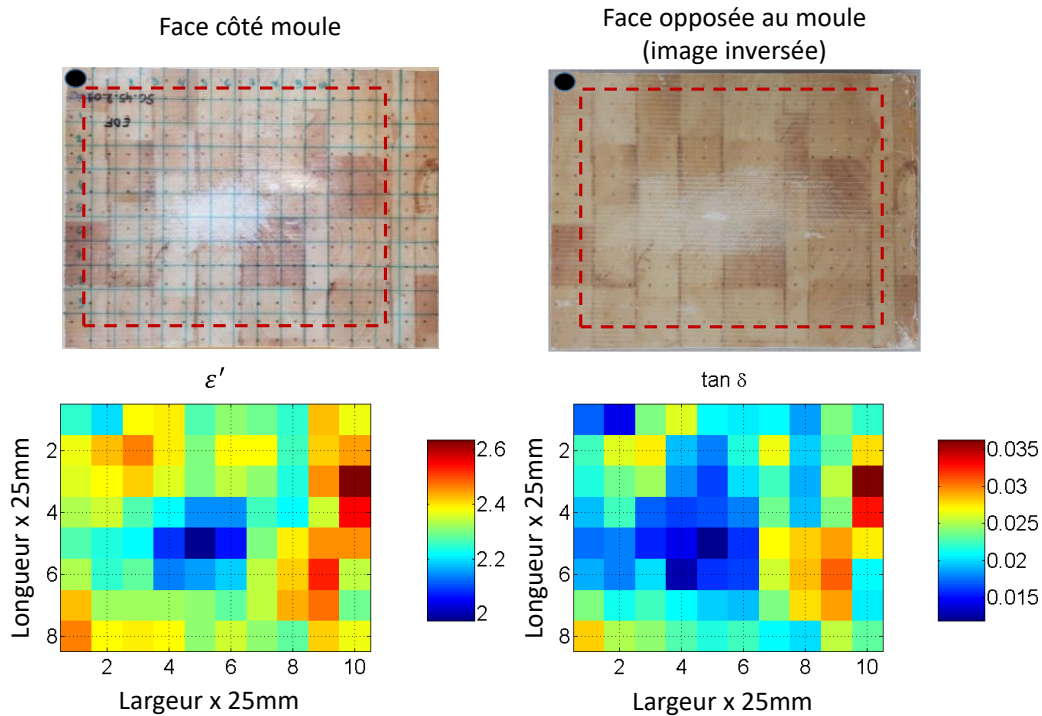


Fig. 5. Éprouvette sandwich avec une mauvaise infusion de matrice. Mesures de permittivité avec une sonde de 50 mm de diamètre.

Enfin, du fait de l'épaisseur des éprouvettes collées, comprenant à la fois une plaque en composite monolithique et l'épaisseur de colle, la sonde de plus grande dimension disponible (50 mm) n'a pas permis de détecter les défauts de collage. Il est néanmoins important de noter que ceci est dû à la limite imposée par le diamètre de la sonde et que des défauts de collage induisant la présence d'air (manque d'adhésif, par exemple) devraient être détectables par mesure de permittivité. La détection de variation d'épaisseur de colle ou d'une mauvaise polymérisation reste néanmoins à étudier.

6. Conclusion et perspectives

Les mesures de permittivité par sonde coaxiale sur des éprouvettes en composite monolithique et en composites de type *sandwich*, représentatives de pales d'éoliennes et présentant des défauts calibrés définis à partir des critères d'acceptation d'un fabricant et d'observations sur pales endommagées, ont montré que cette grandeur physique est un bon indicateur pour la détection de défauts profonds dans des composites à matrice organique épais. Cette technique présente donc l'avantage d'être rapide et de pénétrer profondément dans le matériau inspecté. Néanmoins, afin d'obtenir une meilleure résolution spatiale, EDF R&D s'oriente aujourd'hui vers l'utilisation de radars (à plus haute fréquence que les sondes coaxiales). Un scan obtenu sur l'éprouvette monolithique avec inclusions est présenté en Fig. 6. EDF R&D poursuit aujourd'hui cette étude afin de déterminer les

paramètres optimaux pour la détection de défauts dans des composites à matrice organique par mesure de permittivité, et en particulier par radar.

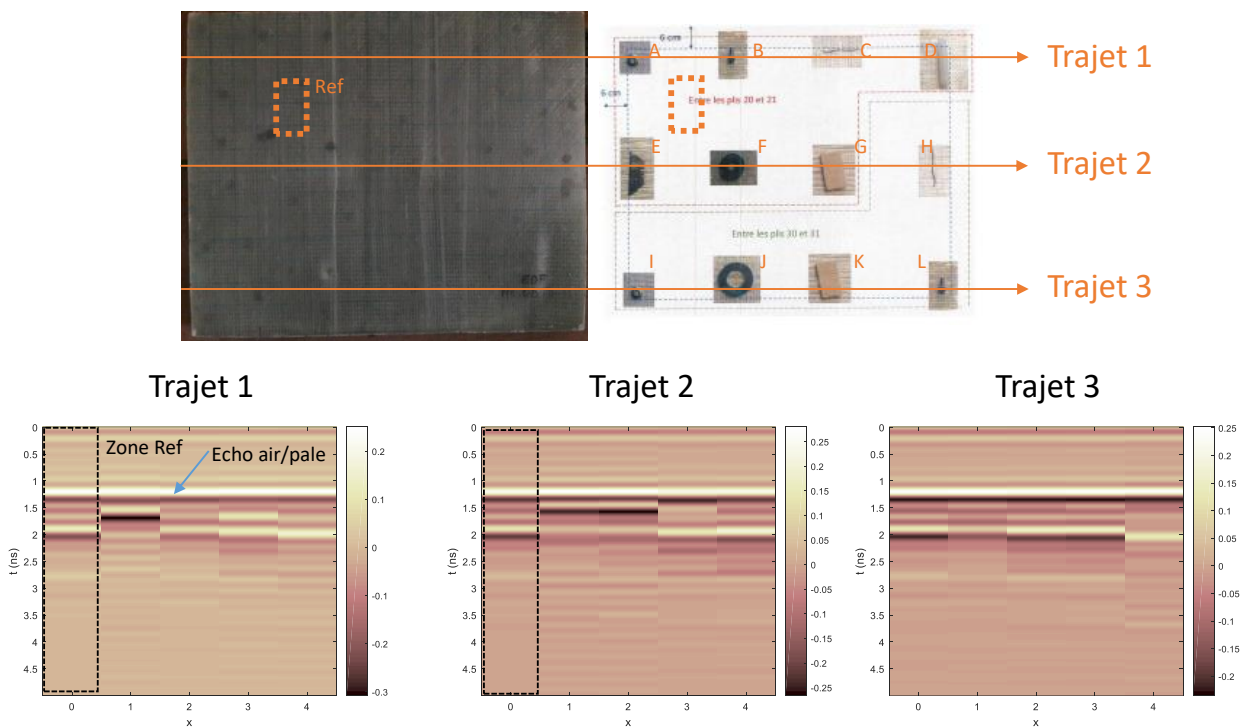


Fig. 6. Éprouvette monolithique avec inclusions. Mesures radar : B-scans obtenus le long de trois lignes (contenant les inclusions), à des fréquences comprises entre 8 et 12 GHz.

Remerciements

EDF R&D remercie la société Vergnet Composite pour la réalisation d'éprouvettes représentatives de pales, avec et sans défauts contrôlés.

Références

- [1] *Composite materials for wind turbine blades: issues and challenges*. Aymerich, F. Patras : s.n., 2012. SYSWIND Summer school – July 2012 – University of Patras.
- [2] Chen, L.F., et al. *Microwave Electronics - Measurement and materials characterization*. s.l. : John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [3] Guihard, Vincent. "Homogénéisation de grandeurs électromagnétiques dans les milieux cimentaires pour le calcul de teneur en eau", thèse de l'Université Toulouse III. 2018.
- [4] *Open-Ended Coaxial Dielectric Probe Effective Penetration Depth Determination*. Meany, Paul M., et al. 3, 2016, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques , Vol. 64, pp. 915-923.
- [5] Adous, M. *Caractérisation électromagnétique des matériaux traités de génie civil dans la bande de fréquence 50 MHz 13GHz*, Thèse de l'Université de Nantes. 2006.