



**HAL**  
open science

## Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg

J. Fajoui, M. Mulle, Sylvain Fréour, Frédéric Jacquemin, Francis Collombet

► **To cite this version:**

J. Fajoui, M. Mulle, Sylvain Fréour, Frédéric Jacquemin, Francis Collombet. Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.61. hal-00597935

**HAL Id: hal-00597935**

**<https://hal.science/hal-00597935>**

Submitted on 2 Jun 2011

**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.

# Etude numérique de la diffusion d'humidité dans les matériaux composites instrumentés par des fibres optiques à réseaux de Bragg

## *Numerical study of moisture diffusion in composites instrumented by optical fiber Bragg gratings*

**J. Fajoui<sup>1</sup>, M. Mulle<sup>2</sup>, S. Freour<sup>3</sup>, F. Jacquemin<sup>3</sup>, F. Collombet<sup>2</sup>**

1 : [Jamal.Fajoui@ifsttar.fr](mailto:Jamal.Fajoui@ifsttar.fr), Dépt. MACS, IFSTTAR LCPC – Nantes, Route de Bouaye, 44341 Bouguenais, France

2 : [matthieu.mulle@iut-tlse3.fr](mailto:matthieu.mulle@iut-tlse3.fr), [francis.collombet@iut-tlse3.fr](mailto:francis.collombet@iut-tlse3.fr), ICA (Institut Clément Ader); 133c, avenue de Ranguel, F-31077 Toulouse, France

3 : [Sylvain.Freour@univ-nantes.fr](mailto:Sylvain.Freour@univ-nantes.fr), [Frederic.Jacquemin@univ-nantes.fr](mailto:Frederic.Jacquemin@univ-nantes.fr), Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (UMR CNRS 6183) ; LUNAM Université - Université de Nantes - Ecole Centrale de Nantes ; CRTT, 37 Boulevard de l'Université, BP 406, 44 602 Saint-Nazaire cedex, France

### Résumé

Afin de caractériser la diffusion d'humidité dans des composites unidirectionnels, Mulle et Collombet [4] ont réalisé des mesures à cœur par réseaux de Bragg. Cette méthode, historiquement dédiée à la mesure de déformations locales, permet également de suivre l'évolution de l'humidité à partir de la déformation qu'elle engendre en fonction du temps, à des endroits bien localisés, sans soustraire l'échantillon du milieu humide. La difficulté de cette méthode réside dans l'insertion du capteur au sein du matériau et au caractère intrusif des fibres optiques utilisées.

Dans ce travail, nous déterminons, à l'aide d'une simulation par Eléments Finis (Comsol ®), le gradient de la diffusion d'humidité et celui des états mécaniques induits au sein d'une plaque instrumentée par des capteurs à réseaux de Bragg. L'absorption d'humidité est supposée suivre une loi de Fick. L'idée est d'estimer, dans un premier temps, la perturbation générée par le capteur intrusif sur la diffusion afin, dans un second temps, d'exploiter les résultats expérimentaux et de traduire les mesures en teneur en eau.

### Abstract

For characterizing moisture diffusion in unidirectional composites, Mulle and Collombet [4] have carried out local tests using fibre Bragg grating (FBG) sensors. Initially, this method was developed to monitor the local strain. It allows analysing the humidity through the time-dependent strains measured in different regions, without subtracting the sample from the humid environment. The monitoring of moisture by FBG sensors is not easy to carry out establish because of the difficulty to insert FBG. Besides, the optical fibres constitute an intrusive constituent since they affect the internal strains profiles experienced by the sample.

The main objective of this work is to simulate, with Finite Element analysis (Comsol ®), the gradient of moisture and the gradient of hygro-mechanical strain generated inside a composite plate instrumented by the FBG sensors, during the transient part of the diffusion process. The diffusion of moisture is assumed to follow Fick's law. The first result is the identification of the local strains induced by the inserted optical fibers. Thereafter, it was possible to investigate the experimental results in order to determine the moisture content profiles.

**Mots Clés :** Fibre optique, composite M21T700, gradient d'humidité, gradient de déformation hygroscopique, Eléments Finis.

**Keywords :** Optical fibre, M21T700 composite, Moisture gradient, Hygroscopic strain gradient, Finite Element.

## 1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites à matrice polymère est en forte croissance dans de nombreuses applications industrielles. Durant leur vie en service, ces matériaux hydrophiles sont souvent exposés, pour de longues périodes, à des environnements humides, en présence d'un chargement mécanique. Or, l'humidité génère des champs de contraintes internes hétérogènes dans ce type de matériau. Ainsi, il est important de prévoir l'absorption d'eau dans la structure composite afin d'estimer la durabilité de celle-ci.

De nombreuses études expérimentales se sont intéressées à la diffusion de l'eau et aux contraintes hygroscopiques induites dans les matériaux composites. La méthode la plus simple consiste à peser l'échantillon test avant et régulièrement au cours de l'exposition au milieu humide [1]. L'eau absorbée puis stockée dans le matériau modifie sa masse. Ainsi la variation de la masse est-elle proportionnelle à l'humidité absorbée. Cette méthode conduit seulement à une estimation macroscopique ou « moyenne » de la teneur en eau au sein du matériau. Qui plus est, cette méthode nécessite de sortir régulièrement l'échantillon de son environnement ce qui peut conduire à des sources d'erreurs non négligeables. Tsai et al. [2] ont développé une méthode permettant de supprimer les incertitudes de pesée et de séchage en conservant l'échantillon dans son environnement tout au long de l'essai. Cette approche est basée sur la mesure de déformation hydrique puis la connaissance des coefficients d'expansion hygroscopique permet de remonter aux teneurs en eau. Cependant, les informations délivrées restent globales. D'autre part, il est nécessaire de connaître l'évolution des coefficients de dilatation hygroscopique avec l'humidité pour traiter rigoureusement les résultats de mesure. Or, dans la partie transitoire du processus de diffusion, ces derniers varient dans l'épaisseur du matériau [3].

Récemment, Mulle et Collombet [4] ont réalisé des mesures à cœur par des capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg (FORB) pour caractériser la diffusion d'humidité dans des composites unidirectionnels. Cette méthode, historiquement dédiée à la mesure de déformation, permet également de suivre l'évolution de l'humidité à partir de la déformation qu'elle engendre, en fonction du temps, à des endroits bien localisés, sans soustraire l'échantillon du milieu humide. La difficulté de cette méthode réside dans l'insertion du capteur au sein du matériau et au caractère intrusif des fibres optiques utilisées. Elle ne permet cependant de mesurer qu'en des points précis : là où le réseau de Bragg est inséré. Par contre, mesurer expérimentalement le gradient de l'humidité et / ou celui de la déformation hygroscopique reste encore difficile à réaliser.

Dans ce papier, nous nous sommes intéressés au gradient de l'humidité à travers la teneur en eau et de la déformation hygroscopique induite au sein d'un composite M21T700 instrumenté par des capteurs à FORB dans le sens des fibres de renforts. Des simulations, par Éléments Finis (Comsol ®), de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique ont été réalisées. L'absorption d'humidité est supposée suivre une loi de Fick. L'idée est d'estimer, dans un premier temps, la perturbation générée par le capteur intrusif sur la diffusion afin, dans un second temps, d'exploiter les résultats expérimentaux et de traduire les mesures en teneur en eau.

## **2. Démarche expérimentale**

Mulle et Collombet [4] ont utilisé les réseaux de Bragg (RB) pour suivre les variations d'humidité (RB HR), de déformation (RB Déf) et de température (RB T) dans une éprouvette constituée d'un empilement unidirectionnel de 56 plis HexPly M21-T700. La Figure 1 présente les dimensions de l'échantillon test et le positionnement des capteurs.

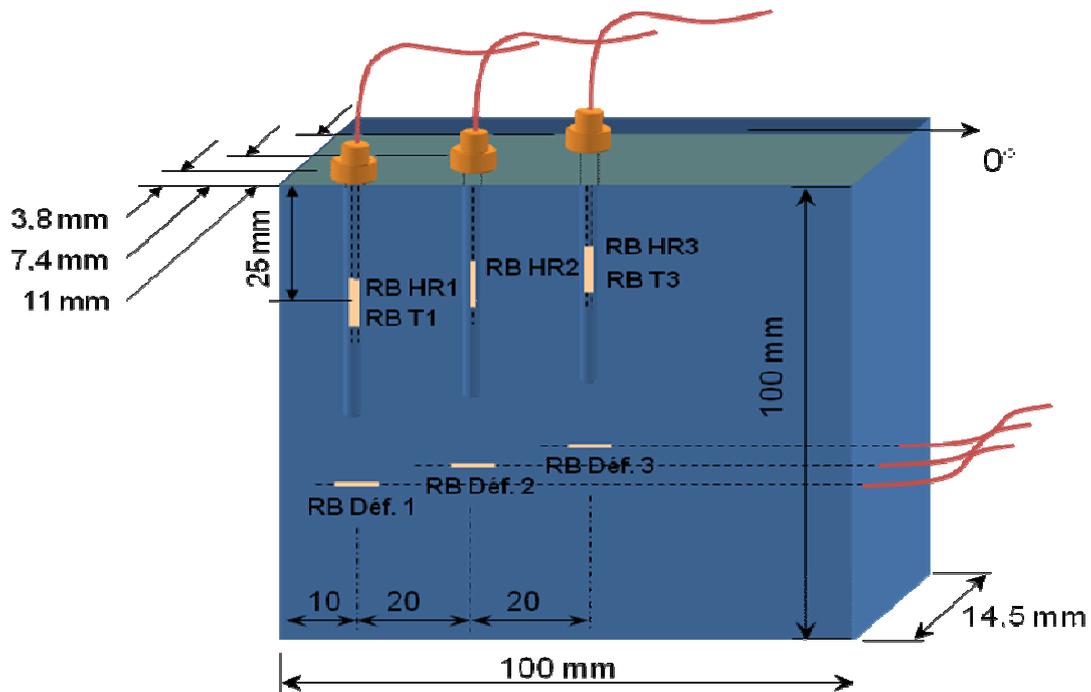


Figure 1 : Schéma et instrumentation de la plaque en HexPly M21 T700  $[0^\circ]_{56}$ . [4]

Les capteurs d'humidité relative ont été revêtus d'une couche de polyimide (de  $60 \mu\text{m}$  d'épaisseur). L'éprouvette a été disposée dans un récipient rempli d'eau déminéralisée dont le niveau était maintenu juste en dessous de sa face supérieure. Avant cela, les faces parallèles aux renforts ont été étanchées à l'aide d'une couche mince d'aluminium afin de forcer une diffusion dans la direction des fibres de renfort. Si l'objectif ultime de l'étude est bien de caractériser la diffusion dans chaque direction du stratifié, dans un premier temps, les auteurs se sont attachés uniquement au sens des fibres sachant qu'il s'agit de la direction préférentielle de diffusion de l'humidité en raison des conditions de l'essai. Les mesures ont été acquises quotidiennement grâce à un interrogateur de longueur d'onde et un analyseur de spectres optiques.

### 3. Modélisation

Dans cette partie, nous avons construit un modèle qui reproduit les phénomènes physiques ayant lieu durant l'expérience décrite au paragraphe 2.

#### 1.1. Modèle de la diffusion

Dans ce travail, nous avons utilisé un modèle qui repose sur la loi de Fick afin de calculer la cinétique d'absorption d'eau par l'éprouvette. Cette loi est similaire à la loi de Fourier pour la diffusion de la chaleur. La loi de Fick est basée sur l'hypothèse de déplacement libre des molécules d'eau sous le seul effet du gradient de concentration (ce n'est pas le cas de modèle plus élaborés tels que celui de Langmuir). Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial c(\mathbf{X}, t)}{\partial t} + \text{div} \vec{q}(\mathbf{X}, t) = 0 \quad (1)$$

où  $c(\mathbf{X}, t)$  est la concentration en eau dans le matériau en un point  $\mathbf{X}=(x,y,z)$  à un instant  $t$  et  $\vec{q}(\mathbf{X}, t)$  est le vecteur flux d'humidité au point  $\mathbf{X}$  et à un instant  $t$ .

La loi de Fick est une traduction de la proportionnalité entre le flux d'humidité traversant un matériau et le gradient de concentration s'exerçant sur ce dernier. Le flux d'humidité s'écrit :

$$\vec{q}(X, t) = -D(X, t) \overrightarrow{\text{grad}} c(X, t) \quad (2)$$

où  $D(X, t)$  est le tenseur de diffusivité qui dépend, en toute rigueur, de la position du point  $X$  et du temps  $t$ . En effet, la littérature rapporte que le coefficient de diffusion d'une matrice époxy dépend de son état de déformation mécanique. Celui-ci étant, quant à lui, affecté par la diffusion de l'humidité [5]. Un exemple d'application de ce concept d'étude du comportement hygromécanique multi-échelle couplé de structures composites peut être trouvé dans Youssef et al. [3]. Pour simplifier, le coefficient de diffusion sera considéré indépendant de l'espace et du temps, dans le cadre de la présente étude. Dans le cas d'une plaque plane de dimensions infinies et d'épaisseur  $e$ , la loi unidirectionnelle de Fick s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_3 \frac{\partial^2 c}{\partial x_3^2} \quad (3)$$

où  $c$  est la teneur en eau dans la plaque en %, fonction de la variable d'espace  $x_3$  et de temps  $t$  et  $D_3$  ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ), le coefficient de diffusion dans la direction transverse  $x_3$ .

Les conditions initiales et aux limites sont les suivantes :

- $c = c_i$  pour  $0 \leq x_3 \leq e$  et  $t < 0$
- $c = c_s$  pour  $x = 0$  ou  $x = e$  et  $t > 0$

Les indices  $i$  et  $s$  représentent respectivement les valeurs de la teneur à l'instant initial et à saturation du processus de diffusion.

## 1.2. Contraintes hygroscopiques

L'absorption de l'humidité au sein du matériau composite induit un gonflement du matériau et des contraintes hygroscopiques. Ces contraintes sont données par la loi de comportement hygro-élastique :

$$\sigma = L : (\varepsilon - \beta \Delta c) \quad (4)$$

où  $L$  est le tenseur d'élasticité,  $\varepsilon$  est le tenseur de déformation,  $\beta$  est le tenseur des coefficients de dilatation hygroscopique et  $\Delta c$  est la variation de la teneur en eau.

## 1.3. Modélisation par Eléments finis

La résolution de l'équation différentielle de Fick a été effectuée avec la méthode des Eléments Finis via le logiciel Comsol 3.5 ®. Pour des raisons de temps de calculs, nous avons commencé par réaliser des simulations 2D. Nous considérons une plaque carrée de 100 mm de largeur en HexPly M21 T700. La position des capteurs (réseaux de Bragg) est identique à celle de la Figure 1. Le maillage est réalisé à l'aide d'éléments triangulaires (Figure 2).

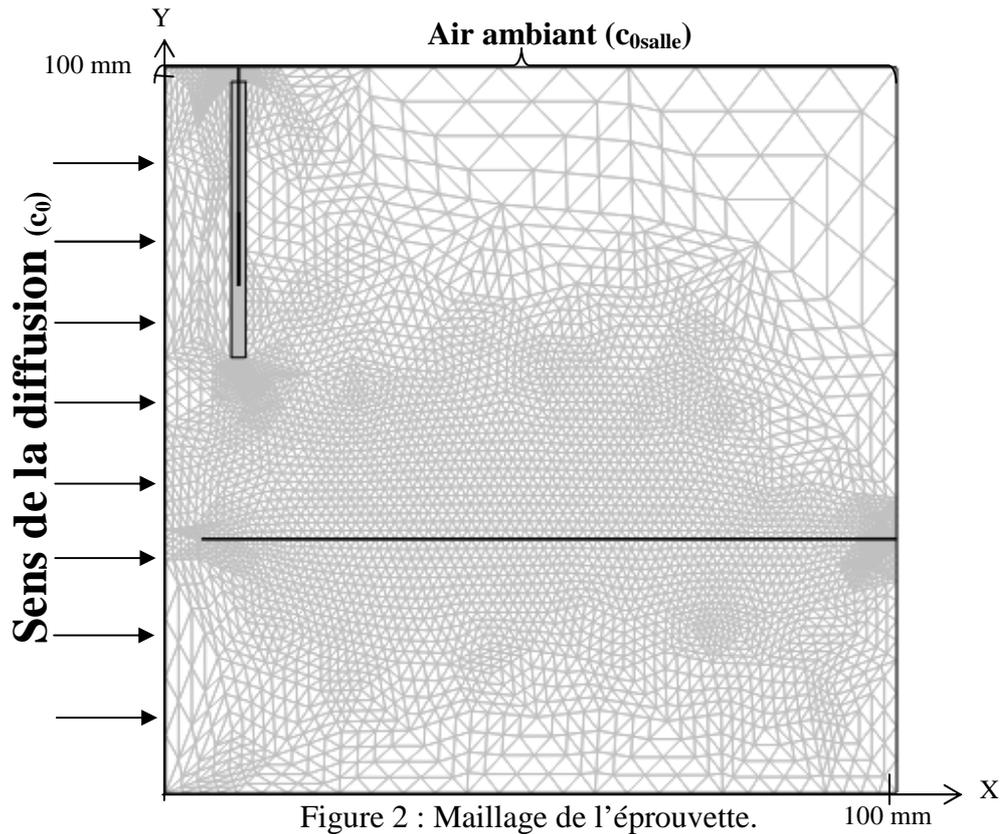


Figure 2 : Maillage de l'éprouvette.

Le coefficient de diffusion  $D$ , la teneur en eau pour la face à l'air libre ( $c_{0salle}(\%)$ ) et la teneur en eau ( $c_0(\%)$ ) pour les faces immergées sont présentés dans le Tableau 1. Les Tableaux 1, 2 et 3 présentent les propriétés hygromécaniques du matériau composite, de la fibre optique et du polyimide, respectivement.

Matériau	$D$ (mm <sup>2</sup> /s)	$c_0(\%)$	$c_{0salle}(\%)$	$\beta_{11}$	$\beta_{22}$	$\beta_{33}$
T700/M21	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,25	0,125	0,01	0,18	0,18
RB	0	0	0	0		
Polyimide	$1,5 \cdot 10^{-2}$	--	--	0,05		
Cavité	$1,5 \cdot 10^{-1}$	--	--	0		

Tableau 1 : Propriétés hygroscopique

$E_{11}$ (GPa)	$E_{22}$ (GPa)	$E_{33}$ (GPa)	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$	$\nu_{13}$	$G_{12}$ (GPa)	$G_{23}$ (GPa)	$G_{13}$ (GPa)
142	8,4	8,4	0,33	0,33	0,4	4,6	2,75	4,6

Tableau 2 : Caractéristiques mécaniques du T700/M21 [6]

fibre optique SMF28		polyimide	
$E$ (GPa)	$\nu$	$E$ (GPa)	$\nu$
73,1	0,17	2,45	0,35

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques de la fibre optique SMF28 et du polyimide [7]

#### 1.4. Analyses numériques

Dans cette partie, nous présentons les simulations 2D proches du cas réel de l'expérience décrite au paragraphe 1 (Figure 1). Une cavité a été considérée autour du réseau de Bragg et du polyimide. Dans une première validation, nous l'avons considérée comme un matériau de diffusivité hygroscopique élevée et de module de Young infiniment faible. Nous avons supposé une continuité de la teneur en eau entre le matériau composite (T700/M21) et la cavité ; i.e. la concentration dans le T700/M21 (notée  $c$ ) est égale à celle de la cavité (notée  $c_c$ ), à l'interface ( $c=c_c$ ). Le polyimide est un matériau diffusant de l'humidité. Sa diffusivité est plus forte que celle du matériau composite T700/M21. Ainsi, il faut gérer la discontinuité de la teneur en eau aux frontières entre le polyimide et de la cavité. Nous avons considéré un facteur de 1,5 entre la teneur en eau du T700/M21 et celle du polyimide (notée  $c_p$ ) ( $c_p=1,5*c=1,5*c_c$ ).

Nous présentons sur la Figure 3.a les résultats de simulation 2D du T700/M21 non-instrumenté par des fibres optiques. Ces résultats nous permettront d'étudier l'influence et les perturbations causées par les capteurs intrusifs sur la diffusion de l'humidité et la déformation hygroscopique. Le profil de la teneur en eau dépend des conditions aux limites au bord du matériau et du coefficient de diffusion. Le temps pour atteindre la saturation dépend des propriétés du matériau (coefficient de diffusion) et de la géométrie de l'éprouvette, la teneur à saturation dépend quant à elle des conditions aux limites et initiales. La déformation longitudinale est proportionnelle à la variation de la teneur en eau (Figure 3.b).

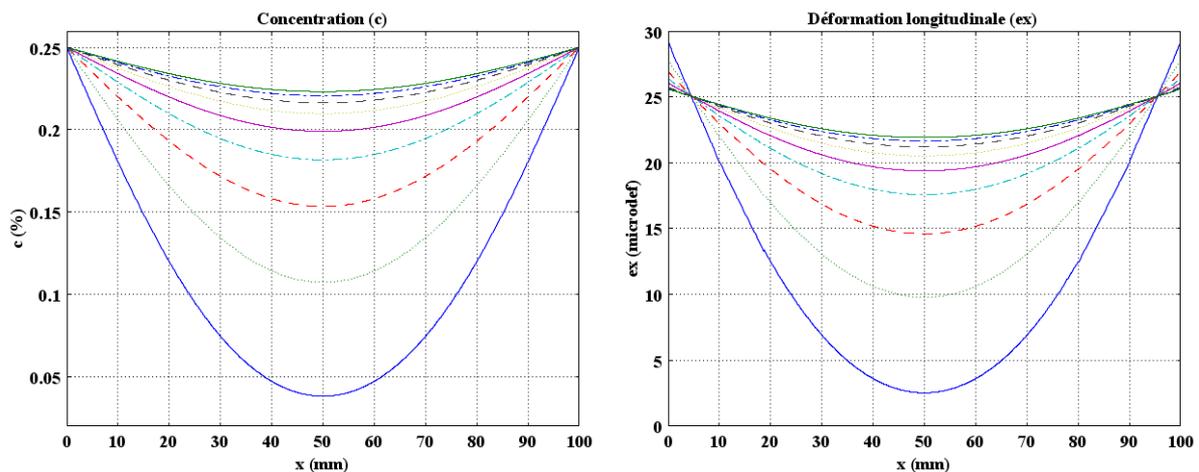


Figure 3 : Evolution de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique longitudinale dans différents points du matériau suivant (ox) à  $z = 35$  mm

La Figure 4 présente l'évolution de la teneur en eau suivant l'axe (ox) à :  $z = 75$  mm, et,  $8 \text{ mm} < x < 12 \text{ mm}$  et  $z = 75$  mm. Nous avons choisi ces régions afin d'effectuer une comparaison avec les résultats expérimentaux [4]. La teneur en eau, pour les temps considérés, est continûment décroissante dans le matériau composite jusqu'à la cavité où elle est constante. Nous obtenons un saut entre la cavité et le polyimide. Ce saut est dû à la relation :  $c_p=1,5c_c$ . La teneur en eau présente des discontinuités au niveau du réseau de Bragg qui est considéré imperméable. Ainsi le flux de concentration ( $\Phi = D \frac{\partial c}{\partial x}$ ) est-il nul au voisinage des réseaux de Bragg.

L'évolution de la déformation longitudinale hygroscopique est donnée par la Figure 5 suivant l'axe (ox) au point : a-  $z = 35$  mm, et b-  $8 \text{ mm} < x < 12 \text{ mm}$  et  $z = 35$  mm. La fibre optique est

noyée dans le matériau, sans gaine polyimide, entre  $x = 5$  mm et  $x = 100$  mm. Ainsi, la Figure 5 présente la déformation longitudinale hygroscopique captée par la fibre optique à réseau de Bragg (FORB). A  $x = 10$  mm et  $z = 35$  mm, nous obtenons une variation de la déformation entre 0 et 20  $\mu\text{def}$ . Les simulations font ainsi apparaître des résultats proches des valeurs expérimentales publiées dans [4].

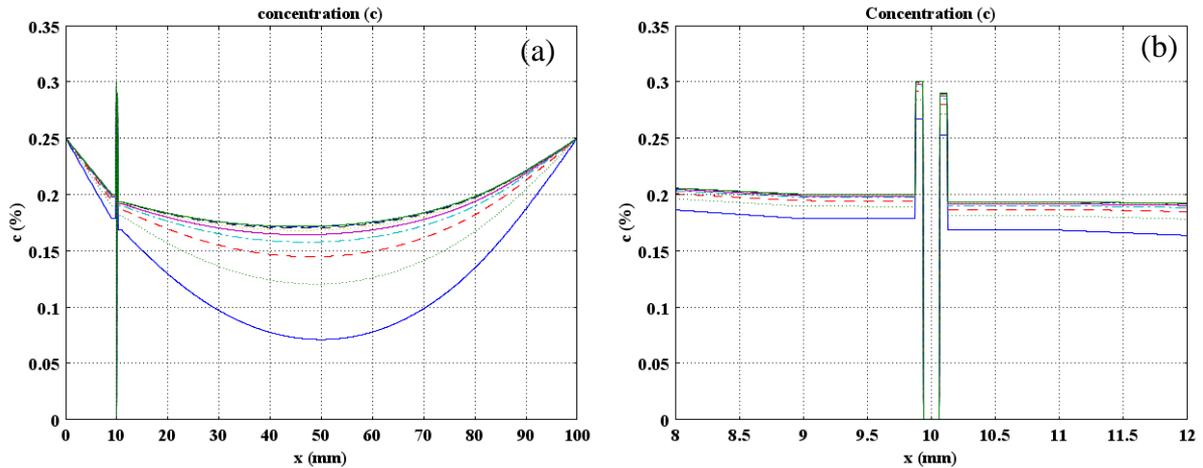


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau dans différents points du matériau suivant  $(ox)$  à : a-  $z = 75$  mm ; b-  $8 \text{ mm} < x < 12 \text{ mm}$  et  $z = 75 \text{ mm}$

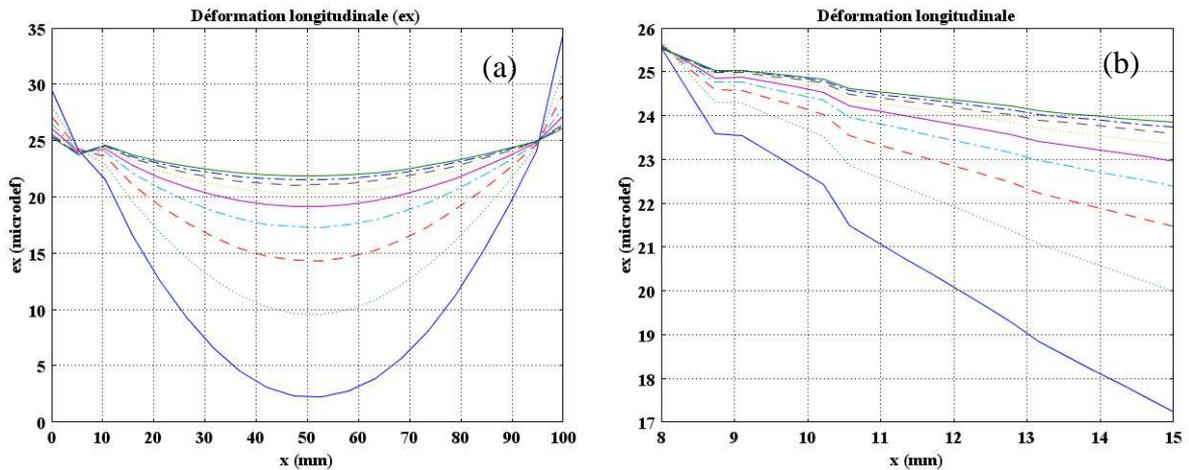


Figure 5 : Evolution de la déformation hygroscopique longitudinale suivant  $(ox)$  à : c-  $z = 35$  mm ; d-  $8 \text{ mm} < x < 15 \text{ mm}$  et  $z = 35 \text{ mm}$

Les Figures 6-7 donnent l'évolution de la teneur en eau et de la déformation longitudinale hygroscopique suivant  $(ox)$  à  $z = 75$  mm et à  $z = 35$  mm. Nous comparerons les résultats de ces figures avec les résultats expérimentaux [4].

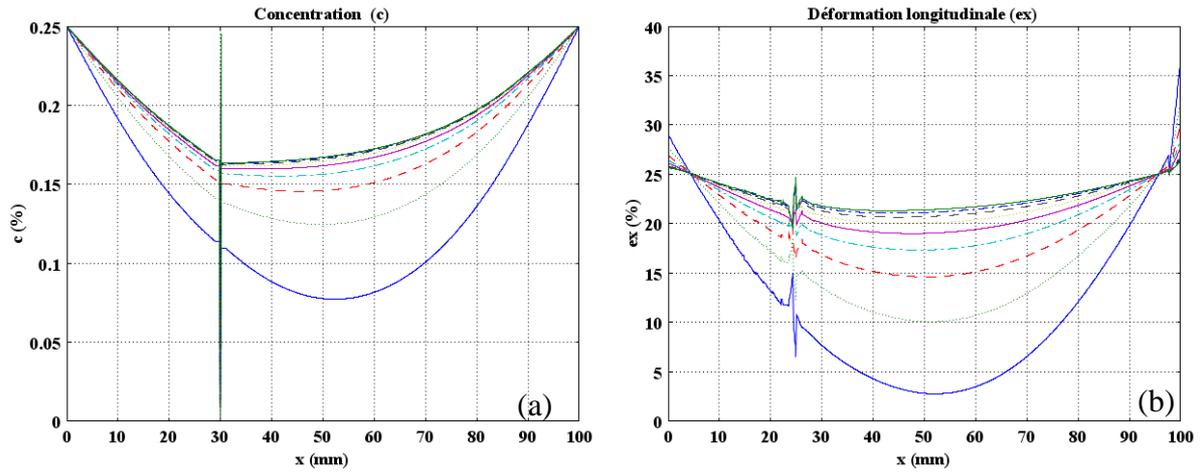


Figure 6 : Evolution de la teneur en eau (a) et de la déformation hygroscopique longitudinale (b) dans différents points du matériau suivant (ox) et dans les positions des capteurs de l'humidité et de la déformation

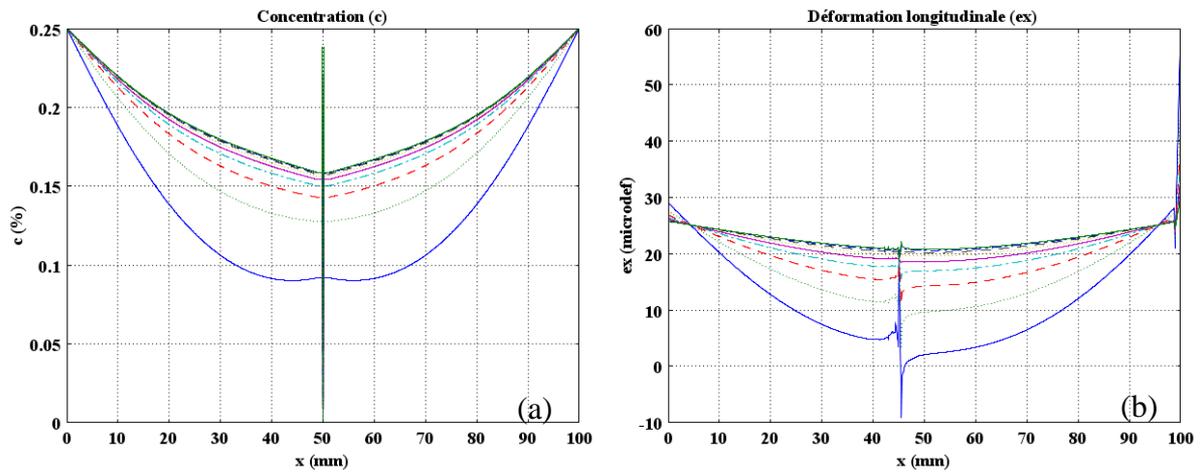


Figure 7 : Evolution de la teneur en eau et de la déformation hygroscopique longitudinale dans différents points du matériau suivant (ox) et dans les positions des capteurs de l'humidité et de la déformation

#### 4. Confrontations expériences - simulations : Premières exploitations

Dans cette partie, nous présentons une première validation de nos résultats de simulations. Les résultats expérimentaux nous fournissent l'évolution de l'humidité relative (HR) et de la déformation longitudinale hygroscopique dans différents points du matériau composite T700/M21 (Tableaux 5 et 6).

Nos simulations nous donnent la teneur en eau qui est liée à l'humidité relative à travers la relation :

$$c = b(HR)^a \quad (5)$$

$a$  et  $b$  sont deux constantes intrinsèques au matériau. Ainsi, nous devrions déterminer les constantes  $a$  et  $b$  afin de valider les résultats numériques avec les résultats expérimentaux. En attendant, nous archivons les comparaisons dans le Tableau 4. La teneur en eau simulée

mériterait d'être affinée à partir de données identifiées et représentatives (coefficient de diffusion et teneur à saturation) du comportement diffusif du T700/M21.

Le Tableau 5 permet de comparer les déformations hygroscopiques simulées et mesurées à la fin de l'expérience. Nous constatons que l'écart relatif est d'environ 20 % entre les résultats expérimentaux et simulés. Cet écart peut être réduit en jouant sur les conditions initiales, notamment la teneur en eau au bord (on revient à la problématique d'une bonne identification du comportement diffusif du T700/M21).

	Cas 1 : x = 10 mm, z = 75 mm	Cas 2 : x = 30 mm, z = 75 mm	Cas 3 : x = 50 mm, z = 75 mm
HR (%) expérimentale	85	60	
Teneur en eau (%) simulée	0,2	0,17	0,16

Tableau 4 : HR expérimentale et teneur en eau (%) simulée en différents points.

	Cas 1 : x = 10 mm, z = 35 mm	Cas 2 : x = 30 mm, z = 35 mm	Cas 3 : x = 50 mm, z = 35 mm
Déformations longitudinales expérimentales ( $\mu\text{def}$ )	20	17	12
Déformations longitudinales simulées ( $\mu\text{def}$ )	24,9	22	21
Ecart relatif (%)	19	22	42

Tableau 5 : déformation hygroscopique longitudinale expérimentale et simulée.

## 5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons simulé la diffusion de l'humidité dans un matériau composite instrumenté par des fibres optiques à réseaux de Bragg. La loi de Fick a été utilisée pour modéliser les profils de la teneur en eau en régime transitoire. Son équation différentielle a été résolue par la méthode des Eléments Finis en utilisant le logiciel Comsol®. L'évolution des déformations hygroscopiques a également été simulée. Une première confrontation entre les résultats de simulations et les résultats expérimentaux semble encourageante.

Afin d'approfondir ce sujet, des simulations 3D et des essais expérimentaux seront réalisées afin de compléter les résultats actuels.

## Références

- [1] G.S. Shen, C.H Springer, «Moisture absorption and desorption of composite materials», *Journal of Composite Materials*, Vol 10, pp. 2-20, 1976.
- [2] C.L. Tsai, I.T Hung, T.W. Chang, «Characterisation of principal diffusivities of composites by suspension method», *Composite Science and Technology*, Vol. 66, pp. 2837-2843, 2006.
- [3] G. Youssef, S. Freour, F. Jacquemin, «Stress dependent moisture diffusion in composite materials», *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, pp. 1621-1637, 2009.
- [4] M. Mulle, F. Collombet, «Mesures à coeur par réseaux de Bragg pour caractériser la diffusion d'humidité dans les composites», *JNC 16 Toulouse*, Vol 10, pp. 2-20, 2009.
- [5] S. Neumann, G. Marom, «Stress dependent moisture diffusion in composite materials», *Polymer Composite*, 1985.
- [6] M. Ilyas, F. Lachaud, C. Espinosa, L. Michel, M. Salaun, «Modélisation en dynamique rapide du délaminage des composites à l'aide d'Eléments Finis cohésifs», *JNC 16 Toulouse*, 2009.
- [7] F. Jacquemin, S. Fréour, R. Guillén, «Analytical modeling of transient hygro-elastic stress concentration – Application to embedded optical fiber in a non-uniform transient strain field», *Composites Science and Technology*, Vol 66, pp. 397-406, 2006.