

# Thermographie passive appliquée à la détection de délaminations dans les pales d'éoliennes

## Inspection of wind turbine blades delaminations by passive thermography.

Lucas REOCREUX<sup>1</sup>, Zhewei YU<sup>2\*\*</sup>, Sébastien ARNOULD<sup>2</sup>, Hervé PRON<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Université de Reims, ITheMM/Thermique

Campus du Moulin de la Housse BP 1039, 51687 Reims Cedex 2

<sup>2</sup>SupAirVision, Contrôle éolien par drone

2 rue Gustave Eiffel, 10430 Rosières-près-Troyes

\*(auteur correspondant : [herve.pron@univ-reims.fr](mailto:herve.pron@univ-reims.fr))

\*\* (contact alternatif : [zy@supairvision.com](mailto:zy@supairvision.com))

**Résumé** – Une pale d'éolienne est une structure composite complexe difficile d'accès lorsqu'elle est en configuration de fonctionnement. Nous présentons ici une méthode de détection de délaminations dans un échantillon de pale, simple à mettre en œuvre, avec une approche par modélisation numérique suivie d'expériences. La méthode employée est la thermographie dite passive, avec pour principale source de chaleur le soleil. Les considérations abordées sont la détection et la caractérisation des défauts d'une part, la mise en œuvre et la répétabilité de l'inspection d'autre part.

**Mots-clés** : CND ; Polymère renforcé en fibres de verre (PRFV); Éolienne; Délamination; Excitation solaire.

**Abstract** – Wind turbines blades are hard to inspect, complex composite structures. This study brings forward a fairly simple method of detecting delaminations in a blade sample. The topic is first approached by numerical modelling and then by experiments. The used method is passive infrared thermography, with sun as the main heat source. Both detection and characterisation of the defects on the one hand, execution and repeatability of the inspection on the other hand, are tackled.

**Keywords**: NDT; Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP); Wind Turbine; Delamination; Solar excitation.

### Nomenclature

$C$  capacité thermique massique,  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$h$  coefficient d'échange convectif,  
 $W.m^{-2}.K^{-1}$

$k$  conductivité thermique,  $W.m^{-1}.K^{-1}$

$q_0$  densité de flux,  $W.m^{-2}$

$T$  température,  $K$

*Symboles grecs*

$\rho$  masse volumique,  $kg.m^{-3}$

## 1. Introduction

Le contrôle non destructif est une méthode d'inspection déjà largement utilisée sur site dans différents domaines industriels mettant en jeu des polymères renforcés en fibres de verre [1]. En particulier, les pales d'éoliennes sont composées de ce type de composite et il s'avère qu'au cours de leur fonctionnement, elles sont soumises à des charges répétées [2] ce qui peut provoquer l'apparition et la propagation de défauts internes qu'il faut inspecter régulièrement. Le marché éolien, se développant sur terre comme sur mer, crée des éoliennes fournissant de plus en plus de puissance et s'élevant de plus en plus haut, diminuant les possibilités d'inspection.

Plusieurs méthodes de détection de défauts ont été testées [3] et il apparaît que la détection par thermographie infrarouge [4], et notamment la thermographie pulsée [5] fonctionne jusqu'à une certaine profondeur de défauts. Cette méthode implique cependant des temps longs et de lourds moyens de mise en œuvre pour des matériaux tels que les polymères renforcés en fibres de verre [4]. Il faut donc élaborer de nouvelles méthodes plus simples à mettre en œuvre, en essayant de réduire les dépenses énergétiques ; les méthodes envisagées sont entre autres l'utilisation du drone [6] et le recours à la thermographie active avec flux solaire, sans source de chaleur supplémentaire [7]. L'objet de cette communication est de mettre en évidence que les sources d'excitation thermique naturelles peuvent être suffisantes pour la détection de défauts de type délaminage dans une pale d'éolienne.

## 2. Échantillons et matériel

### 2.1. Structure de la pale et échantillons

Une pale d'éolienne est une structure composite complexe généralement composée d'un revêtement (gelcoat), de polymère renforcé de fibres de verre (PRFV) et de fibres naturelles comme le balsa. En général, la zone composée de polymères représente 40 % de la surface de la pale. Cette partie représente la « Zone stratifiée principale » sur laquelle nous nous focalisons pour ce travail. Dans cette zone, il existe 4 types de défauts de type « dommages » (c'est à dire qu'ils ne sont pas nécessairement liés à une mauvaise fabrication) : les fissures du gelcoat, les fissures de la matrice sous-jacente, les décollements du gelcoat et les délaminages. Parmi ceux-ci, seuls les trois derniers types sont des défauts en profondeur.

Pour ce travail, nous disposons d'un échantillon issu d'une pale d'éolienne ayant été en service. Il est légèrement incurvé, mesure 1050 x 550 x 30 mm et est composé d'une partie gelcoat + PRFV et d'une partie gelcoat + balsa. Nous nous intéresserons seulement à la partie gelcoat + PRFV.

Il comporte 7 défauts identifiables :

- Un défaut surfacique de type décollement de gelcoat suite à un impact. Ce défaut ne sera pas analysé par la suite
- Quatre trous à fond plat (TFP) de 20 mm de diamètre à 3, 5, 8 et 10 mm de profondeur (défauts 1, 2, 3 et 4)
- Deux défauts de type délaminage (DEL) à 7 et 10 mm de profondeur (défauts 5 et 6)



Figure 1: Schéma en coupe des 4 TFP aux profondeurs 3 (1), 5 (2), 8 (3) et 10 mm (4)



Figure 2: Schéma en coupe des deux DEL aux profondeurs 7 (5) et 10 mm (6)

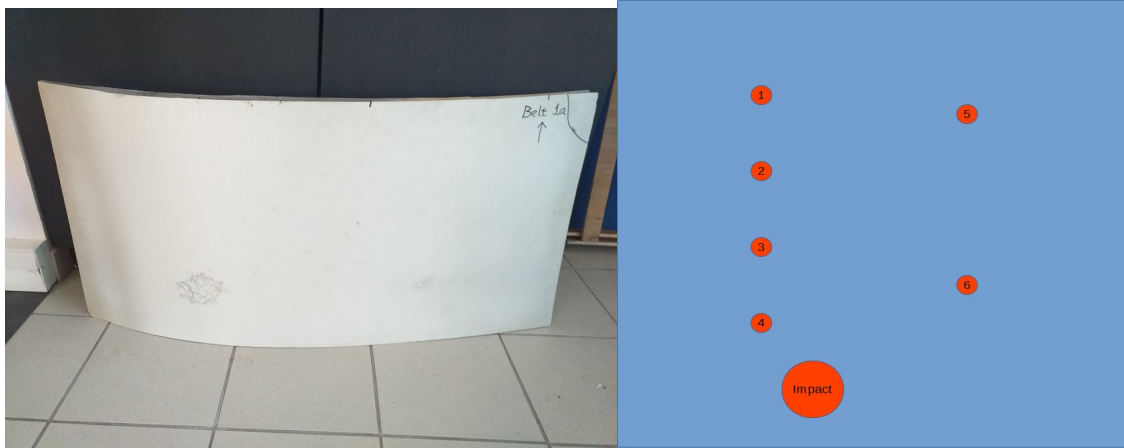


Figure 3: Vue de face des positions des 6 défauts de l'échantillon

Le polymère renforcé en fibres de verre est composé de 41 couches de fibres (des « plis ») de verres dont la direction de tissage varie. Les trois plis de verre utilisés ont chacun un grammage différent :

- Mat de fibre de verre, grammage 300 g/m<sup>2</sup>
- UD (unidirectionnel) de fibre de verre, grammage 1200 g/m<sup>2</sup>
- Biaxial de fibre de verre  $\pm 45^\circ$ , grammage 600 g/m<sup>2</sup>

Les plis de verre sont empilés dans un ordre précis et le procédé d'infusion sous-vide permet ensuite d'injecter la résine thermoplastique entre les couches de fibre. La disposition et la variété des fibres entraînent une anisotropie, en particulier pour la conductivité thermique dans le sens de diffusion perpendiculaire aux fibres, qui est inférieure avec 0,38 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> au lieu de 0,47 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> [7].

Un délaminage est le décollement de plis de verre entre eux. C'est un phénomène de vieillissement qui est en général accéléré à la suite d'impacts. Les délaminages présents dans nos échantillons ont été simulés par l'insertion d'une couche de papier bulle cylindrique d'environ 1 mm de hauteur et 20 mm de diamètre entre deux couches de fibres de verre. Cette insertion n'a pas été réalisée lors de la fabrication mais en utilisant le procédé de réparation dit « par patches composites ». Ce procédé implique la définition de la zone à réparer, la définition de la séquence d'empilement à l'aplomb du défaut puis la découpe de chaque nouveau pli aux dimensions appropriées. En pratique, les inserts ont été introduits à partir de la face arrière et ont impliqué une trentaine de plis de verre pour une zone réparée d'environ 20 cm de diamètre.

A notre connaissance, le gelcoat est un matériau dont les propriétés thermiques n'ont pas été étudiées. Il est a priori très isolant et la connaissance de ses caractéristiques est primordiale puisqu'il est la première couche chauffée. Une analyse de type hot disk a donc été réalisée pour la mesure de la conductivité du gelcoat. La norme employée et les conditions opératoires sont les suivantes :

- Norme ISO 22007-2:2008-12 Plastiques-Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique-Méthode de la source plane transitoire (disque chaud).
- Appareillage Hot Disk TPS 3500 + module logiciel STANDARD

- Référence de sonde Kapton 5465 (3.189mm de rayon)
- Température de mesure  $24,0 \pm 1,0^{\circ}\text{C}$

Trois mesures ont été faites et la valeur retenue est de  $0,358 \pm 0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Les mesures de capacité thermique massique du gelcoat ont été réalisées à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, au sein du laboratoire ItheMM/Thermique par méthode de calorimétrie différentielle à balayage, à l'aide de l'appareil DSC 204 F1 *PHOENIX* (Netzsch). La valeur retenue est de  $1,2 \pm 0,03 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Enfin, des mesures de réflectivité ont été réalisées sur un échantillon de pale d'éolienne. L'appareil utilisé est un spectromètre IRTF de type Bruker Vertex 70 équipé dans ce cas d'une sphère intégrante Infragold. La plage d'absorption étudiée totale est comprise entre 0,4 et 25  $\mu\text{m}$ . Trois mesures ont été réalisées pour les plages d'absorption 0,4-1  $\mu\text{m}$ , 0,9-2  $\mu\text{m}$  et 2-25  $\mu\text{m}$ . La réflectivité retenue pour le spectralon, le matériau diffusant blanc de référence, est de 0,99 pour la plage d'absorption correspondant à la mesure 1 et de 0,95 pour la plage d'absorption correspondant aux mesures 2 et 3.

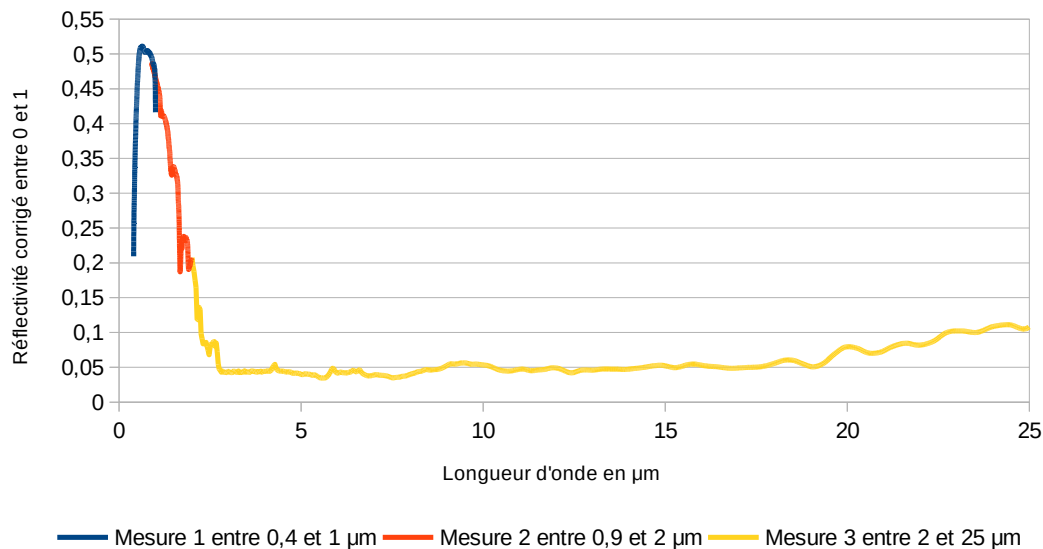


Figure 4: *Réflectivité corrigée du gelcoat entre 0,4 et 25  $\mu\text{m}$*

On constate que la réflectivité corrigée est faible entre 3 et 15  $\mu\text{m}$  (environ 0,05), bande spectrale dans laquelle on trouve les bandes des deux principaux types de caméras IR du marché correspondant aux deux bandes de bonne transmission atmosphérique soit 3-5,5  $\mu\text{m}$  et 7,5-13  $\mu\text{m}$ .

## 2.2. Matériel

La caméra thermique que nous utilisons est la FLIR T660. C'est une caméra microbolométrique non refroidie, dont le nombre de détecteurs est de 640 x 480. Sa gamme spectrale est comprise entre 7,5 et 14  $\mu\text{m}$ . L'angle de l'objectif est de  $25^{\circ}$ . Sa sensibilité thermique est inférieure à 20 mK à  $30^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Méthodes

Nous avons obtenu des résultats sur des échantillons issus de pales d'éoliennes auquel nous avons confronté des résultats issus d'une modélisation numérique.

#### 3.1. Modélisation numérique

Pour la modélisation numérique, nous avons utilisé le logiciel de simulation numérique basé sur la théorie des éléments finis COMSOL Multiphysics.

L'objectif ici est de construire une géométrie semblable à la partie gelcoat + PRFV de l'échantillon à notre disposition. Les propriétés thermiques que nous retenons pour la suite de la modélisation sont renseignées dans le tableau 1.

On modélise une géométrie semblable à l'échantillon, en reprenant les positions des défauts présentés à la figure 3 (l'impact n'est pas modélisé), aux profondeurs présentées dans les figures 1 et 2 en ajoutant le gelcoat d'une épaisseur de 0,5 mm. On assigne ensuite les propriétés thermiques aux zones correspondantes (PRFV en bleu et air en rouge).

L'équation régissant la température en fonction du temps et de la position  $T(r,t)$  est

$$\rho C \frac{\partial}{\partial t} T(r,t) + \nabla \cdot (-k \nabla T(r,t)) = 0 \quad (1)$$

pour laquelle les propriétés thermiques des différents matériaux sont renseignées dans le tableau 1.

Matériau	Masse volumique $\rho$	Conductivité thermique $\lambda$	Capacité thermique massique $C$
	kg.m <sup>-3</sup>	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Gel-coat	1250	0,358	1200
PRFV [7]	1830	0,47 – 0,47 – 0,38	950
Air	1,2	0,023	1000

Tableau 1 : Propriétés thermiques des différents matériaux

Les conditions aux frontières sur la face avant (face exposée au soleil) sont

$$-n \cdot k \cdot \nabla T(r,t) = q_0 + h(T_{air} - T(r,t)) \quad (2)$$

où  $n$  est le vecteur normal directionnel,  $q_0$  est la densité de flux de chaleur net entrant engendrée par le soleil, et  $h$  le coefficient d'échange convectif. Ces deux termes ont été estimés au regard des conditions météorologiques du 18/07/2019 dans la région de Troyes (10). Les considérations prenant en compte les courbes de réflectivité et le spectre solaire détecté sur terre,  $q_0$  a été estimé à 300 W.m<sup>-2</sup>. Le terme  $h$  est estimé à 15 W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup> avec une vitesse de vent de référence de 3 m.s<sup>-1</sup>.

Les conditions aux frontières sur les 5 autres faces sont des conditions d'isolation thermique.

$$-n \cdot k \cdot \nabla T(r,t) = 0 \quad (3)$$

Le pas de temps pour la résolution des simulations est de 1 seconde.

### 3.2. Conditions expérimentales

L'échantillon a été stocké pendant plusieurs jours à l'intérieur du laboratoire à une température de  $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ . On considère que l'équilibre thermique est atteint au début de l'expérience.

L'échantillon a ensuite été déplacé à l'extérieur et positionné sur le sol en appui contre un mur de sorte à ce que l'angle d'incidence entre le soleil et la face avant de l'échantillon soit droit. On considère qu'il n'y a pas de source de chaleur sur les autres faces. La caméra thermique est placée à 2,8 m de l'échantillon et la résolution spatiale est donc d'environ 2,5 mm par pixel. On enregistre une image toutes les 30 secondes pendant 45 minutes de 11h15 à 12h00. La variation d'angle d'incidence n'a pas été prise en compte.

La journée choisie pour les tests est une journée très ensoleillée et dégagée, réunissant les meilleures conditions de chauffage possibles dans cette région.

### 4. Résultats et discussions

L'objectif de la modélisation numérique est d'estimer le temps au bout duquel un défaut de type délaminage ou trou à fond plat est le plus visible. Dans un premier temps, ce n'est donc pas la forme de la courbe qui est une donnée importante, car nous n'analysons pas un flux de données de type vidéo mais une succession d'images séparées de plusieurs dizaines de secondes.

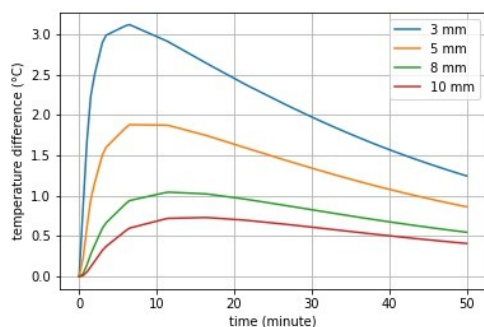


Figure 5: Résultats de la modélisation numérique des contrastes thermiques en surface induits par le chauffage du soleil pour les 4 trous à fond plats aux profondeurs 3, 5, 8 et 10 mm, par rapport au point de référence

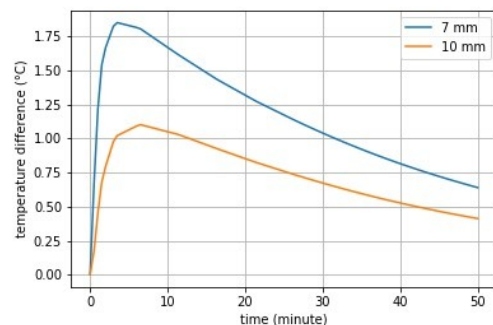


Figure 6: Résultats de la modélisation numérique des contrastes thermiques en surface induits par le chauffage du soleil pour les 2 délaminages aux profondeurs 7 et 10 mm, par rapport au point de référence

Ce dernier point est un élément important puisqu'il signifie que la zone d'un potentiel défaut n'est pas analysée en soi mais que l'on prend également en compte la zone environnante. La donnée importante que nous recherchons par la modélisation est donc la différence de température entre une zone saine et une zone avec défaut. C'est ce qui est présenté dans les figures 5 et 6. On chauffe l'échantillon en face avant et on relève les températures à la surface, en un point précis à l'aplomb du centre du défaut étudié (le point le plus chaud théoriquement).

On peut donc extraire de ces tracés la différence de température maximale entre le point de référence et chacun des défauts,  $\Delta T_{max,th}$  et le temps au bout duquel cette différence est atteinte (voir tableau 2).

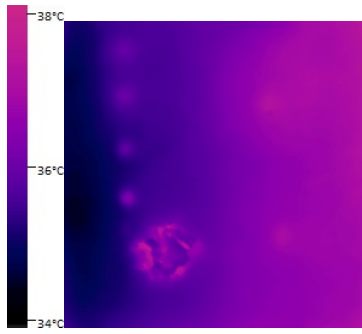


Figure 7: Thermogramme de l'échantillon à  $t = 1590$  s

Au regard de la sensibilité thermique de la caméra (2.2), de la résolution spatiale lors de l'expérience (3.2) et de la différence de température théorique engendrée en surface par les défauts internes (tableau 2), il n'est pas incohérent de voir apparaître les défauts. Le thermogramme de la figure 7 montre que les 6 défauts sont visibles au temps  $t = 1590$  s.

De la même manière que dans la partie modélisation, il est donc possible, à partir des 90 thermogrammes enregistrés, d'évaluer le contraste thermique maximum  $\Delta T_{max,exp}$  atteint au cours de l'expérience (tableau 2). Ces premiers résultats indiquent que le soleil comme unique source de chaleur extérieure est suffisant non seulement pour identifier les parties structurantes d'une pale d'éolienne [7] mais aussi pour identifier des défauts réels de type délaminage. De plus, cette source de chaleur permettrait de détecter des défauts jusqu'à 10 mm, ce qui est un résultat remarquable dans le domaine des composites.

A ce propos, il est opportun de remarquer qu'un effet de flou semble apparaître pour les défauts les plus profonds (voir figure 3 pour la position des défauts), ce qui est lié à la diffusion de chaleur dans le plan. Cette caractéristique avait déjà été observée dans [3], où l'effet de flou était reconnu comme une limite de la thermographie pour la détection de défauts à grande profondeur. Une raison plausible pour l'effet de flou plus important dans les délaminages est la technique d'insertion utilisée ; cette méthode contraint en effet une réparation plus large que l'insert, puisqu'il faut ouvrir plus large à chaque pli de verre (comme décrit paragraphe 2.1).

Défaut	Différence de température max $\Delta T_{max,th}$ théorique °C	Temps $t_{th}$ correspondant sec	$\Delta T_{max,exp}$ observé °C	Temps $t_{exp}$ correspondant sec
TFP 3 mm	3,1	360	1,5	390
TFP 5 mm	1,8	480	0,7	700
TFP 8 mm	1,1	660	0,6	700
TFP 10 mm	0,8	960	0,4	840
DEL 7 mm	1,8	240	0,4	700
DEL 10 mm	1,1	420	0,2	540

Tableau 2: *Contraste thermique maximum et le temps correspondant pour les 6 défauts de l'échantillon, selon le modèle numérique et expérimentalement*

Pour la comparaison entre la modélisation et la partie expérimentale, on peut d'abord remarquer que les résultats sont relativement semblables. L'ordre de grandeur pour les temps est correct et les  $\Delta T_{max,exp}$  observés sont en-dessous des  $\Delta T_{max,th}$  théoriques, ce qui pourrait être expliqué par un mauvais choix de coefficient d'échange convectif. En effet l'objectif de la modélisation était d'estimer une tendance sur l'évolution de la différence de température entre une zone saine et avec défaut. En particulier cette modélisation ne tient pas compte du rayonnement et le coefficient d'échange convectif a été évalué grossièrement.

Un autre objectif de la modélisation était d'évaluer la différence de comportement entre un trou à fond plat et un délaminage entièrement fermé sur la face arrière. Les résultats théoriques indiquent que le contraste maximum est moins grand et atteint plus vite. Cette tendance est également marquée dans les résultats expérimentaux.

Enfin, même si ni la modélisation numérique ni l'expérience ne tiennent compte du fait que la source de chaleur solaire apparaît progressivement, il semble tout de même qu'il existe

une fenêtre de temps précise pendant laquelle la détection d'un défaut interne à une pale d'éolienne est facilitée (c'est à dire avec un contraste important), et que cette fenêtre de temps et cette valeur de contraste dépendent de la profondeur et du type du défaut ; sans que pour autant la connaissance du temps au bout duquel un défaut apparaît et de la valeur de contraste associée ne permettent de le caractériser.

## 5. Conclusion

Avec la connaissance des matériaux du domaine éolien et en prenant en compte un modèle simplifié de l'apport en chaleur du soleil en conditions dégagées, il est possible de construire un modèle numérique qui confirme deux informations : d'une part, une différence de température détectable va apparaître en surface entre une zone saine et une zone défectueuse, d'autre part cette différence va atteindre un maximum à un temps dépendant essentiellement de la profondeur.

L'expérience réalisée à la suite de cette modélisation permet de mettre en évidence ces deux résultats, sans plus de précision sur la répétabilité ou la possibilité de mise en œuvre dans des conditions externes moins favorables.

Outre la similarité des résultats du modèle numérique et des enregistrements thermiques, il est important de souligner la mise en évidence de la faisabilité de détection par thermographie passive, pour des défauts jusqu'à 10 mm de profondeur. En effet, les pales d'éoliennes, une fois installées, sont très difficiles d'accès et la perspective de les inspecter par thermographie infrarouge sans besoin de source de chaleur supplémentaire est particulièrement prometteuse.

## Références

- [1] C. Garnier, « The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using Non Destructive Testing », *Composite Structures*, vol. 93, no 5, p. 1328-1336, avr. 2011
- [2] C. Kong, « Investigation of fatigue life for a medium scale composite wind turbine blade », *International Journal of Fatigue*, vol. 28, n° 10, p. 1382-1388, oct. 2006
- [3] I. Amenabar, « Comparison and analysis of non-destructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades », *Part B*, p. 8, 2011.
- [4] M. Doroshnasir, « On-site inspection of potential defects in wind turbine rotor blades with thermography: On-site inspection of rotor blades with thermography », *Wind Energ.*, vol. 19, n° 8, p. 1407-1422, août 2016
- [5] A. Manohar, « Detection of defects in wind turbine composite blades using statistically enhanced Lock-In Thermography », *Structural Health Monitoring*, vol. 12, no 5-6, p. 566-574, sept. 2013
- [6] L. E. Mavromatidis, « First experiments for the diagnosis and thermophysical sampling using pulsed IR thermography from unmanned aerial vehicle (UAV) », in *Proceedings of the 2014 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, 2014
- [7] T. Worzewski, « Thermographic inspection of a wind turbine rotor blade segment utilizing natural conditions as excitation source, Part I: Solar excitation for detecting deep structures in GFRP », *Infrared Physics & Technology*, vol. 76, p. 756-766, mai 2016

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Yannick Le Maoult et la plateforme de recherche MIMAUSA pour l'expertise matériau sur le gelcoat ainsi que Jérémy Hellot et la société Engie Green pour la fourniture des échantillons et les connaissances partagées sur la pale d'éolienne et sa composition.