

Caractérisation en température du comportement radiatif en réflexion d'un composite à fibres de carbone

Violaine Le Louët, Benoit Rousseau, Steven Le Corre, Nicolas Boyard, Xavier Tardif, Didier Delaunay

▶ **To cite this version:**

Violaine Le Louët, Benoit Rousseau, Steven Le Corre, Nicolas Boyard, Xavier Tardif, et al.. Caractérisation en température du comportement radiatif en réflexion d'un composite à fibres de carbone. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. hal-01623259

HAL Id: hal-01623259
https://hal.science/hal-01623259

Submitted on 25 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation en température du comportement radiatif en réflexion d'un composite à fibres de carbone

Characterization of the radiative behaviour in reflection of a carbon fibres composite versus temperature

Violaine LE LOUËT[1,2], Benoit ROUSSEAU[2], Steven LE CORRE[2], Nicolas BOYARD[2], Xavier TARDIF[1], Didier DELAUNAY[2]

1 : Institut de Recherche Technologique Jules Verne
Chemin du Chaffault, 44340 Bouguenais
e-mail : violaine.le-louet@irt-jules-verne.fr

2 : Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, UMR 6607 CNRS/ Université de Nantes
Rue Christian Pauc, 44306 Cedex 3
e-mail : benoit.rousseau@univ-nantes.fr

Résumé

La maîtrise et l'optimisation des échanges thermiques dans les procédés de mises en forme de composites impliquant une source de chauffage infrarouge nécessite de caractériser finement les propriétés radiatives du matériau. En particulier, pour les polymères renforcés par des fibres de carbone, le comportement en réflexion doit être étudié en fonction de l'angle d'incidence du laser, de sa longueur d'onde, de l'orientation des fibres et de la température.
Cette étude présente une analyse spectrale du comportement en réflexion d'un composite unidirectionnel carbone/PEEK, réalisée pour des longueurs d'onde comprises entre 0.667 à 25 µm à l'aide d'un spectromètre Infrarouge à Transformée de Fourier. Dans un premier temps, l'évolution des profils de diffusion est considérée pour des incidences comprises entre 13 et 83° et selon différentes orientations de fibres. Il apparait que la réflectivité est maximale pour un faisceau en incidence rasante et parallèle à la direction des fibres. Puis, une cellule chauffante permettant d'effectuer des mesures de réflectivité spéculaire en incidence normale, de 20 à 450°C, a été développée et installée sur le spectromètre. Après validation complète de ce dispositif, les résultats obtenus sur un composite carbone/PEEK sont présentés. On observe que la réflexion du composite en incidence normale ne varie que légèrement entre 20 et 450°C.

Abstract

In order to optimize the energy efficiency of laser-assisted processes for manufacturing carbon fibre reinforced composites (CFRP), the thermal radiative properties of the materials involved must be well known. More importantly, the reflective behaviour must be established as a function of the incidence angle of the beam, its wavelength, the fibre orientation, and temperature. This study presents a spectral characterization of a carbon/PEEK composite performed in the range [0.667 - 25 µm] with the help of a Fourier Transform Infrared spectrometer. Firstly, the scattering profiles are studied according to the fibre orientation and for incidence angles between 13 and 83°. It appeared that the reflectivity is maximal at grazing incidence and when the beam axis is parallel to the fibre direction. Secondly, a heating compact cell is adapted to the spectrometer sample compartment. The final system allows performing normal incidence reflectivity measurements between 20 and 450°C. After a thorough validation of this new sample holder performance, the results obtained for the carbon/PEEK composite are presented. It appeared that the composite reflectivity merely varies between 20 and 450°C.

Mots Clés : Propriétés radiatives, analyse spectrale, porte-échantillon chauffant, composites à fibres de carbone
Keywords: Radiative properties, spectral analysis, controlled-temperature cell, carbon fibre reinforced composite

1. Introduction

Le placement automatisé de bandes pré-imprégnées est aujourd'hui une technologie couramment employé dans l'industrie aéronautique pour la mise en forme des composites à fibres de carbone (CRFP) [1]. Dans ce procédé, une pièce est formée par dépôts successifs de bandes pré-imprégnées de matrice thermoplastique. A chaque passage, les surfaces du substrat et de la bande en cours de dépose sont chauffées, puis mises en contact à l'aide d'un rouleau de compaction (Fig. 1a). Dans le cas de matrice thermoplastique semi-cristalline, le soudage des bandes entre elles est assuré par la diffusion des chaines polymères dans les zones en contact intime. Ce mécanisme nécessite d'avoir

préalablement porté la matrice au-dessus de son point de fusion, généralement élevé pour les polymères thermoplastiques hautes performances (343°C dans le cas du polymère PEEK, par exemple). Ainsi, les torches à gaz traditionnellement employées sont progressivement remplacées par des diodes laser (longueur d'onde λ avoisinant le micron). Ces sources infrarouges permettent en effet d'irradier uniformément, et avec de fortes densités d'énergie, les zones utiles à la fusion de la matrice et à l'adhésion des bandes [2]. Afin de comprendre et maitriser les échanges thermiques existants lors du procédé dans un objectif final de simulation, ce mode de chauffage nécessite de caractériser finement les propriétés radiatives du matériau et plus particulièrement son comportement en réflexion en fonction des conditions de mise en forme [3,4].

La Fig. 1b. représente l'interaction entre un rayon incident et la surface d'un CRFP où θ_i est l'angle d'incidence du faisceau par rapport à la normale au plan du CRFP, et ϕ_i est l'écart angulaire par rapport à la direction des fibres unidirectionnelles.

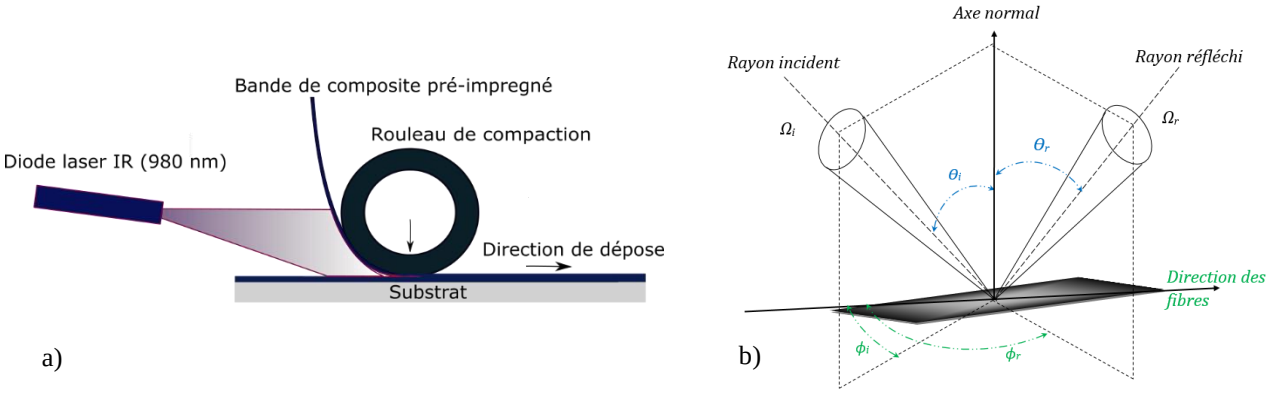


Fig. 1: Représentation du a) procédé de dépose de bandes composites avec tête de chauffage laser b) d'un faisceau incident et d'un faisceau réfléchi par la surface du composite.

La fonction de réflectivité bidirectionnelle $f_\lambda(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T)$ est définie par [5]:

$$f_\lambda(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T) = \frac{I_{\lambda,r}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T)}{I_\lambda(\theta_i, \phi_i, T) cos\theta_i d\Omega_i} \quad (1)$$

Où $I_{\lambda,r}(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T)$ est l'intensité spectrale réfléchie dans la direction (θ_r, ϕ_r), induite par la luminance $I_\lambda(\theta_i, \phi_i, T) cos\theta_i d\Omega_i$ dans l'angle solide élémentaire $d\Omega_i$, porté par la direction incidente (θ_i, ϕ_i), et T la température. Les réflectivités spectrales bidirectionnelles et directionnelle -hémisphérique, respectivement notées $\rho_\lambda(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_{r,} T)$ et $\hat{\rho}_\lambda(\theta_i, \phi_i, T)$, sont données par :

$$\rho_\lambda(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_{r,} T) = f_\lambda(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T) cos(\theta_r d\Omega_r) \quad (2)$$

$$\hat{\rho}_\lambda(\theta_i, \phi_i, T) = \int_{2\pi} f_\lambda(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T) cos\,\theta_r d\Omega_r \quad (3)$$

Où $d\Omega_r$ est l'angle solide porté par la direction (θ_r, ϕ_r). Pour les matériaux opaques dans l'infrarouge tels que les CRFP, l'absorptivité directionnelle $a_\lambda(\theta_i, \phi_i, T)$ est reliée à $\hat{\rho}_\lambda(\theta_i, \phi_i, T)$ par :

$$a_\lambda(\theta_i, \phi_i, T) = 1 - \int_{2\pi} f_\lambda(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i, T)\, cos\,\theta_r d\Omega_r = 1 - \hat{\rho}_\lambda(\theta_i, \phi_i, T) \quad (4)$$

Si la réponse optique du matériau est purement spéculaire, tout le flux réfléchi se concentre sur l'axe symétrique à la direction incidente par rapport à l'axe normale à la surface. Dans le cas des CFRP, $\phi_r = \phi_i = \phi$, et :

$$\hat{\rho}_\lambda(\theta_i, \phi_i, T) = \rho_\lambda\left(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_{r,} T\right) \quad (5)$$

Des études précédentes ont mis en avant les limites des modèles spéculaires pour représenter l'interaction laser/composite [4,6]. La présence de fibres en surface induit en effet un comportement diffusant, qui dépend notamment de l'angle d'incidence du laser. Dans [7], à l'aide de mesures effectuées avec des sphères intégrantes, à température ambiante et pour des longueurs d'onde de 0.5, 1, 1.5 et 2 µm, les auteurs montrent que la réflectivité directionnelle - hémisphérique augmente de 10 à 60 % pour des angles θ_i de 10 à 80°. De plus, grâce une étude qualitative similaire à celle menée par Grouve [4], il apparait que les profils de diffusion par la surface du composite, d'un flux incident avec un angle $\theta_i = 65°$, sont hautement dépendants de l'angle ϕ_i entre la direction des fibres et l'axe du laser. Par ailleurs, les niveaux de diffusion dépendent également de la quantité de matrice présente en surface. Dans [8], les auteurs enregistrent, à l'aide de sphères intégrantes, une diminution de 2 % de la réflectivité normale - hémisphérique d'un laminé de composites à renfort carbone, suite à un retrait par chauffage de la matrice polymère en surface. Cette différence est attribuée au fait que le polymère possède un indice de réfraction plus élevé entraînant une diminution du flux absorbé en surface.

L'influence de la température n'a en revanche été que peu étudiée expérimentalement. Seule l'étude de Grouve [4] mentionne un dispositif de mesure de réflectivité à 980 nm dans lequel la face inférieure d'un composite carbone/PPS est chauffée entre 20 et 300°C à l'aide d'un fil chauffant. Les différents modèles optiques proposés, basés sur des calculs de lancer de rayons [7] ou sur les Equations de Maxwell [8], font le postulat de propriétés globales du matériau invariantes avec la température. Or, au cours du procédé, la matrice atteint son point de fusion et la quantité de flux absorbé est susceptible de varier. De plus, pour les polymères mis en forme à hautes températures (au-dessus de 200°C), comme le PEEK, des pertes par émission propre peuvent apparaitre au cours du chauffage. Il semble donc pertinent de chercher à connaitre l'évolution des propriétés radiatives en température mais aussi sur tout le spectre infrarouge.

Dans cette étude, le comportement optique d'un composite carbone/ PEEK est étudié dans une gamme de longueur d'onde comprise entre 0.6 à 25 µm à l'aide d'un spectromètre infrarouge à Transformée de Fourier. Les profils de diffusion sont analysés pour des incidences de faisceau comprises entre 13 à 83° ainsi que pour différentes orientations de fibres. De plus, une cellule chauffante pouvant être adaptée sur une platine de mesure de réflectivité spéculaire en incidence normale est développée pour effectuer des mesures en température. Après validation de ses performances thermiques et optiques, les résultats obtenus sur le composite de 20 à 450°C sont présentés.

2. Procédure expérimentale

2.1 Le spectromètre Infrarouge à Transformée de Fourier

Les mesures optiques sont effectuées à l'aide d'un spectromètre à Transformée de Fourier. Les grandeurs radiatives accessibles selon les différentes platines de mesures utilisées sont :

- La réflexion et la transmission normale - normale ρ_{NN} et τ_{NN}, établies pour $\theta_i = \theta_r = 0°$,
- la réflexion et la transmission normale - hémisphérique ρ_{NH} et τ_{NN}, établies pour une incidence $\theta_i = 0°$ à l'aide de sphères intégrantes,
- la réflectivité spéculaire bidirectionnelle $\rho_\lambda(\theta_i, \theta_r, \phi)$ avec des angles incidents variables (13 à 83°).

En faisant varier l'angle de collecte lors de la mesure de $\rho_\lambda(\theta_i, \theta_r, \phi)$ pour différents angles de collecte, il est possible d'analyser les profils de diffusion pour différents angles d'incidence.
Enfin, du fait de la grande sensibilité des détecteurs dans le proche infrarouge, le diamètre du faisceau est limité à 1 mm dans cette étude.

2.2 Développement d'une cellule chauffante

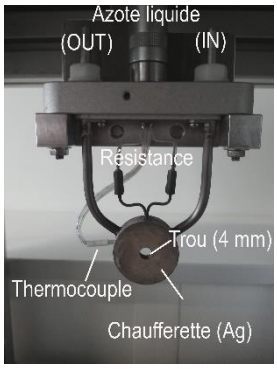
2.2.1 Description

Un élément chauffant Linkam HFS600 contrôlé électroniquement a été adapté au compartiment du spectromètre (Fig. 2a.). Le système final permet d'effectuer des mesures de réflectivité normale - normale jusqu'à 500°C avec des vitesses de chauffage atteignant 150°C/minute. L'échantillon est maintenu contre la paroi de la platine à l'aide d'une capsule en céramique Macor.
Le pilotage du système s'effectue à partir de la mesure de température d'un thermocouple de type K situé dans la masse d'acier. La température réelle de la zone centrale irradiée par le faisceau du spectromètre est étalonnée à l'aide de métaux purs dont le point de fusion est bien connu (Indium, Zinc, Etain). On obtient alors la loi :

$$T_{centre}\,[°C] = (1.38 + T_{thermocouple}[°C] \pm 0.1K) * 0.98 \qquad (6)$$

Enfin, l'homogénéité thermique de la zone éclairée a été étudiée par thermographie infrarouge à l'aide d'une caméra FLIR SC700 (InSb, 1.5 – 5.1 µm). La Fig. 2b. montre l'évolution de la variation de la température radiale D = $\frac{T-T_{min}}{T}$, mesurée à la surface d'une fenêtre de verre borosilicaté recouverte d'une peinture d'émissivité connue, pour trois températures de chauffage. On note que la déviation atteint 0.4 % à 200°C, correspondant à moins de 0.8 K, et par extrapolation, 1.2 K à 400°C. La zone illuminée peut donc être considérée dans les conditions d'homogénéité thermique requises pour la mesure de propriétés radiatives.

a)



b)

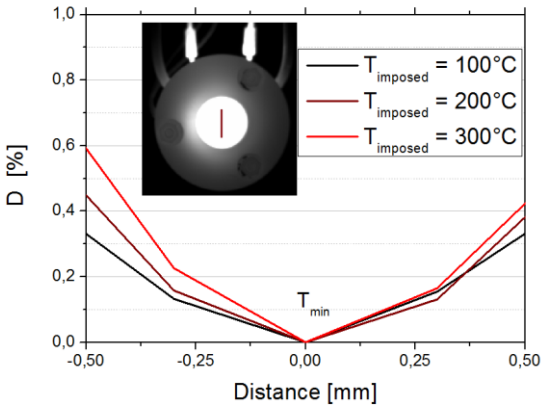


Fig. 2 : a) L'élément chauffant b) Déviation de température D = $\frac{T-T_{min}}{T}$ au centre d'une fenêtre verre borosilicaté pour des températures de consigne de 100, 200 et 300°C.

2.2.2. Etude des performances optiques de la cellule chauffante

Les performances optiques de la cellule chauffante sont étudiées à l'aide de deux matériaux opaques présentant des variations de réflectivité caractéristiques dans la gamme spectrale d'intérêt : un feuillet d'or, et une lame d'oxyde de vanadium dopée en aluminium, et déposée sur un substrat d'aluminium (VO_2Al : Al).

Feuillet d'or

L'or possède, comme d'autres métaux purs, une longueur d'onde pour laquelle son émissivité est invariante avec la température. D'après la deuxième loi de Kirchhoff, ce point caractéristique, appelé χ-point, peut être obtenue à partir de mesure de réflectivité. Dans [9], la réflectivité normale - normale d'une feuille d'or entre 20 et 500°C présente un point d'invariance à 500 nm. La Fig. 3a. montre l'évolution de ρ_{NN} mesurée grâce à la cellule chauffante développée dans cette étude. La

valeur est invariante à 508 nm ce qui concorde avec les résultats obtenus par Beran [9]. L'écart entre les niveaux de réflectivités découle de la différence d'état de surface entre les échantillons des deux études.

Oxyde de vanadium

Les dépôts d'oxyde de vanadium sont des matériaux thermochromes qui présentent des variations d'absorptivité pour des températures de chauffage basses (généralement autours de 68°) induite par une transition réversible métal/semi-conducteur [10]. Les propriétés optiques de la couche peuvent être modulées par la nature du substrat ou par dopage de la structure cristalline. Dans cette étude, l'échantillon étudié consiste en un film de VO_2 dopé en aluminium et déposé sur un substrat d'aluminium, rendant l'ensemble opaque. La Fig. 3b. montre l'absorptivité normale totale de la lame obtenue à partir de la mesure et de l'intégration de ρ_{NN} entre 7 et 14 µm. Une forte augmentation de l'absorptivité peut être observée autour de 75°C, ainsi qu'un comportement d'hystérésis sur la gamme 20 - 150°C, entre le chauffage et le refroidissement. L'allure des courbes obtenues est caractéristique de la transition métal/semi-conducteur des oxydes de vanadium [11], et fournit une information qualitative sur la capacité du système de mesure conçu dans cette étude à détecter les variations de réflectivité.

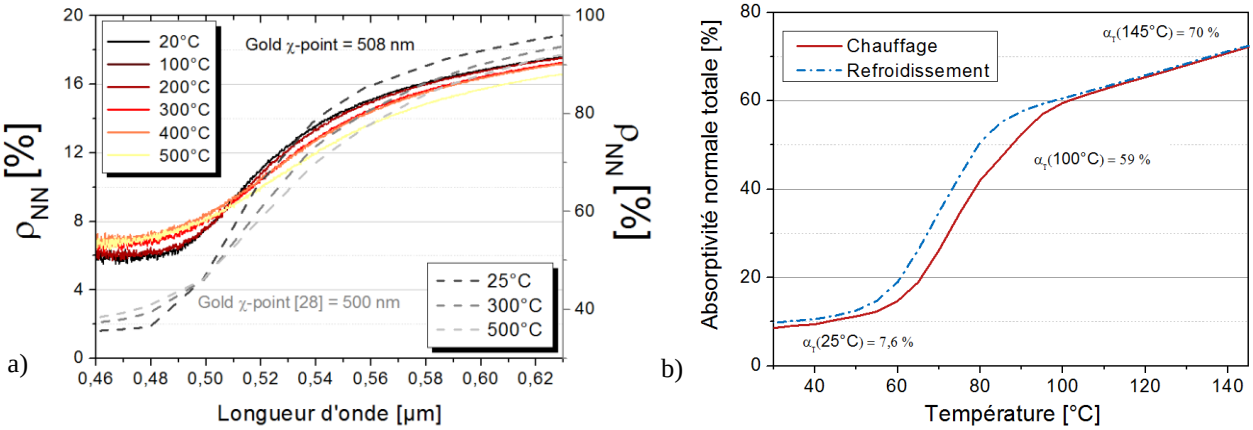


Fig. 3: a) Réflectivité normale/normale d'un feuillet d'or mesurée entre 20 et 500°C, b) Absorptivité totale normale d'un dépôt d'oxyde de vanadium dopé en aluminium sur un substrat d'aluminium.

Au final, l'étude de ces deux matériaux permet de conclure que l'introduction d'un porte-échantillon chauffant dans le compartiment du spectromètre n'induit pas de perturbations sur la détection des longueurs d'onde ni des variations de flux réfléchis. Le système développé peut donc être utilisé pour la mesure de réflectivité normale - normale entre 20 et 450°C.

3. Propriétés radiatives d'un composite carbone / PEEK APC2

3.1 Présentation du matériau

Le matériau étudié est la bande composite APC2 fournie par Cytec. Il est composé de fibres de carbone unidirectionnelles à 55 vol% et d'une matrice PEEK (PolyEtherEtherKetone). Le PEEK est un polymère semi-cristallin dont le point de fusion se situe autour de 343°C.

La topographie de la surface de l'échantillon a été analysée à l'aide d'un profilomètre optique Alicona. Elle se caractérise par une rugosité quadratique moyenne de 7.15 µm. Par ailleurs, la micrographie Fig. 4 réalisée sur une coupe de l'échantillon perpendiculairement à la direction des fibres montre que celles-ci sont aléatoirement distribuées dans la matrice. De plus, leur densité peut varier grandement sur une longueur de 500 µm, correspondant au rayon du faisceau utilisé dans cette étude.

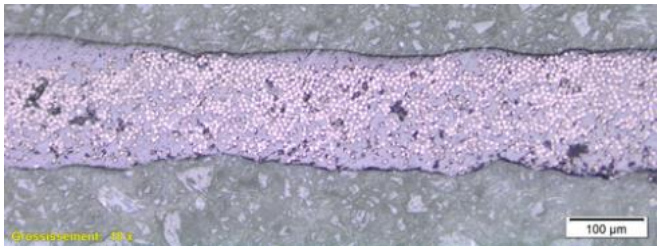


Fig. 4: Micrographie du composite APC2

L'influence de la disposition des fibres en surface sur la mesure de ρ_{NN} dans le visible et le proche infrarouge (0.6 à 25 µm) a été évaluée grâce à des mesures réalisées, à température ambiante, sur 25 échantillons. Pour λ = 1 µm, les dispersions sur les réflectivités normale - normale et normale - hémisphérique sont respectivement :

$$\rho_{NN}(20°C) = 1.75\ \% \pm 0.27\ \% \quad (7)$$

$$\rho_{NH}(20°C) = 8.9\ \% \pm 0.30\ \% \quad (8)$$

3.2 Etude angulaire

Les réflectivités spectrales bidirectionnelles, parallèlement aux fibres, $(\rho_\lambda(\theta_i, \theta_r, \phi = 0°))$ de l'APC2 ont été mesurées entre 0.6 et 25 µm pour quatre configurations spéculaires : $\theta_i = \theta_r$ =15°, 45°, 70° and 75° (Fig. 5). Tout d'abord, on observe que, entre 1 et 6 µm, dans chacun des cas, les valeurs de réflectivités ne sont pas sensibles à la longueur d'onde. Des pics de réflexion d'intensité modérée apparaissent ensuite entre 6 et 14 µm. Ils peuvent être attribués à la signature optique du squelette carboné de la matrice PEEK [12]. Enfin, au-dessus de 14 µm, les variations de $\rho_\lambda(\theta_i, \theta_r, \phi)$ avec la longueur d'onde sont plus importantes. On note également que le niveau moyen de réflectivité pour les incidences 15° et 45° est quasi-constant. Au contraire, pour les incidences rasantes 70 et 75°, celui-ci augmente avec la longueur d'onde, et un accroissement de 7 % est enregistré entre 1 et 25 µm. Les évolutions de réflectivités selon l'incidence indiquent que, pour établir le bilan thermique du chauffage d'un composite dans un procédé employant une diode laser ($\lambda \approx 1$ µm), il est nécessaire de calculer la quantité de flux radiatif absorbé dans les configurations spectrales et directionnelles exactes.

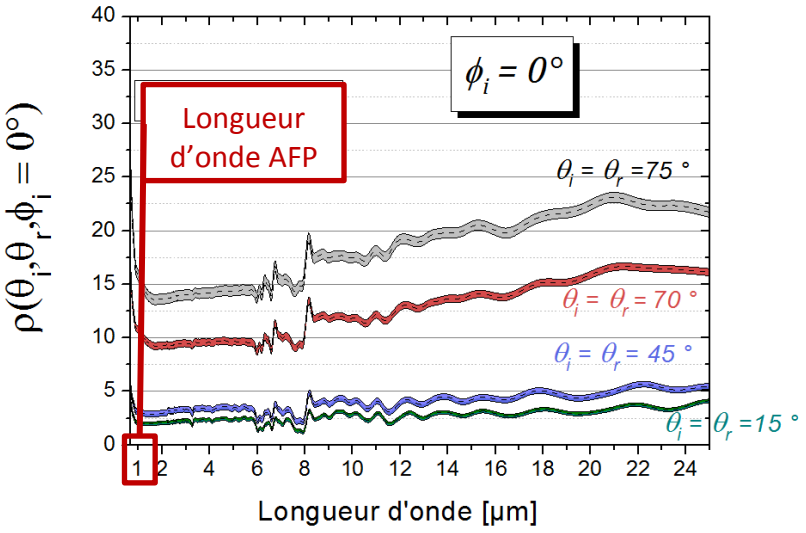


Fig. 5: Spectres de réflectivités spéculaires directionnelles de l'APC2 mesurés dans le sens des fibres ($\phi_i = 0°$) et pour les incidences $\theta_i = \theta_r$ =15°, 45°, 70° et 75°.

Les profils de diffusion ont été enregistrés pour différentes incidence θ_i en mesurant le flux réfléchi sur l'axe coplanaire θ_r et variant l'orientation des fibres. La Fig. 6 présente les résultats obtenus à $\lambda = 1\ \mu m$ pour les incidences $\theta_i = 15°$ (courbes bleues) et 75° (courbes vertes) par rapport à l'axe normal à la surface, et pour trois orientations de fibres : ϕ = 0°, 45° and 90°. On observe que, quelle que soit la direction des fibres, la réflectivité est plus élevée pour les grandes incidences, confirmant les observations ci-dessus. Par ailleurs, pour une incidence donnée, $\rho_\lambda(\theta_i, \theta_r, \phi))$ est maximale sur l'axe spéculaire $\theta_i = \theta_r$ puis décroit pour $\theta_r \neq \theta_i$. En incidence rasante, $\theta_i = 75°$, les profils de diffusion sont bien distincts selon les orientations des fibres et les valeurs les plus élevées sont obtenues lorsque les fibres sont orientées parallèlement au faisceau. Cet effet diminue pour les angles d'incidence plus faibles. Pour $\theta_i = 15°$, les pics de réflexion sont presque confondus pour les trois orientations, et l'étalement du faisceau autour de la direction principale est plus accentué pour des fibres orientées perpendiculairement (ϕ = 90°).

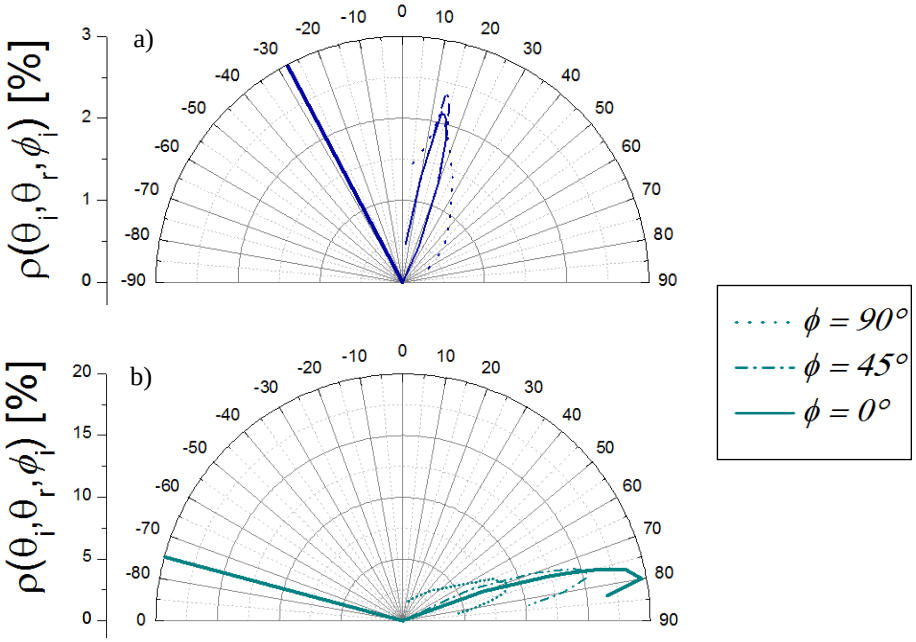


Fig. 6: Profils de diffusion pour une incidence de a) $\theta_i = 15°$ et b) $\theta_i = 75°$.

La mesure des réflexions non spéculaires permet d'observer les lobes de diffusion induits par l'interaction du faisceau avec la surface composite dont la rugosité est plus élevée que la longueur d'onde. La forme des profils de diffusion est aussi en accord avec l'étude qualitative menée par *Stokes-Griffin et al.* [7], dans des configurations équivalentes. De manière similaire, on observe que la forme et les niveaux de diffusion sont très sensibles à l'orientation des fibres. A température ambiante, la réponse optique du matériau en réflexion est donc pilotée par les fibres de carbone présentes en surface. La caractérisation angulaire d'un tel matériau met donc en lumière la nécessité de prendre en compte à la fois l'incidence et l'orientation des fibres, lors de l'étude des transferts thermiques dans un procédé impliquant des sources de chauffage infrarouge.

3.2 Etude en température

Le flux réfléchi par le composite APC2 a été mesuré entre 20 et 450°C grâce à la cellule chauffante présentée ci-dessus. La Fig. 7 montre les résultats obtenus pour les longueurs d'onde λ = 1, 2, et 2.5 µm. Il a été préalablement vérifié que le composite reste opaque sur toute la gamme de températures (τ_{NN} = 0). On observe que l'effet de la température est similaire dans les trois cas. Tout d'abord une diminution de 0.3 % de ρ_{NN} intervient entre la température de transition vitreuse de la matrice PEEK

(143°C) et son point de fusion (à partir de 343°C). Puis lorsque la température dépasse 350°C, une augmentation rapide des niveaux de réflectivité survient (de 1 % à 1.75% entre 350 et 400°C à 1 µm). Cette évolution peut être attribuée au changement de phase de la matrice PEEK. Cependant, son amplitude reste faible en face à l'erreur de mesure de l'instrument. En effet, cette erreur est estimée à 1%. La fusion de la matrice polymère a donc un impact négligeable sur les propriétés optiques du composite. Ce résultat concorde avec une campagne de caractérisation, menée par Stagg *et al.* [13] en 20 et 600°C, sur des échantillons de graphite. Les auteurs ont conclu que l'élévation de température n'influence pas les indices de réfraction des matériaux carbonés étudiés.
Les analyses thermiques et angulaires permettent d'avancer la conclusion que la réponse optique d'un polymère renforcé par des fibres de carbone est dominée par celles de ces dernières.

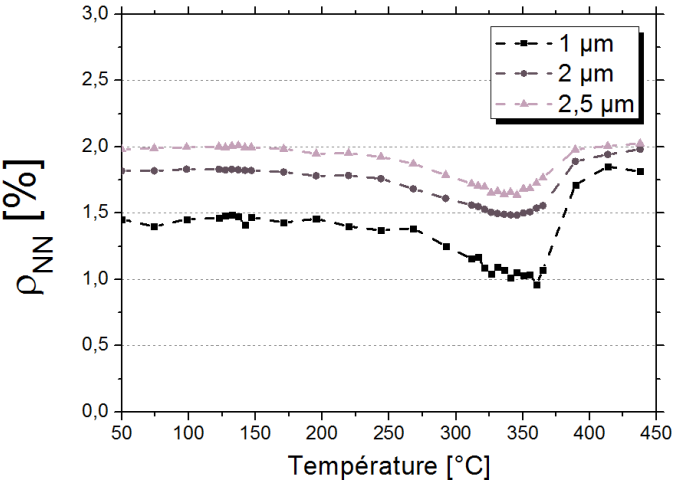


Fig. 7: Evolution de la réflectivité normale/normale du composite APC2 en fonction de la température relevée aux longueurs d'onde λ = 1, 2, et 2.5 µm, θ_i = 90°, ϕ =0°.

4. Conclusions

Les propriétés optiques spectrales et directionnelles d'un composite carbone / PEEK ont été étudiées par spectrométrie infrarouge entre 0.6 et 25 µm, et pour des incidences comprises entre 13 et 85°. L'étude des profils de diffusion en fonction de l'orientation du composite unidirectionnel montre que leur forme et les niveaux de réflectivité sont très sensibles à l'angle entre la direction des fibres et la celle du faisceau, à l'incidence du faisceau et à la longueur d'onde. On observe par exemple une augmentation de 2.5 à 20 % du pic de réflectivité lorsque l'incidence est variée de θ_i = 15 à 75°. Une analyse de l'influence de la température de l'échantillon a également été menée grâce au développement d'une cellule chauffante spécialement adaptée à l'instrument optique disponible. Après validation complète de ses performances métrologiques, l'outil a permis de mesurer la réflectivité normale - normale du composite entre 20 et 450°C. On peut alors conclure que l'effet du changement de phase de la matrice est négligeable et que le comportement optique global du matériau est piloté par les fibres de carbone.

Remerciements

Cette étude est réalisée dans la cadre de la chaire COMPETH de l'IRT Jules Verne portée par la Laboratoire de Thermique et d'Energie de Nantes, et avec le soutien de ses partenaires industriels : Airbus Group, Airbus Group Innovations, Daher and Solvay.

Références

[1] D.H-J Lukaszewicz, C. Ward, K.D Potter, « The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future ». *Compos. Part B Eng.*, Vol. 43, pp. 997-1009, 2012.

[2] C. Ageorges, *Fusion Bonding of Polymer Composites* Springer-Verlag London, pp. 105-133, 2002.

[3] C.M. Stokes-Griffin, P. Compston, « A combined optical-thermal model for near-infrared laser heating of thermoplastic composites in an automated tape placement process ». *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 75, pp; 104-115, 2014.

[4] W. Grouve, « Weld strength of laser-assisted tape placed thermoplastic composites » PhD thesis, University of Twente, 2012.

[5] R. Siegel, J.R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer - 3rd Edition* (Hemisphere, NY, 1992) pp.47-86.

[6] S. Grove, « Thermal modelling of tape laying with continuous carbon fibre- reinforced thermoplastic», *Composites*, Vol. 19, pp. 367-375, 1988.

[7] C.M. Stokes-Griffin, P. Compston, « Optical characterisation and modelling for oblique near-infrared laser heating of carbon fibre reinforced thermoplastic composites ». *Opt. Lasers. Eng.*, Vol. 75, pp. 1-11, 2015.

[8] A. Hohmann, A. ElMaklizi, F. Foschu, F. Voit, F. Bergmann, E.Simon, « Optics of carbon fiber-reinforced plastics – A theoretical and an experimental study ». *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf*. Vol. 180, pp. 70-76, 2016.

[9] A. Beran, « The Reflectance Behaviour of Gold at Temperatures up to 500°C» *TMPM Tschermaks Min. Petr. Mitt.*, Vol. 34, pp. 211-215, 1985.

[10] Soltani M, Kaye AB. *Properties and Applications of Thermochromic Vanadium Dioxide Smart Coatings*. (Elsevier Inc., 2015).

[11] H. Prod'homme, J. Ordonez-Miranda,Y. Ezzahri, J. Drevillon, K. Joulain K « Optimized thermal amplification in a radiative transistor ». *J. Appl. Phys*. Vol. 199, pp.1-6, 2016.

[12] H.X. Nguyen, H.Ishida, « Molecular analysis of the melting behaviour of poly (aryl-ether-ether-ketone) ». *Polymer* Vol. 27, pp. 1400-1405, 1986.

[13] B.J. Stagg, T.T. Charalampopoulos « Refractive indices of pyrolytic graphite, amorphous carbon, and flame soot in the temperature range 25° to 600°C ». Combust. Flame Vol. 94, pp. 381-396, 1993.