



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Université Amar Thelidji- Laghouat

**FACULTE: Science et Technologie**  
**DEPARTEMENT : Génie Mécanique**

**DOMAINE : Sciences et Technologies.**

**FILIERE : Génie Mécanique**

**OPTION : Génie Des Matériaux**

### **MEMOIRE DE MASTER**

#### **Thème**

*Modélisation de la diffusion en présence de  
l'endommagement dans un composite à matrice  
polymérique*

**Présenté par :**

**Bensahraoui Soufiane**

**Mohammed Ziad Benterkia**

**Jury de soutenance :**

**Encadre Par :**

***Hocine Bourennane***

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>qualité</b>
Ahmed yousfi	Pr	Président
Djelloul Gueribiz	Pr	Examineur
Hocine Bourennane	Dr	Promoteur

**Promotion : 2021/2022**



## **Remerciements**



*Nos remerciements vont d'abord à Allah, Le tout puissant,  
Pour nous avoir donné la volonté Et le courage pour accomplir  
Nos études.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements  
Et ma gratitude au superviseur*

***Hocine bourennane***

*L'encadrer pendant la période du mémoire de fin d'études  
De nous avoir aidés durant ce travail*

*Ainsi nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de  
jury d'avoir accepté de lire ce mémoire*

***Mr Djelloul Gueribiz , Mr Ahmed yousfi***

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué  
De près ou de loin à la réalisation de ce travail*

# *Sommaire*

## **Remercîment**

## **Résumé**

## **Introduction générale..... 1**

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

### Généralités sur les matériaux composites..... 3

### Introduction..... 3

### I.1 Constituants de matériaux composites..... 4

#### I.1.1 La matrice..... 4

#### I.1.2 Résines époxyde..... 4

#### I.1.3 Résines polyester..... 4

#### I.1.4 Matrices en résine des phénoliques..... 5

#### I.1.5 Matrices en résines Polyamides..... 5

#### I.1.6 Matrices métalliques..... 5

#### I.1.7 Matrice en céramique..... 5

#### I.1.8 Matrices en carbone..... 5

### I.2 Les renforts..... 6

#### I.2.1 Fibre d'Aramide..... 6

#### I.2.1- Fibres de carbone et de graphite..... 7

#### I.2.2 Fibres de verre..... 8

#### I.2.3 Les fibres de bore..... 9

#### I.2.4 Fibre de silice..... 9

#### I.2.5 Fibres de polyéthylène de haut module..... 9

I.2.5 Fibres de polyéthylène de haut module.....	9
I.3 Les Types de matériaux composites.....	10
I.3.1 Les composites à grande diffusion.....	10
1.3.2. Les composites hautes performances.....	10
1.3.3. Composite stratifié.....	10
1.3.4 Composite sandwich.....	11
I.4 Vieillessement par l'humidité des matériaux polymères et composites à matrice polymère.....	12
I.4. 1 Les mécanismes d'absorption.....	12
I.4.2 Le transport de l'eau par le volume libre.....	12
I.4.3 L'interaction eau-polymère.....	13
I.4.4 Les effets induits par la diffusion d'eau.....	13
I.4.5 Le Gonflement.....	13
I.5 Modélisation de la diffusion par des approches découplées.....	14
I.5.1 Modèle de Fick.....	14
I.5.2 Modèle de Carter et Kibler.....	15
 <b>Chapitre II : Modélisation de l'effet de l'endommagement sur le comportement diffusif dans un matériau composite à fibre imperméable uniforme</b>	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Diffusion dans le composite sain.....	17
II.3. Diffusion dans le composite endommagé pour une fissure transverse.....	21
II.3.1 La teneur à l'interface matrice / fissure.....	22
II.4. Méthode d'identification dans le cas d'un comportement Dual Fick.....	25
II.5. Cas d'une fissure décohesion.....	27
II.6 Conclusion.....	30

# **Chapitre III Modélisation de l'effet de l'endommagement sur le comportement diffusif dans un matériau composite à fibre imperméable aléatoire**

III.1 Introduction.....	31
III.2 Diffusion dans le composite sain.....	31
III.3. Cas d'une fissure transverse aléatoire.....	35
III.4 Cas d'une fissure décohésion aléatoire.....	40
III.5 Comparaison entre les résultats de composite uniforme et composite aléatoire	44
Conclusion générale.....	47
Références Bibliographiques.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VIII

## Résumé

Dans cette étude nous allons aborder le problème de modélisation du comportement diffusif en présence d'endommagement par la fissuration, Cet endommagement sera représenté par une fissure transverse et décohésion de différentes type de fraction volumique d'un composite uniforme et aléatoire. Nous proposons une modélisation de la diffusion dans la fissure basée sur une approche thermodynamique tout en restant dans le cadre d'une approche découplée. Nous avons abordé le problème de la diffusion d'humidité dans un composite en présence d'endommagement ce présentant sous la forme d'une fissure transverse et décohésion. La modélisation de la diffusion dans le composite est supposée régie par la loi de Fick. Les résultats de modélisation de la cinétique de diffusion d'humidité dans les composites montrent une sensibilité accrue à la présence d'endommagement dans le cas du composite à fissure transversale par rapport au cas du composite à fissure décohésion. En plus un fort comportement diffusif est affiché surtout pour un composite uniforme par rapport un composite aléatoire.

## Abstract

In this study we will address the problem of modeling the diffusive behavior in the presence of damage by cracking, This damage will be represented by a transverse crack and decohesion of different types of volume fraction of a uniform and amorphous composite. We propose a modeling of the diffusion in the crack based on a thermodynamic approach while remaining within the framework of a decoupled approach. We approached the problem of the diffusion of moisture in a composite in the presence of damage this presenting in the form of a transverse crack and decohesion. The modeling of the diffusion in the composite is supposed to be governed by Fick's . The modeling results of the kinetics of moisture diffusion in the composites show an increased sensitivity to the presence of damage in the case of the composite with transverse crack compared to the case of the composite with decohesion crack. In addition a strong diffusive behavior is displayed especially for a uniform composite compared to an aleatoire composite.

## ملخص

في هذه الدراسة سوف نتناول مشكلة نمذجة السلوك الانتشاري في حالة وجود ضرر ناتج عن التصدع، وسيتم تمثيل هذا الضرر من خلال صدع عرضي وفك التماسك لأنواع مختلفة من الكسر الحجمي لمركب موحد وغير متبلور. نقترح نمذجة الانتشار في الكراك بناءً على نهج ديناميكي حراري مع البقاء ضمن إطار نهج منفصل. لقد اقتربنا من مشكلة انتشار الرطوبة في مركب في وجود ضرر هذا يظهر في شكل صدع عرضي وفك التماسك. من المفترض أن تخضع نمذجة الانتشار في المركب لقانون Fick ، تُظهر نتائج النمذجة الخاصة بحركية انتشار الرطوبة في المركبات حساسية متزايدة لوجود التلف في حالة المركب مع عرضي. الكراك مقارنة بحالة المركب مع صدع فك التماسك. بالإضافة إلى ذلك، يتم عرض سلوك انتشاري قوي خاصة بالنسبة لمركب موحد مقارنة بمركب عشوائي.

# *Introduction générale*

Les matériaux composites consistent en l'agrégation d'au moins deux substances non miscibles de nature différentes, se complétant et aboutissant à une substance dont la performance globale est supérieure aux composants pris séparément. Le matériau composite est constitué d'une ou plusieurs substances Plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est appelée matrice. La phase discontinue a généralement des propriétés mécaniques (dureté et résistance) Plus que cela dans la matrice est appelé renforcement. En raison des propriétés des matériaux composites Caractéristiques des matériaux composants, répartition géométrique des armatures, Taille du renfort, nature des interfaces renfort/matrice, procédé de fabrication, etc.

Par conséquent, les matériaux composites sont actuellement largement utilisés dans l'industrie et Notamment dans les domaines aérospatial et aéronautique, où le poids est économisé sur les structures stratégiques. Cependant, il convient de noter que si l'industrie aéronautique reste un acteur majeur du développement de Les structures hautes performances et les matériaux composites sont largement utilisés dans ce domaine Sports, génie civil, secteur maritime, secteur automobile, secteur éolien Consommateur actuel de fibre de carbone) et champ pétrolier offshore. La modélisation des composites reste un domaine de recherche ouvert car ces matériaux existent Développement constant et de plus en plus utilisé dans la réalisation de structures industrielles. A la fin de l'endommagement mécanique est développé un endommagement qui permet de construire des modèles pratiques de comportement utilisables dans le cadre des éléments finis. Des exemples simulant le comportement mécanique jusqu'au dernier stade de la rupture illustrent la présentation. Ce document présente brièvement les outils et les concepts nécessaires pour développer et utiliser ces modèles de dommages dans un cadre d'éléments finis. Nous allons examiner dans le présent travail les conséquences de la présence de l'endommagement sur le comportement de diffusion, tout en considérant que l'endommagement est présent dans le composite sous forme d'une fissure transverse et décohésion contenant de l'air. La formulation de la modélisation du comportement diffusif du composite est établi en se basant sur une approche thermodynamique tout en restant dans le cadre d'une approche découplé (le comportement diffusif est supposée indépendante de l'état mécanique dans le matériau considéré). D'autre part, le comportement mécanique est modélisé en se basant sur les notions de la mécanique de la rupture.

L'objectif de cette mémoire porte sur l'évaluation de l'effet de la présence d'endommagement sur le comportement mécanique diffusif du composite.

Le premier chapitre porte sur une étude bibliographique où nous fournirons quelques définitions et concepts de base sur les composites. De plus, nous fournirons également une bibliographie sur la modélisation de la diffusion de l'humidité dans les composites, les types de lois en présence ainsi que les anomalies pouvant apparaître et les facteurs d'influence.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de diffusion de l'humidité dans un composite endommagé. Le VER représentatif de ce milieu est constitué de le composite dans laquelle l'endommagement est sous forme d'une fissure transversale et décohésion uniforme de différentes fractions volumiques. Nous commençons par un composite sain dans le VER ensuite nous

allons voir l'effet de la présence de l'endommagement. L'effet sera quantifié sur le coefficient de diffusion effectif et la teneur à saturation ainsi que sur la cinétique de diffusion dans le VER.

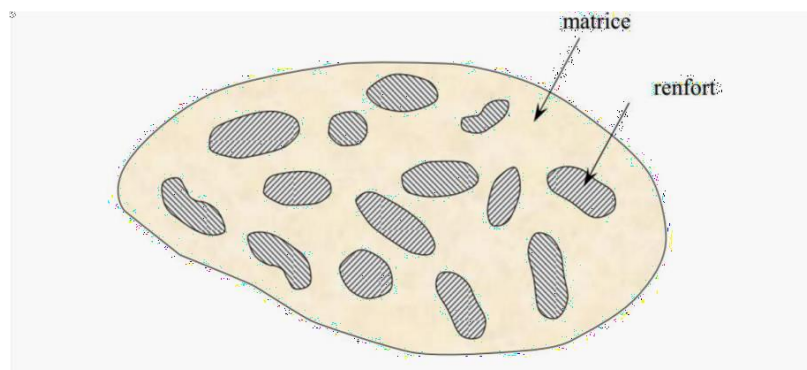
Dans le troisième chapitre, en suivant la même démarche de composite sein, nous allons voir l'effet de la présence d'endommagement sur la diffusion dans un composite aléatoire

***Chapitre I : Etude  
bibliographique***

# Généralités sur les matériaux composites

## Introduction :

Les matériaux composites sont des matériaux modernes, créent un intérêt progressif de la part de nombreux secteurs industriels, et leurs utilisations deviennent de plus en plus répandues. Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles de structure différente et dont les propriétés individuelles se combinent et se complètent pour donner des performances globales améliorées. L'un des grands avantages des composites est que les propriétés sont ajustables en fonction des paramètres de conception, tels que la nature des fibres, la disposition des plis, la nature de la matrice, l'orientation et l'architecture des fibres. Le matériau composite peut prendre des géométries complexes et avoir de grandes dimensions ou des formes variées qui s'adapte aux besoins de la conception des modèles technologique facilement intégrable pour remplir leurs rôles en tant qu'élément principale de résistance aux chocs et vibration, ou peuvent constituer des éléments secondaires qui interviennent tant qu'isolant acoustique ou conducteur thermique et électrique, en se distinguant par leurs propriétés physiques diverses. On peut citer à titre indicatif, l'avantage apporté par un des paramètres physique tel que le coefficient de dilatation thermique spécifique, qui peut être optimisé pour l'absorption d'énergie dans le cas des éléments en coque mince des réacteurs de fusée subissant des chocs thermiques élevés ou le cas des structures d'avions supersonique qui peuvent développer de grand déplacement sous l'effet des gradients de température élevées. Les différents types de matériaux composites sont définis en fonction de la nature de matrice qui peut être de type organique, métallique ou céramique, et les renforts peuvent également être de natures très différentes comme par exemple le carbone et le verre pour inorganiques et les aramides (Kevlar) pour ceux organiques. Donc, on peut considérer que la matrice est la phase continue de matériau composite et le renfort est la phase discontinue (**FigureI.1**).



**FigureI.1** Structure d'un matériau composite

## **1.1- Constituants de matériaux composites**

### **I.1.1 La matrice**

Le rôle principal de la matrice dans le matériau composite est de servir d'enrobage tout en assurant le collage entre les fibres, afin d'optimiser le transfert de contraintes mécaniques appliquées.

La matrice permet de donner la forme requise aux matériaux et offre quelques avantages en faveur de la tenue chimique de la structure. Le choix des matrices diffère selon le domaine d'application des composites. Il existe plusieurs types de matrice tels que les polymères (Résines), parmi lesquelles les polyesters, les vinylesters et les époxydes. La composition chimique et les propriétés physiques de la résine, affectent la fabrication et les propriétés finales des matériaux composites. Ainsi, les variations dans la composition, l'état physique ou la morphologie d'une résine ainsi que la présence d'impuretés peuvent affecter les performances du matériau composite et leur durabilité à long terme.

### **I.1.2 Résines époxyde**

Le terme époxyde est une description générale de la famille de polymères qui sont basés sur les molécules qui contiennent des groupes époxyde. Un groupe époxyde est une structure, qui contient à l'échelle atomique un cycle composé par un atome d'oxygène et deux atomes de carbone. Les époxydes sont des résines thermodurcissables polymérisables contenant un ou plusieurs groupes époxydes durcis-sables. Les époxydes sont largement utilisés dans les résines pour les pré-imprégnés et les adhésifs structuraux.

Les avantages des époxydes sont leur grande résistance, le module élevé, l'excellente adhérence, la faible rétraction, la bonne résistance chimique et leur facilité de traitement. Les principaux inconvénients sont la fragilité et la réduction des propriétés en présence d'humidité. Le coût de la résine est également plus élevé que celui des polyesters.

### **I.1.3 Résines polyester**

Le terme résine de polyester thermodurcissable est un terme général utilisé pour la résine de polyester ortho-phtalique ou d'iso-phtalique. Les résines de polyester sont relativement peu coûteuses et utilisées pour les applications de traitement rapides à faible coût. La combinaison des polyesters avec certaines charges peut présenter une résistance à la rupture sous l'effet de l'arc électrique. Les résines de polyester iso-phtalique présentent une stabilité thermique et dimensionnelle et une résistance au fluage plus élevée. En général, les avantages principaux des structures composites à matrice de résine polyester renforcées par des fibres, sont son faible coût et sa capacité à être traité rapidement. Les composites fibres /polyesters peuvent être fabriqués par de nombreuses méthodes, tels que, l'empilement humide, le moulage sous presse (sous vide), le moulage par injection, l'enroulement filamentaire, la pultrusion et l'autoclavage.

#### **I.1.4 Matrices en résine des phénoliques**

Les phénoliques, en général, durcissent par voie de condensation avec dégazage de l'eau. La matrice résultante est caractérisée par sa résistance chimique et thermique, et par sa dureté, ainsi que par ses produits à faible dégagement de fumée et de toxicité. Ces résines sont des viscosités et poids moléculaires plus élevées. Par conséquent, elles sont optimales pour la fabrication de structures composites de formes exceptionnelles et de courbures complexes.

#### **I.1.5 Matrices en résines Polyamides**

La famille de résines polyamides comprend un nombre varié de polymères qui contiennent une structure hétérocyclique aromatique. Les composites à matrice de polyamides caractérisent par leur excellente performance dans les environnements sa haute température, par leur résistance thermique, leur stabilité à l'oxydation, ainsi que leur faible coefficient de dilatation thermique. Les principales applications des polyamides apparaissent dans les structures à moteur chaud, ainsi que, les industries aérospatiales.

#### **I.1.6 Matrices métalliques**

Les métaux sont utilisés essentiellement pour les composites à matrice métalliques (MMC). Les métaux sont généralement des alliages traditionnels, qui ont été développés pour être utilisés dans certains types de composites. Les principaux matériaux de matrice métallique sont les alliages d'aluminium, les alliages de titane ainsi que, les alliages de fer. D'autres métaux utilisés comme matériaux de matrice, y compris le cuivre le plomb, le magnésium, le cobalt, l'argent et les super alliages. Les propriétés mécaniques des métaux dans les composites dépendent du processus de fabrication [Zweben C (2002).].

#### **I.1.7 Matrice en céramique**

Les céramiques utilisées comme matrices sont le carbure de silicium, l'alumine, le nitrure de silicium et divers ciments. Les propriétés mécaniques des céramiques, sont encore plus sensibles au processus de fabrication que celles des métaux. La détermination de la résistance en traction et en flexion des céramiques est difficile, en raison de leurs natures fragiles. La résistance à la flexion dépend également de la taille de l'échantillon qui est généralement beaucoup plus élevée que celle d'un spécimen de traction de même taille [R. Warren Ed, (1992).].

#### **I.1.8 Matrices en carbone**

Les formes des matrices de carbone résultant de divers processus de fabrication de carbone-carbone tendent à être des matériaux fragiles et plutôt faibles. Les conductivités thermiques de ces matrices varient de très faible à élever, selon les processus de fabrication. Comme pour les céramiques, les propriétés mécaniques de carbone sont difficiles à mesurer.

## I.2 Les renforts

### I.2.1 Fibre d'Aramide

Au début des années 1970, DuPont Company a introduit l'aramide (Kevlar), une fibre organique avec un module de traction spécifique et une résistance élevée. C'est la première fibre organique à être utilisée comme renfort dans les structures composites. Aujourd'hui, cette fibre est utilisée dans diverses pièces structurelles, tels que, la balistique, les pneus, les cordes, les câbles, les vêtements de protection. Les fibres d'aramide, sont des polymères polyamides aromatiques, caractérisées par une stabilité thermique élevée et des propriétés diélectriques. En outre, les fibres d'aramide présentent une faible densité, une haute résistance à la traction et des caractéristiques exceptionnelles de rigidité (**voir le tableau I.1**).



**Figure I.2** Fibres d'aramide

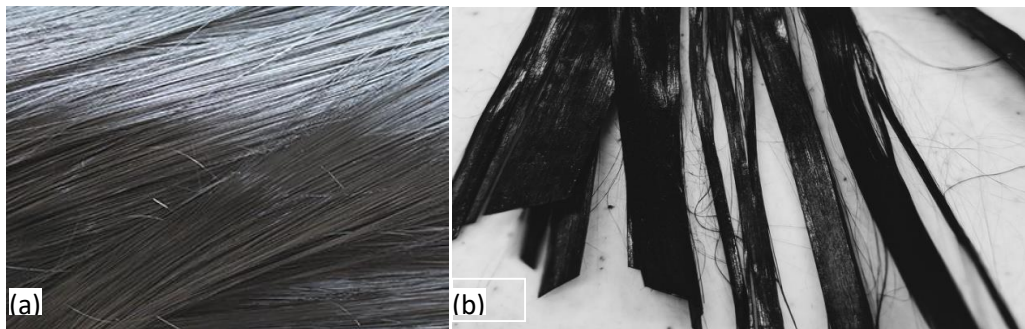
Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar 49	Kevlar 149	Twaron	Technora
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1440	1450	1470	1440	1390
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	12	12	12	12	12
Module d'Young $E_f$ (GPa)	60	120	160	60	90
Module spécifique $E_f/\rho$ (MNm/kg)	42	83	110	40	65
Contrainte à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3000	3000	2400	2600	2800
Contrainte spécifique $\sigma_{fu}/\rho$ (kNm/kg)	2080	2070	1630	1800	2010
Allongement à la rupture (%)	3,6	1,9	1,5	3	4

**Tableau I.1** Caractéristiques mécaniques de mono filaments aramides

### I.2.1- Fibres de carbone et de graphite

Les fibres de carbone et de graphite sont basées sur les réseaux de couches de graphène (hexagonal) présentés dans le carbone. Si les couches de graphène ou les plans s'empilent dans un ordre tridimensionnel, le matériau est défini comme un graphite. Habituellement, un traitement prolongé du temps et de la température est nécessaire pour former cet ordre, rendant les fibres de graphite plus coûteuses [Daniel B. Miracle and Steven L. Donaldson (2001)].

Le carbone et le graphite ont une capacité importante en tant que fibres de renforcement, avec une grande flexibilité pour les propriétés qui peuvent être fournies. Les caractéristiques principales des composites en fibres de carbone et de graphite imprégnées dans la matrice de polymères sont la rigidité et la résistance mécanique élevées (voir le tableau I.2). En outre, les fibres de carbone et de graphite peuvent conserver leurs caractéristiques mécaniques dans des conditions hostiles, telles que, les températures élevées, l'exposition aux solvants et fluides courants et aux environnements humides. Pour être utilisé comme partie d'un matériau de structure primaire, il doit également être disponible en tant que fibre continue [Miles I, Rostami S (1992).].



**Figure 1.3** Fibres de Graphite (a), fibre de Carbone (b) [1]

Les fibres de carbone et de graphite sont caractérisées par, l'excellente propriété mécanique (traction et compression), la bonne conductibilité électrique et thermique. Pour cela, les fibres de carbone et de graphite sont les plus utilisées dans les applications de hautes performances.

Caractéristiques	Carbone
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1750
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	5 à 7
Module d'Young $E_f$ (GPa)	230
Module spécifique $E_f/\rho$ (MNm/kg)	130
Contrainte à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3000-4000

**Tableau I.2** Caractéristiques mécaniques de carbone

## I.2.2 Fibres de verre

Le verre en tant que matériau structurel a été introduit au début du XVIIe siècle et a été largement utilisé au cours du XXe siècle, avec l'apparition du matériau fondu qui est filé ou fileté par des filaments continus.

Les avantages des fibres de verre sont remarquables : grâce à leur coût de fibre réduit, pour leurs utilités dans certaines applications d'armement, leur résistance à la corrosion chimique ou galvanique, leurs propriétés électriques et enfin leur disponibilité sous forme de nombreux produits très variés. Le coefficient de dilatation thermique et les propriétés mécaniques par rapport aux composites renforcés par des fibres de carbone peuvent être considérés comme des inconvénients distincts



**Figure 1.4** Fibre de verre

Les composite en fibre de verre présente un inconvénient en ce qui concerne les propriétés en traction par rapport aux composites renforcés en fibres d'aramide. Concernant, les avantages de composite renforcés par des fibres de verre sont apparié à la bonne tenue au cisaillement et à la compression finale avec en plus leurs bonnes capacités à l'absorption de l'humidité (**voir le tableau I.3**). Les applications des produits de composite en fibre de verres ont multiples, telles que, les dispositifs de filtration, l'isolation thermique et électrique, les réservoirs de pression, les produits structuraux pour les véhicules automobiles et de nombreux usages s'appliquent en produits militaires et aérospatiaux.

Caractéristiques	Verre
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2600
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	10 à 20
Module d'Young $E_f$ (GPa)	73
Module spécifique $E_f/\rho$ (MNm/kg)	28
Contrainte à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3400

**Tableau I.3** Caractéristiques mécaniques de verre

### I.2.3 Les fibres de bore

La fibre de bore élémentaire est formée par une réaction sur un fil de tungstène chaud qui est étiré en continu à travers un réacteur contenant  $\text{BCl}_3$  et  $\text{H}_3$ . Le substrat de fil de tungstène agit pour former du borure de tungstène dans le noyau. La structure cristalline du bore déposé est considérée comme amorphe en raison de sa petite taille. Le bore est disponible sous forme de fibre cylindrique en deux diamètres nominaux, de 0,10 et 0,16 mm, avec une densité de 2,57 et 2,49 g/cm<sup>3</sup> respectivement.

Le module de traction et la résistance de la fibre de bore sont entre 40 GPa et 3600 MPa. La conductivité thermique et la dilatation thermique sont faibles (voir le tableau I.4). Le coût des fibres de bore est plus élevé que les fibres de carbone.

Les fibres de bore sont trouvées presque exclusivement sous la forme de pré-impregnés en filament dans la matrice époxyde, et utilisées pour des applications aérospatiales exigeant la haute résistance et / ou la rigidité ainsi, pour le renforcement sélectif dans les articles de sport. L'utilisation la plus notable de cette fibre est les sections stabilisatrices des avions militaires F-14 et F-15.

Caractéristiques	Bore	Bore+B <sub>4</sub> C	SiC
Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2600	2600	3000
Diamètre ( $\mu\text{m}$ )	100-150	100-150	100-150
Module d'Young $E_f$ (GPa)	430	430	410
Module spécifique $E_f/\rho$ (MNm/kg)	165	165	140
Contrainte à la rupture $\sigma_{fu}$ (MPa)	3822	4000	3900
Contrainte spécifique $\sigma_{fu}/\rho$ (kNm/kg)	1460	1540	1300

**Tableau I.4** Caractéristiques mécaniques des fibres de bore, bore-carbure de bore et silice

### I.2.4 Fibre de silice

Les fibres de silice sont produites comme le verre, par fusion, et sont utilisées essentiellement en raison de ses hautes tenues chimiques et thermiques dans les tuyères pour les moteurs de la fusée (**Tableau I.4**).

### I.2.5 Fibres de polyéthylène de haut module

Les fibres de polyéthylène de haut module présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

### I.2.6 Les fibres naturelles

Les fibres naturelles peuvent être extraites de matériaux fibreux d'origine animale ou végétale, les plus utilisées sont les fibres de Coton, Lin, Sisal, Cactus ... etc. Les fibres naturelles possèdent des propriétés de type isotrope transverse et peuvent atteindre celles des fibres de verre. Cependant, ces fibres ont mauvaise compatibilité fibre-matrice.



**Figure1.5** Fibre naturelle de Cactus

### **I.3 Les Types de matériaux composites :**

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes : les composites à grande diffusion et les composites hautes performances :

#### **I.3.1 Les composites à grande diffusion**

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30 %. Dans 90 % des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes.

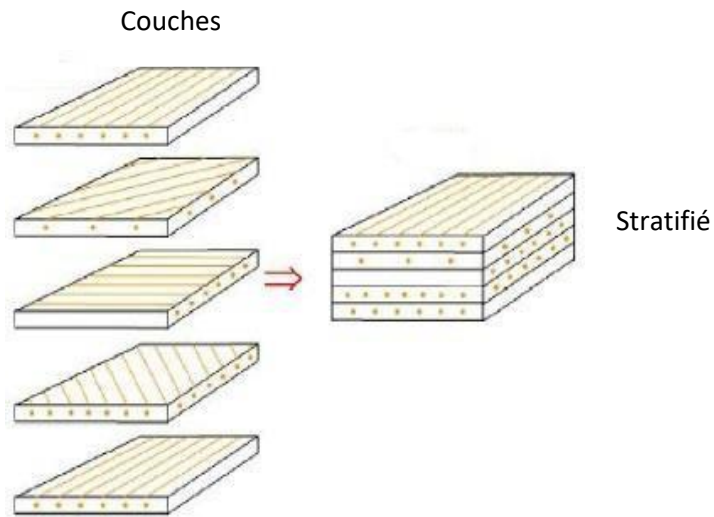
Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Dans ce cas le renfort et la matrice sont à des couts voisins.

#### **1.3.2. Les composites hautes performances**

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un cout élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50 %, et ce sont les renforts qui influent sur le cout. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celle des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. [*BERTHELOT, Jean-Marie*].

#### **1.3.3. Composite stratifié**

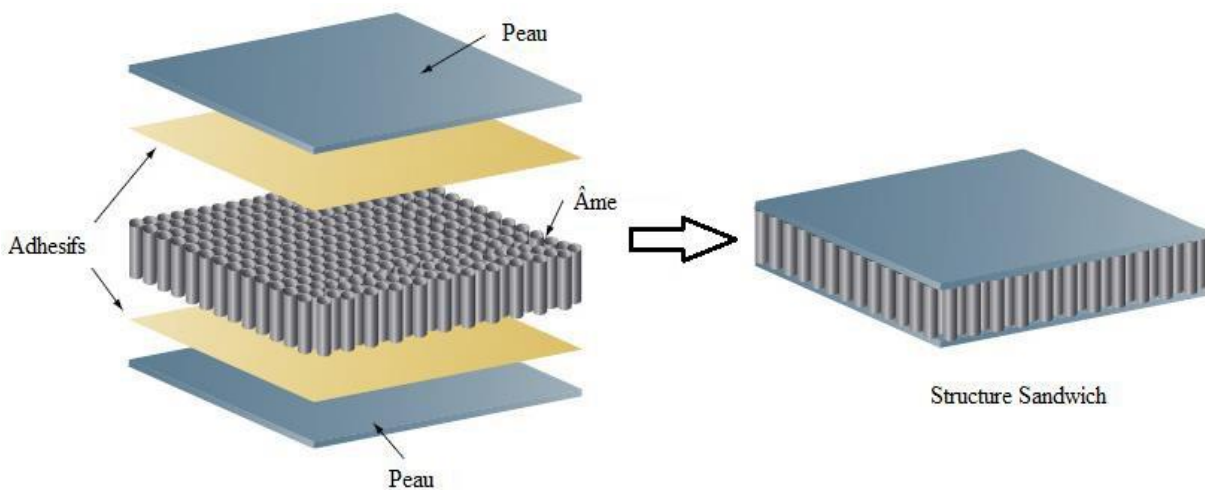
Ils sont constitués d'un ou plusieurs renforts (sous forme de fibres longues et courtes et / ou des grains) ayant de bonnes propriétés mécaniques notamment en traction, disposés dans une matrice généralement en résine. Le rôle principal de la matrice est de transmettre les efforts mécaniques au renfort (résistance à la compression ou à la flexion). Elle permet de donner la formes ou haitée au produit réalisé. Elle assure aussi, la protection dure en fort contre les différentes conditions environnementales (**Figure1.6**). Les différents types de matériaux composites stratifiés sont définis en fonction de la nature de la matrice qui peut être de type polymère, métallique, carbonique ou céramique.



**Figure1.6** Structure composite stratifié

### 1.3.4 Composite sandwich

Les sandwichs sont des matériaux constitués en deux feuilles ou plaques (peaux) de faible épaisseur et de grande rigidité collées au droit des extrémités supérieures et inférieures d'un matériau de faible masse volumique (l'âme). Le rôle essentiel de l'âme du sandwich est la transmission par cisaillement les actions mécaniques en interactions avec les deux peaux extérieures (figure 1.7). Le matériau sandwich est un excellent isolant thermique et acoustique. En même temps les sandwichs se distinguent par une robustesse à la flexion alliée à une légèreté économique.



**Figure1.7** Structure sandwich [1]

## I.4 Vieillissement par l'humidité des matériaux polymères et composites à matrice polymère

Le phénomène de vieillissement humide des polymères et composites à matrice polymère (CMPs) est causé par l'absorption et la diffusion d'eau en leur sein, lorsqu'ils sont exposés à un environnement humide. La diffusion est définie par Crank comme étant le processus par lequel la matière est transportée au travers d'un système à la suite de mouvements moléculaires aléatoires [Crank, 1975]. Cela est dû au fait que les matrices organiques sont en général hydrophiles. En effet, ces matrices comportent des sites polaires attracteurs de molécules d'eau, capables de se lier à ces dernières par des liaisons hydrogène. Cette absorption d'humidité peut entraîner des modifications de la structure chimique et des propriétés physiques du matériau. La diffusion d'eau dans des matériaux polymères a beaucoup été étudiée au cours de ces dernières décennies [Apicellaetal., 1983; Chateaminoisetal., 1993; Popineauetal., 2005 ; Arhantetal., 2016]. Ce phénomène a été associé au volume libre [Mc Kague et al. 1978], à la formation de liaisons hydrogène entre l'eau et le polymère [Ennis et Karasz, 1986], ou encore à la création de clusters [LeGac et al., 2014].

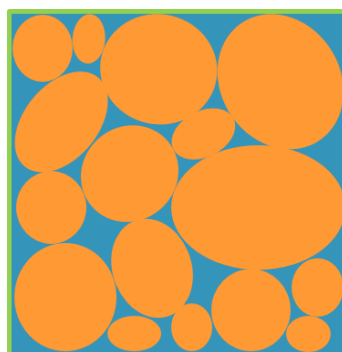
Cette section présente les différents types de mécanismes d'absorption, ainsi que les effets induits par la diffusion d'eau dans les matériaux polymères et CMPs. Ces travaux ayant pour but final d'étudier le phénomène de diffusion d'eau dans une structure multi-matériaux, on abordera également la question du transport de l'humidité à l'interface entre deux matériaux.

### I.4.1 Les mécanismes d'absorption

L'eau peut diffuser au sein d'un matériau composite soumis à un environnement humide selon différents processus physiques. Cette sous-section introduira ainsi le phénomène de transport de l'humidité dans le volume dit «libre» d'un réseau polymère, mais aussi celui de l'interaction eau-polymère. On présentera également la notion d'eau libre et d'eau liée.

### I.4.2 Le transport de l'eau par le volume libre

Le volume libre est défini comme étant l'espace inoccupé par les molécules dans un solide ou unliquide. Comme le montre la [Figure I.8](#), le volume libre  $V_L$  (en bleu) correspond donc à la différence entre le volume macroscopique des contours externes d'une pièce polymère  $V$  (en vert) et le volume réellement occupé par les molécules constituantes  $V_m$  (en orange).



**FigureI.8**– Schématisation du volume libre  $V_L=V-V_m$  [julie cocaud 2019]

Le volume libre peut être attribué aux irrégularités d'arrangement moléculaire [Adamson, 1980] et à l'agitation thermique qui engendre temporairement une mobilité des micro-cavités qui constituent le volume libre, ce qui permet la circulation des molécules d'eau [Chen et al., 2001]. Ces «vides» peuvent ainsi permettre à l'eau de diffuser d'un matériau à un autre [Youssef et al., 2009]. De nombreux travaux ont essayé d'établir un lien entre la diffusion dans un matériau et le volume libre de ce dernier [Barrer, 1951 ; Macqueen et Granata, 1993 ; Linde et al., 2018]. Cependant, d'un point de vue expérimental, la fraction de volume libre est difficilement caractérisable [Soles et al., 2000]. Il est aussi intéressant de relever que, puisque la quantité de volume libre dépend de la distribution moléculaire et de la mobilité segmentaire du réseau polymère, elle est donc aussi influencée par la densité de réticulation, le degré de durcissement ainsi que par le vieillissement physique du matériau [Starkova et al., 2013].

### **I.4.3 L'interaction eau-polymère**

Il a été montré que l'eau ne se propage pas seulement par les micro-cavités à l'intérieur d'un matériau polymère. L'eau peut aussi diffuser en créant des liaisons hydrogène avec les sites polaires des chaînes polymères [Moy et Karasz, 1980 ; Cotugno et al., 2005 ; El Yagoubi et al., 2015], tels que les groupements hydroxyles ou amines présents dans les résines époxy. En effet, ces résines comportent un nombre important d'atomes d'oxygène et d'azote, porteurs d'excès d'électrons, favorisant les interactions eau-polymère.

Un grand nombre d'auteurs ont mis en évidence ce type d'interaction eau-polymère par analyses de spectroscopie RMN du solide (Résonance Magnétique Nucléaire) [Moy et Karasz, 1980 ; Jelinski et al., 1985 ; Zhou et Lucas, 1999a]. D'autres chercheurs ont quant à eux utilisé la spectroscopie IR (infrarouge) à transformée de Fourier [Antoon et al., 1981 ; Musto et al., 2000 ; Cotugno et al., 2001]. Ces techniques d'analyse spectroscopique permettent en effet d'obtenir des informations sur la structure moléculaire d'un polymère. Par conséquent, elles rendent possibles l'identification d'interactions entre le réseau polymère et des molécules d'eau.

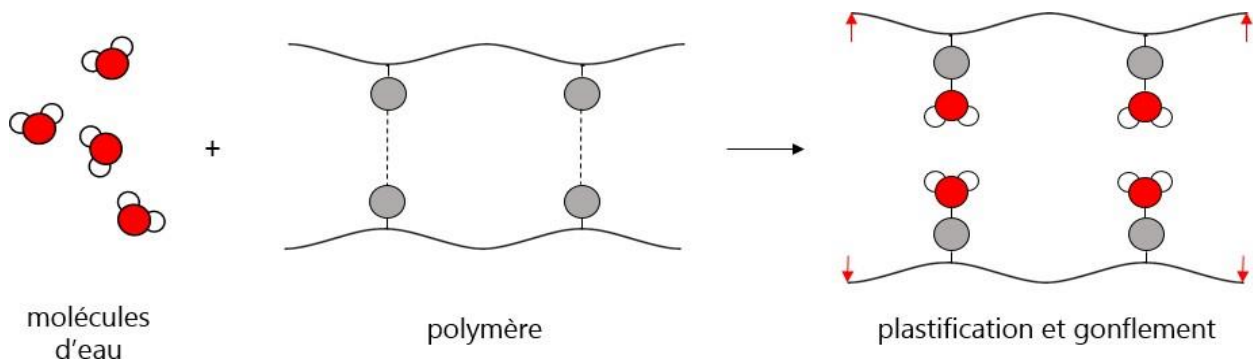
### **I.4.4 Les effets induits par la diffusion d'eau**

Le phénomène de diffusion d'eau au sein d'un polymère ou d'un CMP peut avoir de nombreuses répercussions, notamment sur les propriétés initiales du matériau. On parle de vieillissement d'origine physique ou chimique. Dans les deux cas, il peut être réversible ou irréversible. Cette sous-section présentera les principales conséquences du vieillissement humide, pour ces deux types de matériaux.

### **I.4.5 Le Gonflement**

La diffusion d'eau au sein d'un matériau polymère peut induire une augmentation de son volume. Ce phénomène est appelé dilatation ou gonflement hygroscopique [Bondet et Smith, 2006]. Plusieurs auteurs ont montré que l'augmentation du volume d'un polymère est inférieure au volume de molécules d'eau absorbées [McKague et al., 1978 ; Adamson, 1980]. De plus, ce phénomène de dilatation hygroscopique semble augmenter à partir d'un certain seuil de teneur en eau, à partir duquel il varie quasi-linéairement avec cette dernière [Adamson, 1980 ; Marque et al., 2008]. Adamson explique ainsi qu'une partie des molécules d'eau diffusant dans

le polymère commence par occuper le volume libre de ce dernier, ne provoquant pas de gonflement, tandis qu'une autre partie de l'eau dissocie les liaisons hydrogène entre les chaînes pour en créer de nouvelles avec le réseau, ce qui entraîne alors un gonflement. Ce type de molécules d'eau constitue l'eau liée de type I qui, selon Zhou et Lucas, entraîne à la fois le gonflement hygroscopique et la plastification du matériau [Zhou et Lucas, 1999a]. Par conséquent, plusieurs auteurs ont établi un parallèle entre les phénomènes de gonflement hygroscopique et de plastification [Vanlandin ghametal., 1999; BondetSmith, 2006; He, 2012]. Une représentation schématique du gonflement hygroscopique induit par le phénomène de plastification est donnée en Figure I.9.



**Figure I.9** Schématisation du gonflement hygroscopique induit par la rupture de liaisons hydrogène inter-segmentaires [julie cocaud 2019]

## I.5 Modélisation de la diffusion par des approches découplées

Dans la littérature, certains modèles permettent uniquement la description du mécanisme hygroscopique, tandis que d'autres permettent de considérer d'éventuelles interactions entre l'état mécanique du matériau en place et la paramé fusion de comportement des lois. Le premier appelé découplé, tandis que les autres sont appelés modèles couplés. Nous ne traitons ici que le cas des modèles découplés

### I.5.1 Modèle de Fick

Le modèle de diffusion de l'humidité le plus couramment utilisé est celui de [W.K. Loh, A.D]. Il s'agit d'un modèle de diffusion libre monophasé basé sur une analogie avec le modèle de Fourier de conduction thermique. D'un point de vue purement mécanique, la loi est basée sur la théorie des volumes libres [W.K. Loh, A.D] [A. Fick]. Elle consiste à relier linéairement le vecteur flux massique du solvant au gradient de concentration de ce dernier La première loi de Fick décrit la relation entre le flux de matière  $J$  et le gradient de la Concentration en eau  $c$  :

$$J = -D \text{grad} c \quad (\text{I.1})$$

Où  $D$  est le tenseur des coefficients de diffusion dans le matériau. Ce tenseur caractérise la vitesse avec laquelle l'humidité se propage dans le matériau.

La seconde loi de Fick d'écrit, quant à elle, le bilan de la conservation de matière au cours d'un intervalle de temps. La loi de la conservation des espèces indique que l'opposé de la variation par unité de temps de la quantité de particules diffusant dans un volume donné est égal au flux sortant:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\text{div}J \quad (\text{I.2})$$

La littérature rapporte, que de nombreux matériaux suivent en pratique une cinétique de sorption fickienne, comme en témoignent, par exemple, les travaux suivants: [M. Autran, R. Pauliard, L. Gautier, B. Mortaigne, F. Mazeas, and P. Davies], et [J. Jedidi, F. Jacquemin, A. Vautrin].

### I.5.2 Modèle de Carter et Kibler

En pratique, on observe cependant très fréquemment des écarts à la loi de Fick découplée. Prenons le cas, par exemple, de résines époxy : les travaux de Zhou et al., Loh et al. et El Yagoubi et al. [J. Zhou, J.P. Lucas] [H.G. Carter, K.G. Kibler, Langmuir] [P. Kanouté] montrent, que dans certaines conditions, le comportement diffusif de ces polymères peut s'écarter considérablement de la loi de Fick classique.

Ainsi, d'autres modèles permettent de prendre en compte l'existence de deux familles de molécules de soluté interagissant avec un solide. La première est constituée des molécules libres de diffuser dans le matériau (d'une manière analogue à celle décrite dans la théorie du volume libre), alors que la seconde famille correspond aux molécules liées au réseau de chaînes carbonées, ce qui les empêche de participer activement au phénomène de diffusion. Dans le cadre de cette approche, des molécules, libres à un instant donné, peuvent ultérieurement se retrouver piégées, et inversement. La figure (Figure. I.10) ci-après illustre graphiquement les différents mécanismes mis en jeu lors de ce processus de sorption. Ce type de processus désorption peut être représenté par une cinétique de Langmuir, en utilisant le modèle développé par Carter et Kibler [H.G. Carter, K.G. Kibler, Langmuir]. Les travaux de thèse de Kanouté [P. Kanouté] et de [T. Peret], entre autres, illustrent ce type de comportement diffusif.

Le modèle de Carter et Kibler repose sur la seconde loi de Fick ainsi que sur les équations fondamentales suivantes:

$$J = -D \text{grad}n \quad (\text{I.3})$$

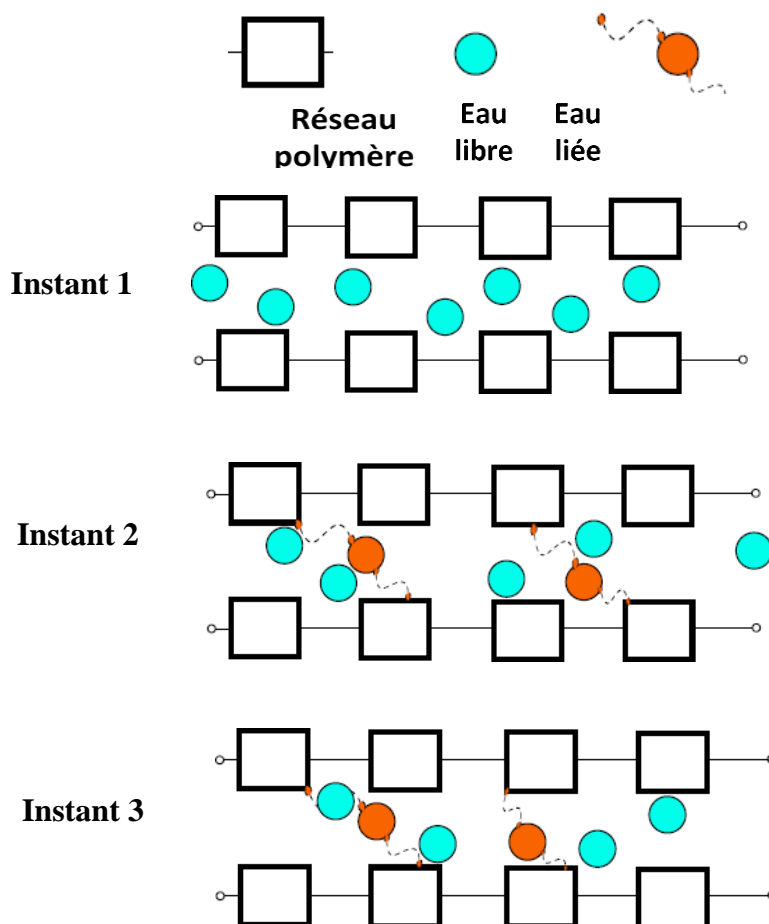
$$\frac{\partial N}{\partial t} = \chi n - \eta N \quad (\text{I.4})$$

$$C = n + N \quad (\text{I.5})$$

Où  $n$  est la concentration en molécules libres de diffuser, tandis que  $N$  est la concentration en molécules liées.  $\chi$  et  $\eta$  sont respectivement les probabilités pour qu'une molécule d'eau mobile devienne liée et inversement.

Ainsi ce modèle tient-il compte de deux phases de molécules d'eau. Une phase de molécules d'eau liées et une phase de molécules d'eau mobiles (eau libre). Les molécules d'eau libres deviennent liées avec une certaine probabilité  $\chi$  par unité de temps ( $s^{-1}$ ). A l'inverse, les molécules liées se délient avec une probabilité  $\eta$ . Si l'on considère  $(t)$  molécules d'eau libre et  $(t)$  molécules d'eau liées, par unité de volume, à un instant donné  $t$ , à l'équilibre on aura

$$\chi n_{\infty} = \eta N_{\infty} \quad (I.6)$$



**Figure I10.** Mécanismes de diffusion des molécules d'eau au sein d'un réseau polymère selon la cinétique de sorption de Langmuir, à 3 instants successifs [T. Peret].

Ce modèle est particulièrement adapté aux matériaux contenant un volume libre important, des liaisons polaires donnant lieu à la création de liaisons hydrogènes et à des matériaux avec des morphologies hétérogènes.

***Chapitre II :***  
***Modélisation de***  
***l'effet de***  
***l'endommagement***  
***sur le comportement***  
***diffusif dans un***  
***matériau composite***  
***à fibre imperméable***  
***uniforme***

## II.1 Introduction

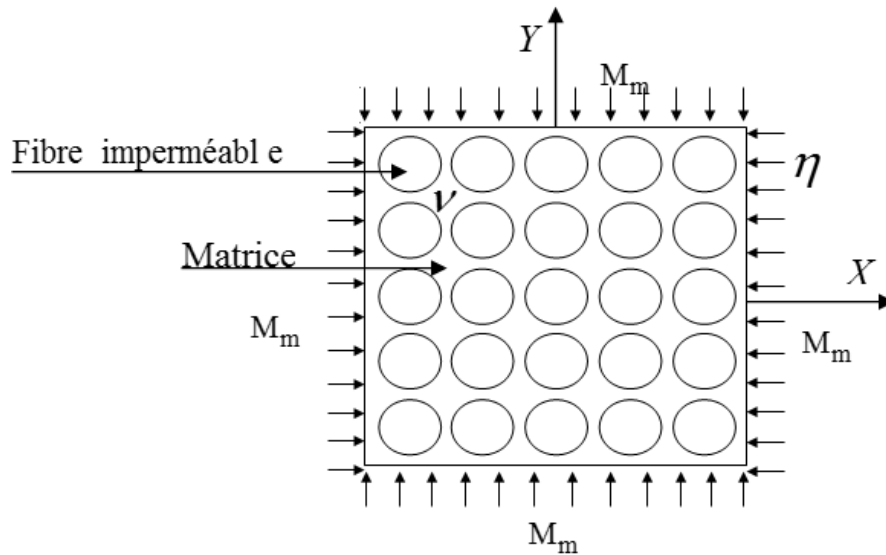
Dans ce chapitre nous allons aborder le problème de modélisation du comportement diffusif en présence d'endommagement par la fissuration, pour laquelle le problème a été bien cerné et des solutions plus raffinées ont été proposées par plusieurs auteurs (Ladevèze et Le Dantec, 1991 ; Allix et Ladevèze, 1992). Dans les matériaux composites la prise en eau ou l'humidité relative en présence d'endommagement sous forme de microfissures, (Lundgren et Gudmundson, 1998,1999, Perreux et al. 2002). Une attention particulière a été portée à l'étude d'un problème connexe dans les travaux de (Gueribiz et al. 2009, 2011; Bourennane et al. 2019 ). Les auteurs modélisent les effets induits par la présence d'endommagement sur le coefficient de diffusion et la capacité maximale d'absorption d'humidité en faisant l'hypothèse qu'à saturation ces fissures.

Cet endommagement sera représenté par une fissure transverse et décohésion de différents types de fraction volumique. Ensuite, nous proposons une modélisation de la diffusion dans la fissure basée sur une approche thermodynamique tout en restant dans le cadre d'une approche découplée (le comportement diffusif est supposé indépendant de l'état mécanique dans le matériau considéré). Pour le cas d'une fissure transverse et décohésion d'une matrice polymérique renforcé avec des fibres sous forme uniforme.

## II.2 Diffusion dans le composite sain

Dans ce cas nous considérons que le VER représentatif de composite à fibre imperméable est constitué de la matrice dans laquelle sont noyées les fibres. Nous supposons une distribution régulières des fibres et une continuité du milieu entre la fibre et la matrice du sorte que aucune porosité ou autre défaut qui donne lieu à discontinuité n'existant Figure II-1. Sur les bords de ce VER est imposée une teneur en eau en termes d'humidité relative HR(%). Le (VER) de composite saine est constitué d'un milieu continu au sein duquel aucune porosité ou autre défaut n'existe (Figure II.1). Sur les bords de ce VER est imposée la capacité maximale d'absorption d'humidité  $M_m$ (%). Dans ce contexte, on supposera que cette quantité est reliée à l'humidité relative HR du milieu environnant selon l'expression identifiée par (Loos et Springer, 1979) comme valide sur un grand nombre de polymères et de composites à matrice polymère (Weitsman, 2012) :

$$M_m = \alpha HR^\beta \quad \text{II.1}$$



**Figure II.1** VER relatif à un composite saine

Le domaine occupé par le VER est noté  $\eta$  dans lequel chaque point est repéré par ses coordonnées  $(x, y)$ . Selon l'hypothèse d'une approche découplée pour laquelle les paramètres de diffusion (coefficient de diffusion et la teneur en humidité) sont indépendants de l'état mécanique, ce cas de la diffusion est supposée régir par la loi de Fick [Crank, 1978, Delasi, R., Whiteside, J.B, 1978].

Dans ce cas le problème local à résoudre dans le VER peut être exprimé par l'équation II.2:

$$\begin{cases} \frac{\partial m(x, y, t)}{\partial t} = D \Delta m(x, y, t) & \text{sur } \nu \times \mathbb{R}^{\dagger} \\ m(x, y, t) = M_m \text{ (HR(\%))} & \text{aux bord de la résine } \in \eta \\ m(x, y, 0) = m_0(x, y) & \forall x, y \in \nu \end{cases}$$

II.2

$\eta$  Représente les frontières du domaine  $\nu$   $\varphi_m = \partial \nu$ ,  $M_m$  la teneur en humidité  $M_m$  imposée aux frontières du domaine  $\eta$  de la matrice,  $D$  est le coefficient de diffusion de la matrice,  $m_0(x, y)$  est la teneur en humidité existant dans le VER à l'instant  $t=0$  qui est généralement considérée nulle.

Pour la résolution du problème nous adopterons une résolution par éléments finis, en utilisant le logiciel (Comsol ®). Les paramètres utilisés dans cette solution sont illustrés dans le **Tableau II.1**.

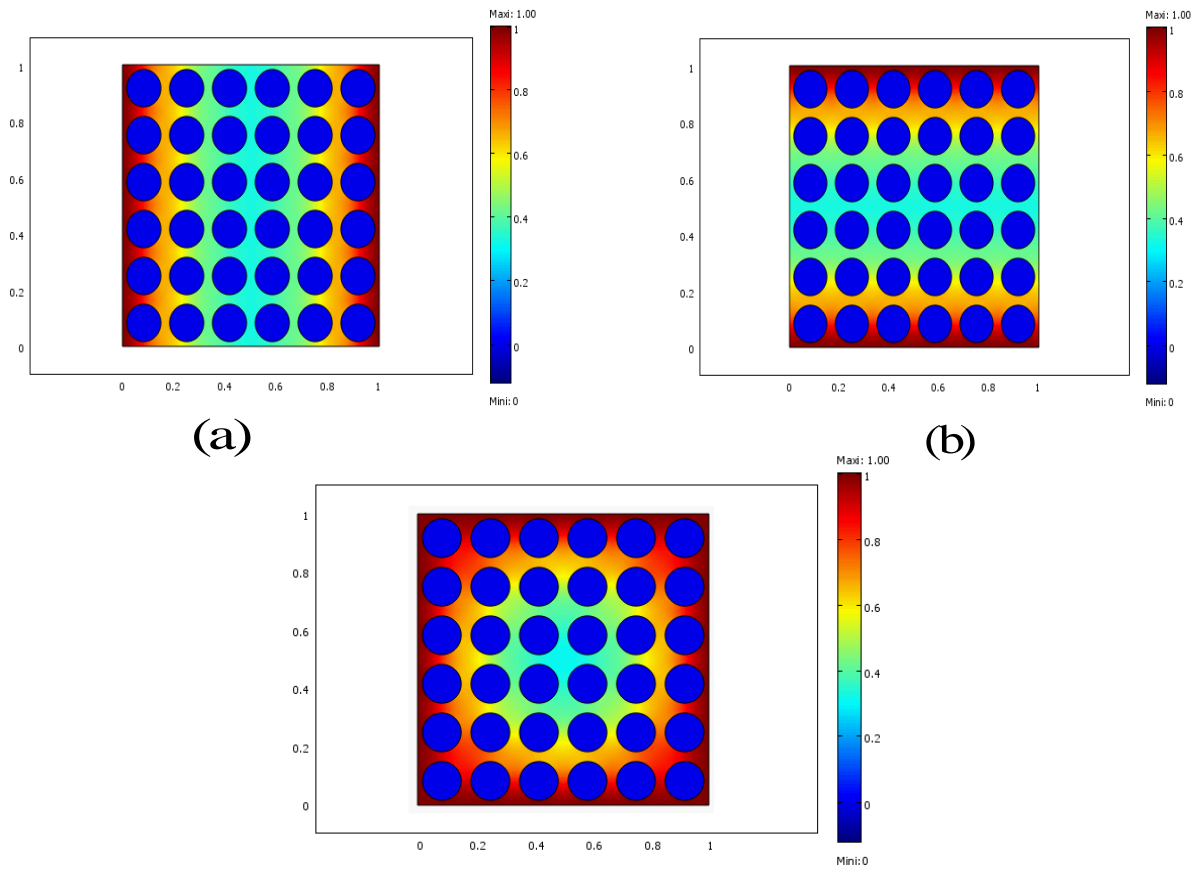
Paramètre hygroscopique		
	Résine pur (934)	Fibre imperméable (Verre)
Humidité Relative HR (%)	60 %	60 %
$\alpha$	0.063	---
$\beta$	1.4	---
Coefficient de diffusion isotrope D (mm <sup>2</sup> /s)	3.01 x 10 <sup>-8</sup>	D <sub>f</sub> = 0
Condition aux limite sur $\gamma_m$	M <sub>m</sub> = 19.44 %	---
Masse volumique $\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )	1300	2500

**Tableau II.1** Données des paramètres utilisés dans la résolution du problème de diffusion [Alfred al., 1979; Gueribiz et al., 2009 , 2011; Bourennane et al., 2019 ]

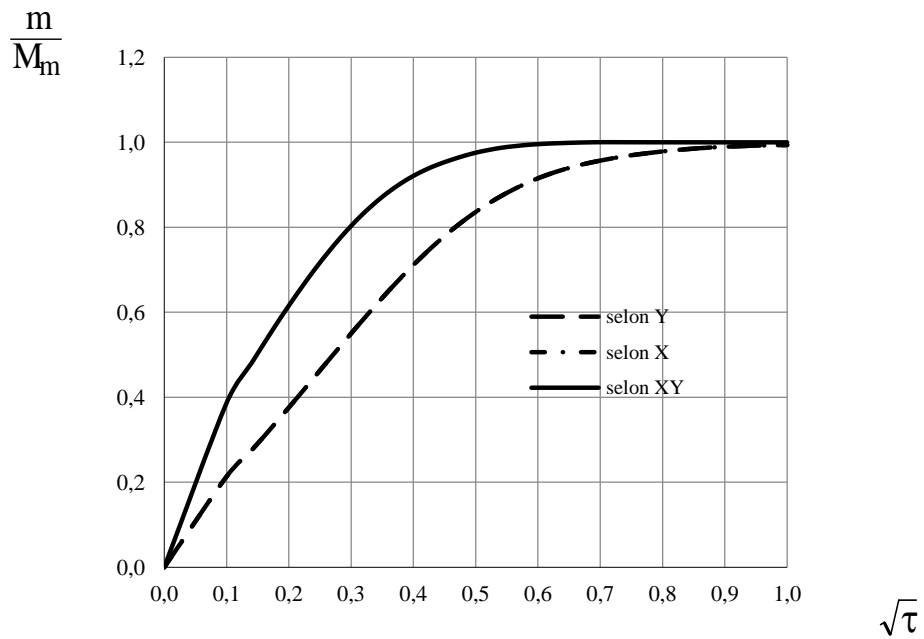
Pour cette résolution, l'équation (II.2) sera adimensionnée en effectuant le changement de variable

suisant:  $\mu = \frac{x}{L}$ ,  $\theta = \frac{y}{L}$ ,  $\tau = \frac{D}{L^2} t$ , (où L représente la longueur du VER, les dimensions du VER

deviennent égale  $1 \times 1$  au lieu de  $L \times L$  ). Pour cette résolution la fraction volumique des fibres est prise égale 50% de l'ensemble du VER, La solution du problème donne la distribution de la teneur en humidité dans le VER représentée sur la FigureII.2



**Figure II.2** Distribution de la teneur en humidité dans le cas de la matrice saine (a): chargement en humidité selon X, (b): selon Y, (c) selon XY).

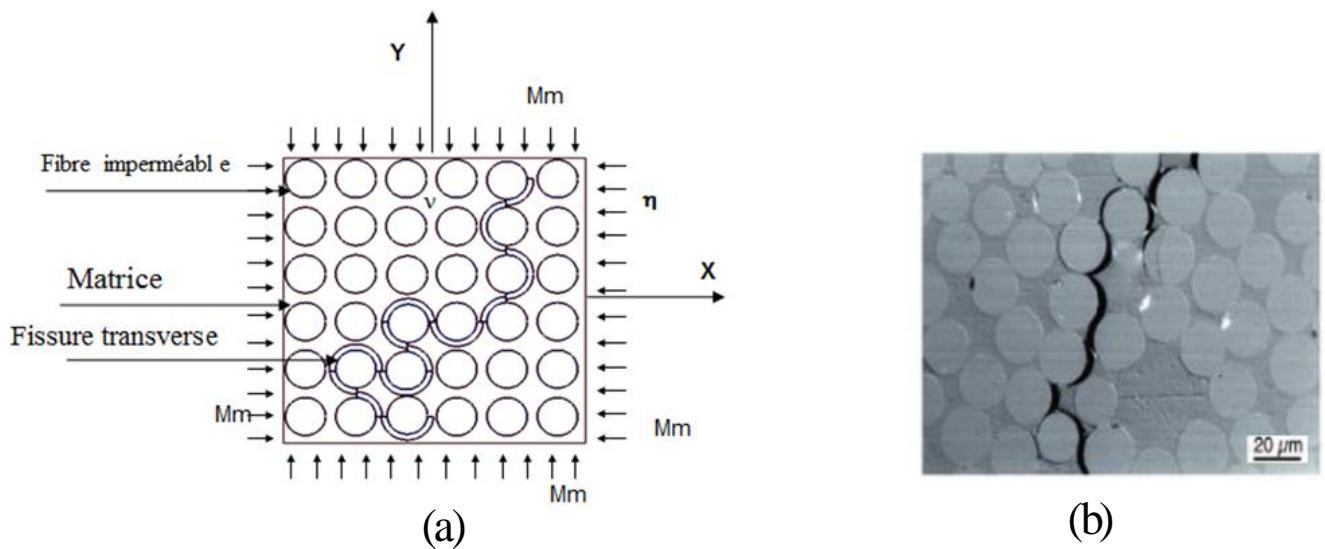


**Figure II.3** Evolution de cinétique de la diffusion dans le VER selon X, selon Y et XY.

Dans la Figure II.3 est présentée l'évolution de la teneur moyenne ou cinétique de la diffusion dans le composite sien (VER). Peut être obtenue à chaque instant juste par l'utilisation de la fonction intégration de la solution du Logiciel Comsol® cette courbe est présentée sur la Figure II.3. Nous constatons ne pas une différence entre les courbes selon X et selon Y . Mais il y a une différence significative entre la courbe pour un chargement XY.

### II.3. Diffusion dans le composite endommagé pour une fissure transverse

Nous considérons ici le cas de la diffusion dans le composite ayant une fissure transversale. Dans ce cas, la fissure commence à l'une des internes du VER et s'étend à l'intérieur de celui-ci comme indiqué sur la Figure II.4. Dans le cadre de la modélisation du processus de diffusion de l'humidité au sein d'un matériau qui a une fissure transverse pour différente type de la fraction volumique de fissure 1%, 3%, 5%, entre les fibres. Sur les bords de ce VER est imposée une teneur en eau  $M_m$ , Figure II.4 Au départ, cette fissure est supposées remplie en air sec. Dans la matrice la diffusion est supposée régit par la loi de Fick [Springer, 1981,1987, 1988]. Le VER est supposé être constitué de trois phases : la matrice, les fibres et la fissure, la fibre est supposée imperméable. Dans ce cas, le problème cellulaire de diffusion à résoudre dans le VER est défini par le système d'équation suivant II.3:



**Figure II.4** (a): VER relatif au composite endommagé; (b): Fissuration transverse (source, Gamsted et Sjögren, 1999 )

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial m(x,y,t)}{\partial t} = D \Delta m(x,y,t) & \text{sur } \nu \times \mathbb{R}_+^* \\ \frac{\partial m}{\partial (x,y)} = 0 & \text{à l'interface fibre / matrice} \\ m(x,y,t) = M_m (\text{HR}(\%)) & \text{aux bord de la résine } \in \eta \\ m_{\text{cavité}}(x,y,t) = \tilde{X} & \text{interface cavité / résine} \\ m(x,y,0) = m_0(x,y) & \forall x,y \in \nu \end{array} \right. \quad (\text{II.3})$$

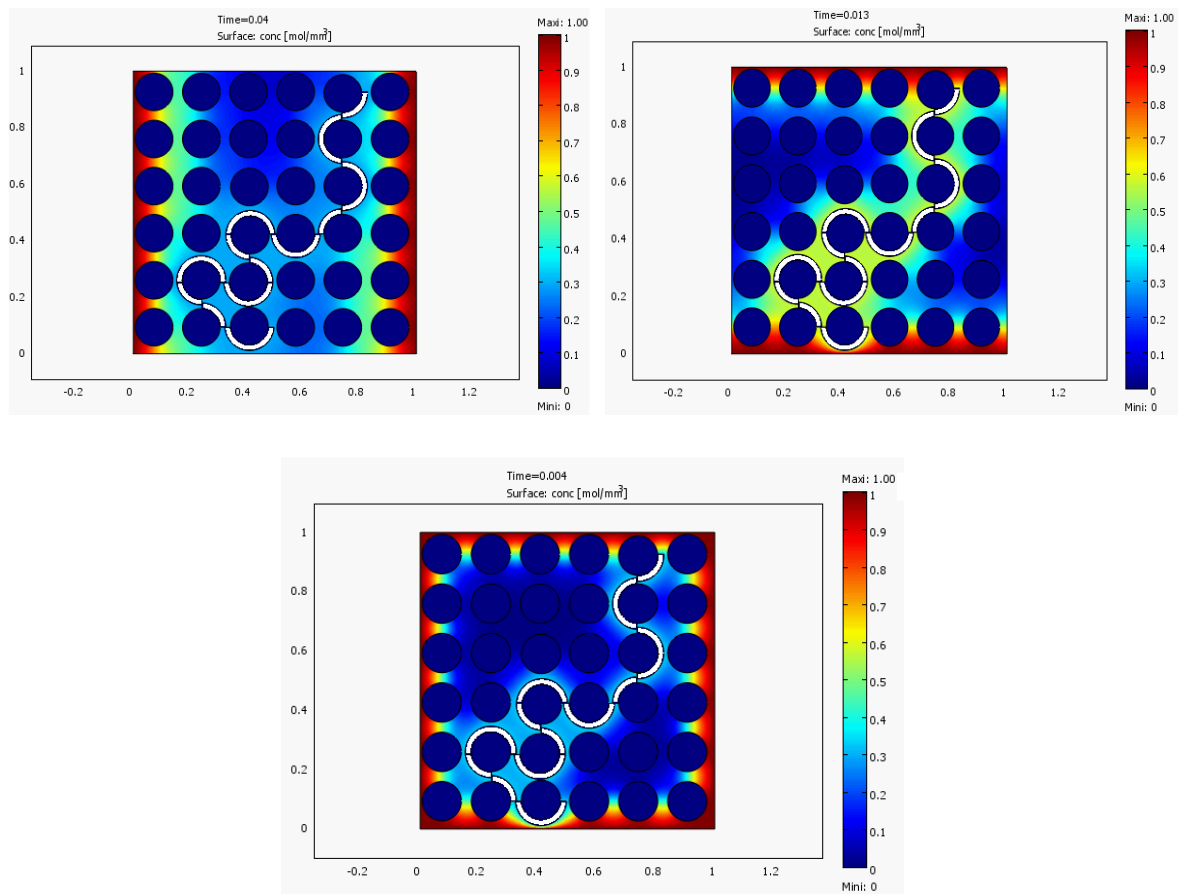
La résolution du problème de diffusion dans le cas de composite endommagée par l'équation (II.3). Les paramètres utilisés dans la résolution du problème correspondants à ceux du Tableau (II.1).

### II.3.1 La teneur à l'interface matrice / fissure

Nous partons de l'hypothèse que la fissure dans la matrice est remplie d'air et nous raisonnons en termes d'humidité relative pour cet air. Ce taux d'humidité relative dépend de l'environnement extérieur dans notre cas la matrice polymère. (Bourennane et al., 2019, Gueribiz et al., 2009, 2011) :

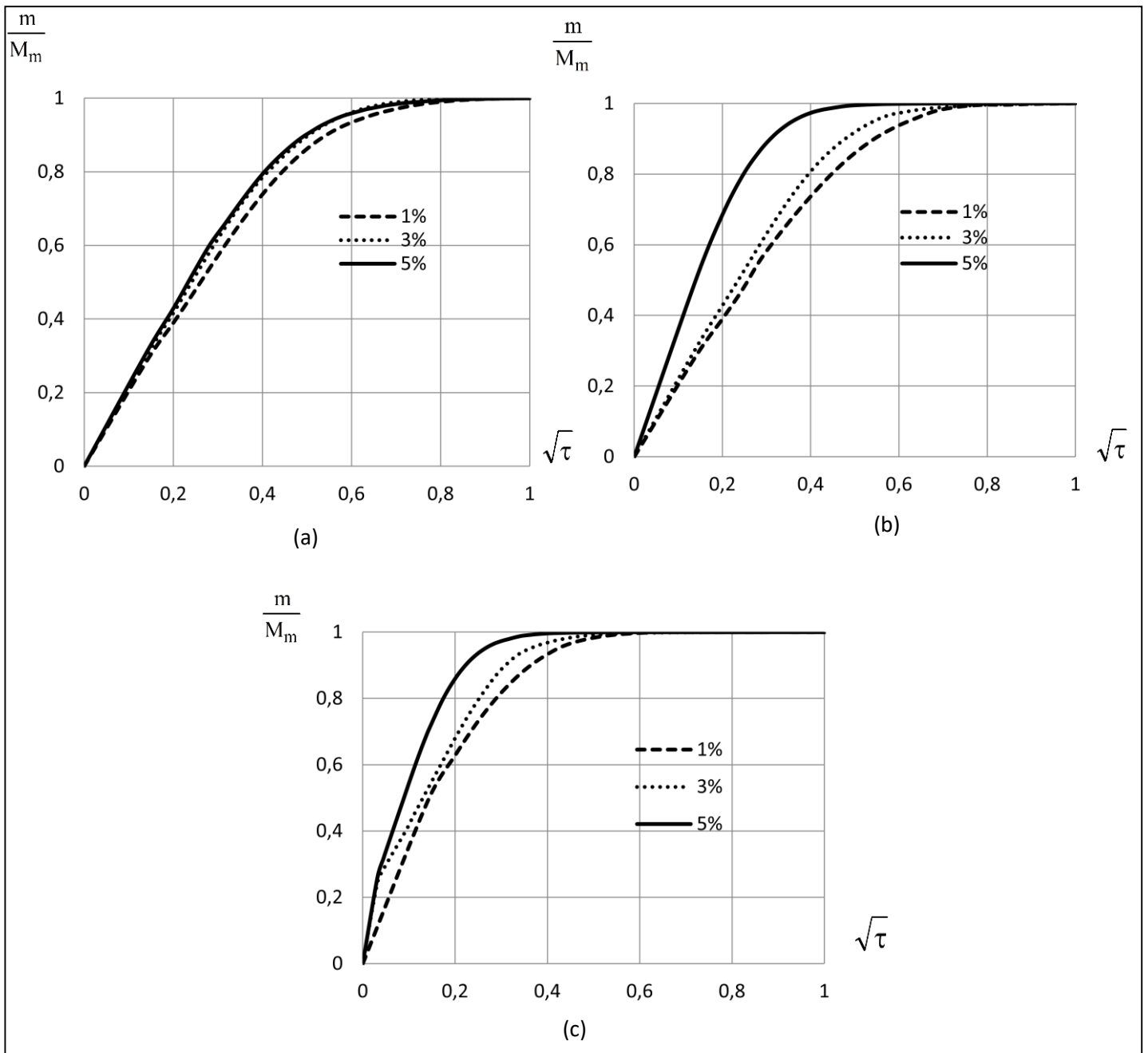
$$\tilde{X} = 0,622 \times \frac{P_{VS} \times (M_m / \alpha)^{\frac{1}{\beta}}}{100 \times P_{atm} - P_{VS} \times (M_m / \alpha)^{\frac{1}{\beta}}} \quad (\text{II.4})$$

Où  $P_{atm}$ ,  $P_{VS}$ ,  $\tilde{X}$  sont respectivement : la pression atmosphérique, la pression de vapeur saturante et l'humidité absolue exprimée en  $(Kg_{\text{eau}} / Kg_{\text{ai sec}})$  dans la fissure.



**Figure II.5** Cartographie de la diffusion d'eau dans un composite endommagé par une fissure transversal

Dans la Figure II.5 est présenté la résolution du problème de diffusion dans le cas du composite endommagé, est présentée l'évolution de la cinétique de diffusion dans ce cas, selon laquelle la fissure tend à avoir une forme transversale. Notons que la forme géométrique de la fissure choisie. Dans la Fig II.5 sont présentés les résultats de la simulation sous forme de cartographies de diffusion.



**Figure II.6** La cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme d'une fissure transversale pour différente de fraction volumique.

(a) selon X. (b) Selon Y, (c) Selon XY

La **Figure II.6** présente l'évolution de la cinétique de diffusion prédite pour une fissure transversale dans un composite uniforme. Nous constatons un écart significatif sur la vitesse de la cinétique de diffusion, pour un allongement accentué de la fissure transversale dans le sens Y et sens XY, pour le sens X, Nous constatons un écart ne pas important entre les courbes de 3% et 5% de la fissure. mais nous constatons la vitesse tend à décroître lorsque la fraction volumique de fissure tend vers 1%. Ceci explique que le fissure entraver la vitesse de la cinétique de diffusion. D'autre part, nous constatons, dans le cas du chargement XY les courbe de la cinétique de diffusion le comportement Dual Fick, est plus prononcé par rapport au chargement dans le sens X et Y. Parce qu'il y a deux ponts sur les courbes de sens XY, mais pour le sens X et Y nous constatons la cinétique Fieckienne.

## II.4. Méthode d'identification dans le cas d'un comportement Dual Fick

Le modèle Dual Fick est utilisé dans l'étude des vieillissements ou l'endommagement des polymères et composites dans le cas où les relevés expérimentaux de la prise en eau présentent un écart par rapport à la loi de Fick. (Placette et al. Parscau et al., 2011, 2016). Le modèle basé sur l'hypothèse de deux somme cinétiques de type Fickienne interviennent simultanément Figure II.7. Ainsi deux processus se produisent en parallèle avec deux coefficients de diffusion  $D_1$  et  $D_2$ , de même que deux capacités maximales d'absorption d'humidité  $M_{s1}$  et  $M_{s2}$ . Dans ce cas l'équation qui décrit le processus global de diffusion s'écrit :

Cas 2D :

$$\frac{\partial m_1}{\partial t} + \frac{\partial m_2}{\partial t} = D_1 \left( \frac{\partial^2 m_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_1}{\partial y^2} \right) + D_2 \left( \frac{\partial^2 m_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m_2}{\partial y^2} \right) \quad (II.5)$$

Selon (Crank, 1975 ) Les solutions correspondantes sont respectivement :

$$M_t = \sum_{i=\{1,2\}} \left[ \left( 1 - \left( \frac{8}{\pi^2} \right)^2 \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{((2k+1)^2 + (2n+1)^2)} \right) * \exp \left( -\pi^2 * t * \left( \frac{D_i * (2k+1)^2}{l^2} + \frac{D_i * (2n+1)^2}{l^2} \right) \right) \right) \right] M_{si}$$

II.6

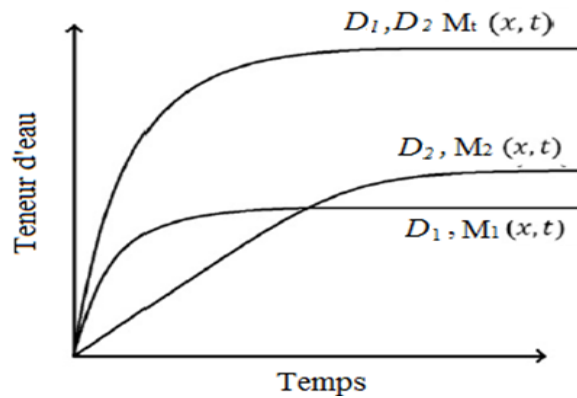
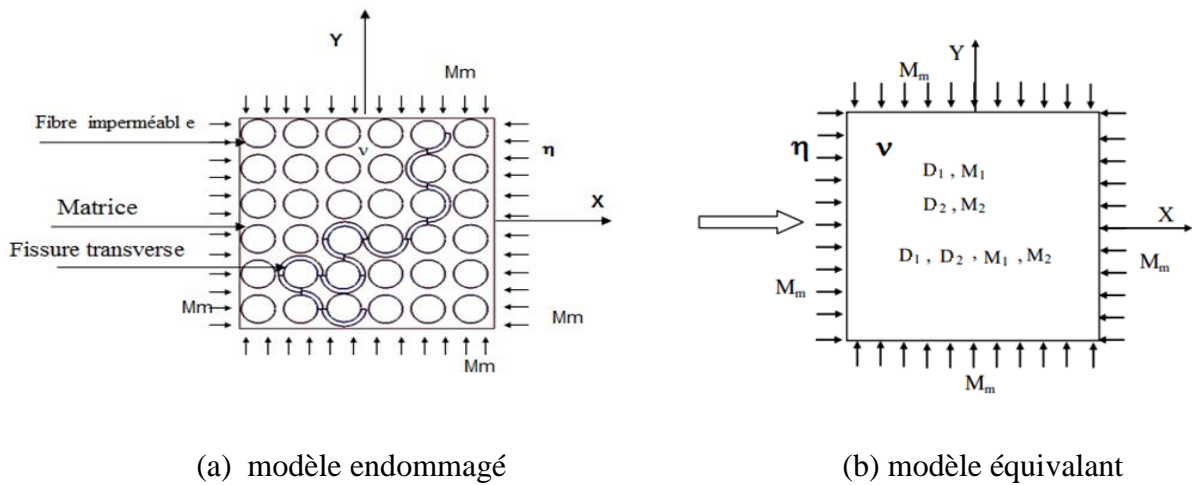


Figure II.7 Principe du modèle Dual Fick : (2D)

L'identification des paramètres de diffusion ( $D_i$ ,  $M_{si}$ ) est effectuée en confrontant les valeurs de la solution obtenue par Comsol® à la solution analytique dans ce cas. Pour cela on utilise un algorithme

Les modèles homogènes pour le composite endommagé dans ce cas présentés sur la Figures II.8



**Figure II.8** Modèle équivalent du composite endommagé pour le cas 2D

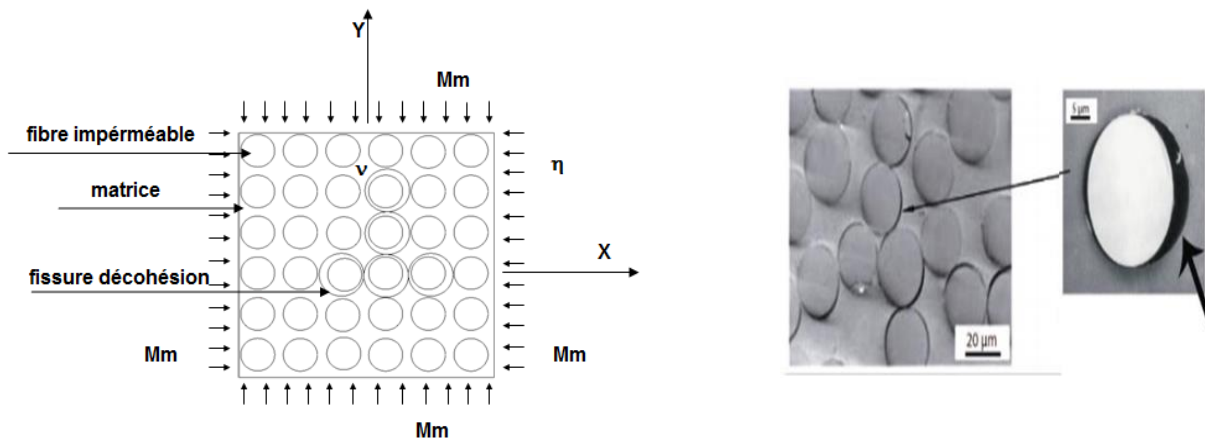
<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
<i>Fissure transverse uniforme</i>				
<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>				
<i>Chargement selon XY</i>				
<i>Fraction volumique</i>	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
$f_V = 1\%$	20	0.17	0.047	0.95
$f_V = 3\%$	70	0.21	0.092	0.908
$f_V = 5\%$	72	0.449	0.078	0.9212

**Tableau II.2** Résultats d'identification des coefficients de diffusion effectifs selon XY.

Dans le Tableau II.2, les résultats de la détermination des courbes (c) de la Figure II.6 sont présentés dans le cas d'un chargement dans la direction XY. Sous ces termes, comme mentionné précédemment, nous avons un comportement Dual Fick de la géométrie transverse après quoi deux coefficients de diffusion effectifs sont déterminés, nous constatons les premiers coefficients de diffusion est supérieur au second. Ceci est confirmé à la courbe d'évolution de la cinétique de diffusion qui indique que le processus de diffusion est initialement accéléré et ralenti à mesure qu'il approche de la saturation. Parce que la vitesse de diffusion effectif  $D_1$  plus rapide.

## II.5. Cas d'une fissure décohésion

Nous considérons ici le cas de la diffusion dans une matrice ayant une fissure décohésion. Dans ce cas, la fissure commence à l'une des interne du VER et s'étend à l'intérieur de celui-ci comme indiqué sur la Figure II.6. Dans le cadre de la modélisation du processus de diffusion de l'humidité au sein d'un matériau qui a une fissure décohésion pour différente type de fraction volumique (1%, 3%, 5%).

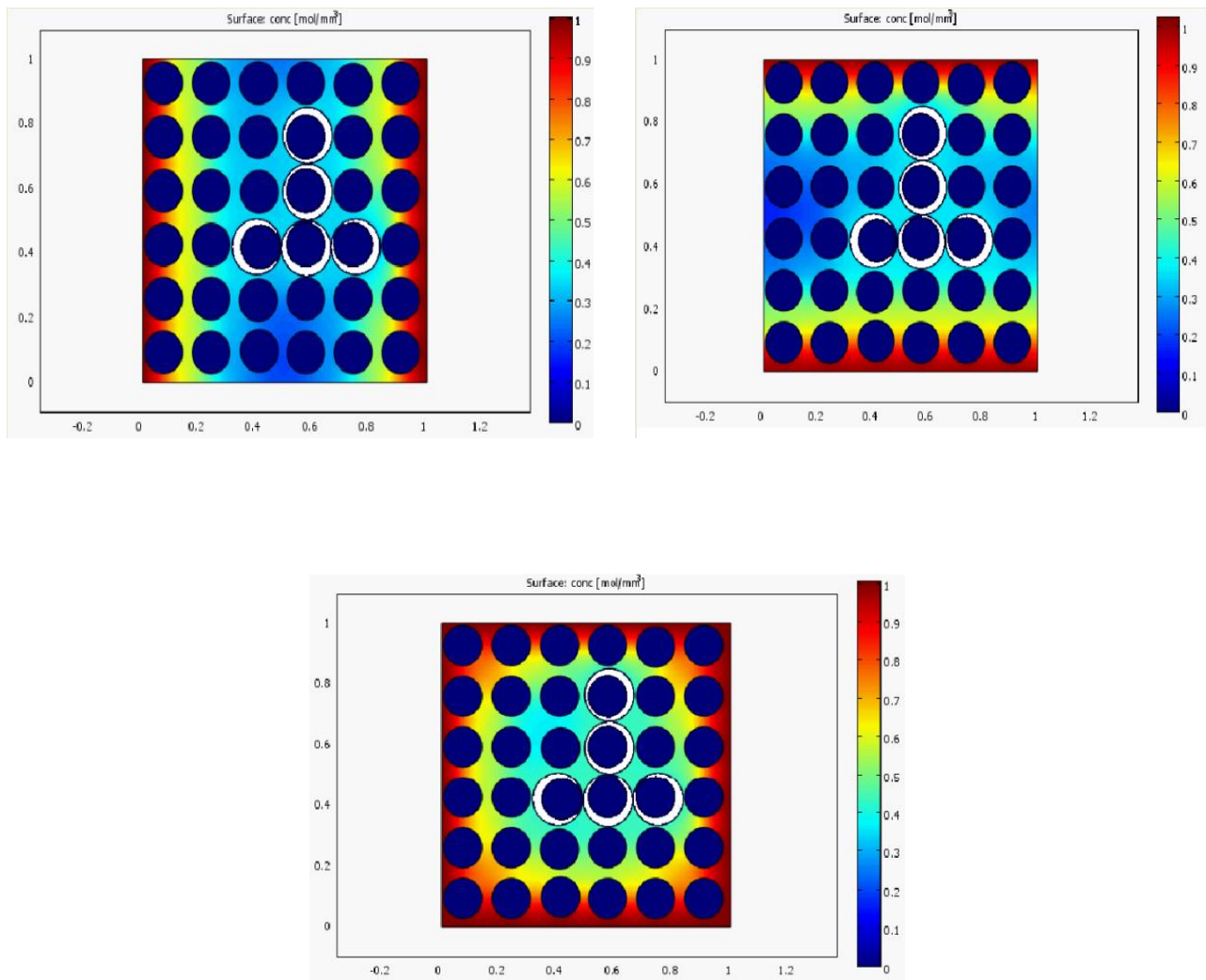


**Figure II.10** VER relatif au composite endommagé (a) : diffusion unidirectionnelle selon l'axe XY

Dans le cadre de la modélisation du processus de diffusion de l'humidité au sein d'un matériau qui a une fissure décohésion pour différente type de fraction volumique 1%, 3%, 5% , Sur les bords de ce VER est imposée une teneur en eau en terme humidité Mm Figure II.10, Au départ, ces fissures sont supposées remplies en air sec. Dans la matrice la diffusion est supposée régit par la loi de Fick [Springer, 1981,1987, 1988]. Le VER est supposé être constitué de trois phases : la matrice, les fibres et la fissure, la fibre est supposée imperméable. Dans ce cas, le problème cellulaire de diffusion à résoudre dans le VER est défini par le système d'équation suivant :

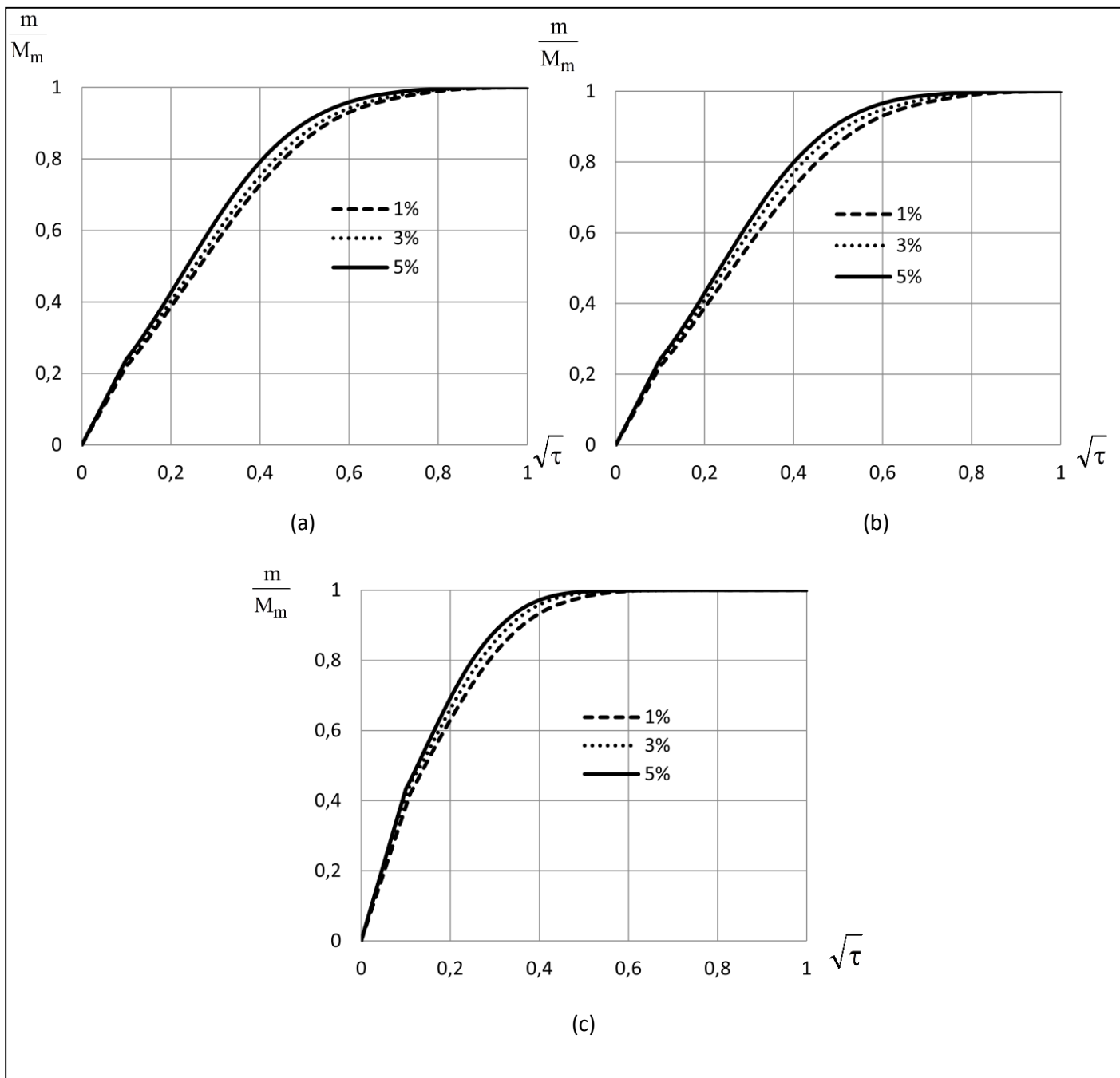
$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial m(x,y,t)}{\partial t} = D \Delta m(x,y,t) & \text{sur } v \times \mathbb{R}_*^+ \\ \frac{\partial m}{\partial n} = 0 & \text{à l'interface fibre / matrice} \\ m(x,y,t) = M_m(\text{HR}(\%)) & \text{aux bord de la résine } \in \eta \\ m_{\text{cavité}}(x,y,t) = \tilde{X} & \text{interface cavité / résine} \\ m(x,y,0) = m_0(x,y) & \forall x,y \in v \end{array} \right.$$

Pour la résolution du problème de diffusion nous adoptons la même démarche suivie dans le cas de composite endommagé, l'équation (II.1) sera adimensionnée et les paramètres utilisés dans la résolution du problème correspondants à ceux du Tableau (II.1).



**Figure II.11** Diffusion d'eau dans un échantillon présentant un endommagement sous la forme d'une fissure décohésion

Dans la Figure II.11 est présenté la résolution du problème de diffusion dans le cas du composite endommagé, est présentée l'évolution de la cinétique de diffusion dans ce cas, selon laquelle la fissure décohésion. Notons que la forme géométrique de la fissure choisie. Dans la Figure II.11 sont présentés les résultats de la simulation sous forme de cartographies de diffusion.



**Figure II.12** Evolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme de décohésion uniforme fibre/matrice (a) selon X ; (b) Selon Y ; (c) Selon XY.

Dans la Figure II.12 sont tracées les courbes de l'évolution de la cinétique de diffusion pour un composite présentant un endommagement sous forme d'une décohésion fibre/matrice. Trois types de fraction volumique de cet endommagement sont considérées (1%, 3%, 5%). Pour un chargement

en humidité dans le sens X nous constatons un écart important entre la courbe. Pour ces dernières l'évolution de la cinétique de diffusion est Dual Fick pour toute les directions sens X et Y et XY.

<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
<i>Fissure décohésion uniforme</i>				
<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>				
<i>Chargement selon XY</i>				
<i>Fraction volumique</i>	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
$f_V = 1\%$	33.53	0.17	0.056	0.94
$f_V = 3\%$	46.48	0.205	0.05	0.949
$f_V = 5\%$	47.45	0.23	0.054	0.94

**Tableau II.3** Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion (Figure II.12-c)

Dans le tableau II.3 sont présentés les résultats d'identification pour les courbes (c) de la Figure II.12 dans le cas d'un chargement dans le sens des XY. Selon ces conditions, comme nous l'avons mentionné auparavant nous avons un comportement Dual Fick pour une géométrie décohésion de différent type de fraction volumique. Par la suite deux coefficients de diffusion effective sont identifiés dans le premier est supérieur au deuxième, de plus, ces résultats sont similaires.

## II.6 Conclusion :

Nous avons abordé le problème de la diffusion d'humidité dans un composite en présence d'un endommagement se présentant sous la forme d'une fissure transverse et décohésion. La modélisation de la diffusion dans le composite est supposée régie par la loi de Fick tandis que dans la fissure, une approche thermodynamique a été mise en œuvre. Deux cas ont été traités avec des différentes fractions volumique: le cas où la fissure transverse uniforme et fissure décohésion uniforme. Deux paramètres ont été choisis pour la modélisation de la fissure : sa configuration géométrique et sa fraction volumique. À titre de comparaison, Dans ce cas, les effets induits par une variabilité de la fraction volumique de ces fissures. Dans le cas transverse, les résultats obtenus montrent les coefficients de diffusion significative lorsque la fissure présente une forme décohésion.

***Chapitre III***  
***Modélisation de***  
***l'effet de***  
***l'endommagement***  
***sur le comportement***  
***diffusif dans un***  
***matériau composite***  
***à fibre imperméable***  
***aléatoire***

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous aborderons la modélisation du comportement diffusif en présence d'endommagement par fissuration d'un composite amorphe, le problème n'était pas d'une grande importance par rapport au comportement mécanique du composite, pour lequel le problème est bien défini. Des solutions plus précises ont été proposées par plusieurs auteurs, apport d'eau ou d'humidité relative en présence d'endommagement sous forme de microfissures Une attention particulière a été portée à l'étude d'un problème connexe dans les travaux de (Gueribiz et al. 2009, 2011 ; Bornan et al., 2019). Les auteurs ont modélisé les effets des endommagements sur le coefficient de diffusion et la capacité maximale d'absorption d'humidité en supposant que ces fissures étaient saturées.

Cet endommagement sera représenté par une fissure transversale et décohésion. Ensuite, nous proposons de modéliser la diffusion des fissures en nous basant sur une approche thermodynamique tout en restant dans un cadre d'approche découplé. Dans le cas de fissure transversale et de décohésion d'un composite aléatoire.

### III.2 Diffusion dans le composite sain

Dans ce cas, on considère un VER représentatif du composite avec une fibre imperméable. Nous supposons une répartition amorphe des fibres et une continuité du milieu entre les fibres et la matrice telle qu'il n'y ait pas de porosité. La composite sonore (VER) consiste en un milieu continu dans lequel il n'y a aucune porosité ou autre défaut. La capacité maximale d'absorption d'humidité est imposée sur les bords de cette VER. Dans ce cas, cette grandeur sera supposée liée à l'humidité relative HR du milieu environnante selon l'expression définie par (Loos et Springer, 1979).

$$M_m = \alpha HR^\beta \quad \text{III.1}$$

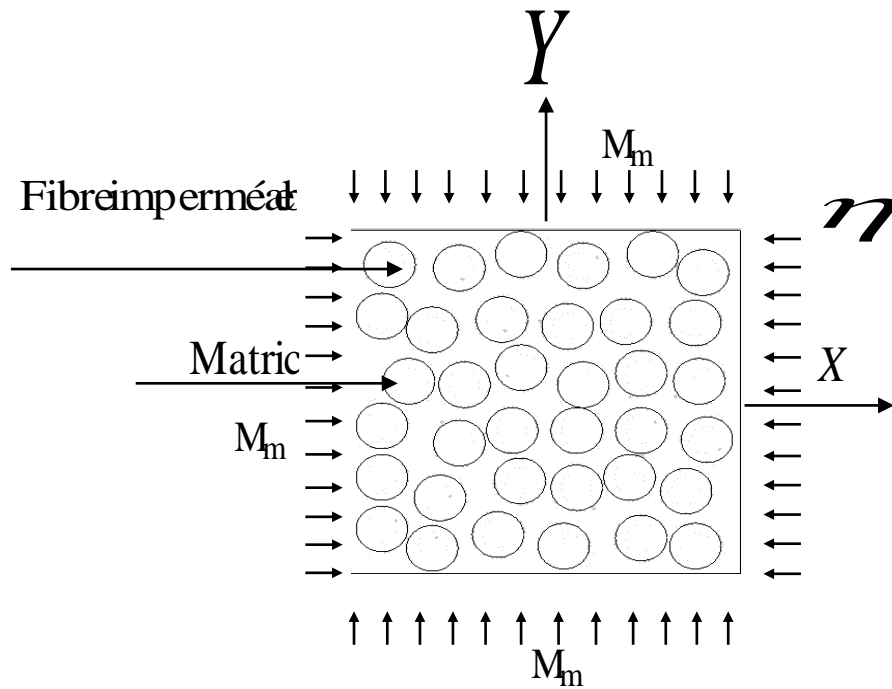


Figure III.1 VER relatif à un composite saine

Le domaine occupé par le VER est noté  $\eta$  dans lequel chaque point est repéré par ses coordonnées  $(x, y)$ . Selon l'hypothèse d'une approche dispersée pour laquelle les paramètres de diffusion (coefficient de diffusion et la teneur en humidité) sont indépendants de l'état mécanique, ce cas de la diffusion est supposée régir par la loi de Fick [Crank, 1978, Delasi, R., Whiteside, J.B, 1978].

Dans ce cas le problème local à résoudre dans le VER peut être exprimé par :

$$\begin{cases} \frac{\partial m(x, y, t)}{\partial t} = D \Delta m(x, y, t) & \text{sur } \eta \times \mathbb{R}_*^+ \\ m(x, y, t) = M_m(\text{HR}(\%)) & \text{aux bord de la résine } \in \nu \\ m(x, y, 0) = m_0(x, y) & \forall x, y \in \eta \end{cases}$$

(III.2)

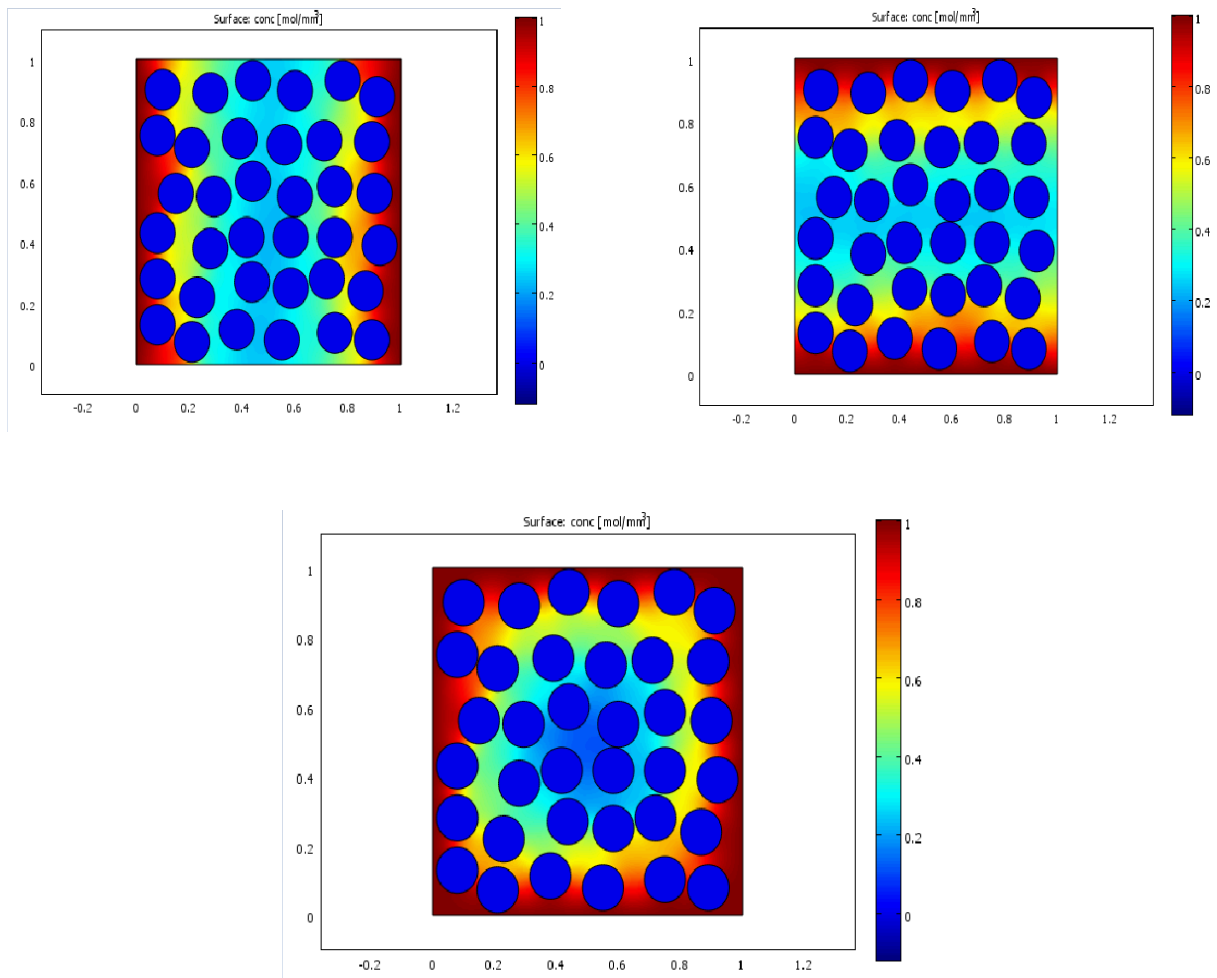
$\eta$  Représente les frontières du domaine  $\eta$   $\nu_m = \partial \eta$ ,  $M_m$  la teneur en humidité  $M_m$  imposée aux frontières du domaine  $\eta$  de le composite,  $D$  est le coefficient de diffusion de le composite,  $m_0(x, y)$  est la teneur en humidité existant dans le VER à l'instant  $t=0$  qui est généralement considérée nulle.

Pour la résolution du problème nous adopterons une résolution par éléments finis, en utilisant le logiciel (Comsol ®). Les paramètres utilisés dans cette solution sont illustrés dans le **Tableau III.1**.

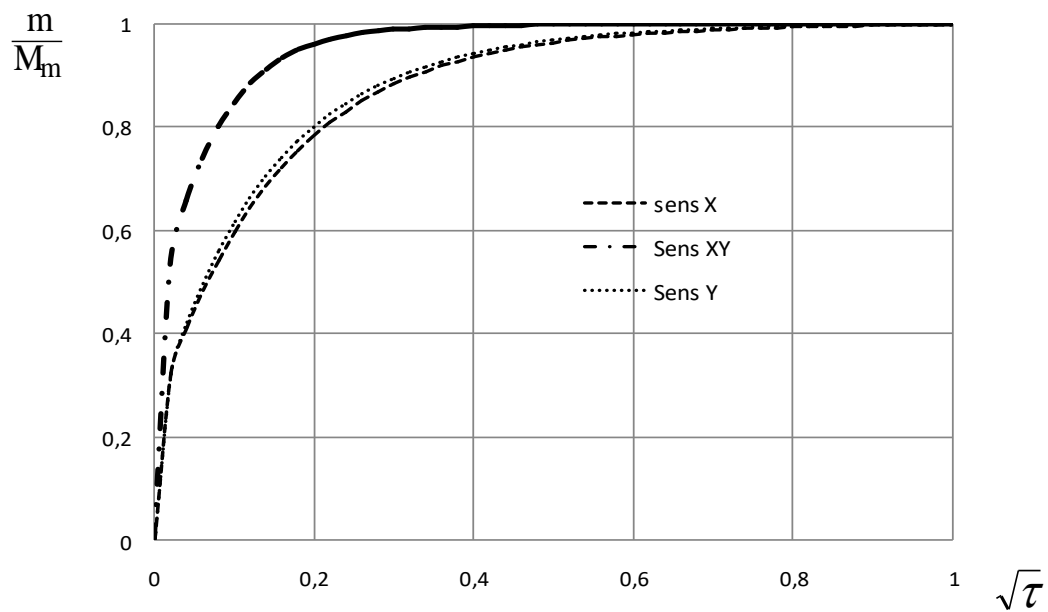
Paramètre hygroscopique		
	Résine pur (934)	Fibre imperméable (Verre)
Humidité Relative HR (%)	60 %	60 %
$\alpha$	0.063	---
$\beta$	1.4	---
Coefficient de diffusion isotrope D (mm <sup>2</sup> /s)	3.01 x 10 <sup>-8</sup>	D <sub>f</sub> = 0
Condition aux limite sur $\gamma_m$	M <sub>m</sub> = 19.44 %	---
Masse volumique $\rho$ (Kg / m <sup>3</sup> )	1300	2500

**Tableau. III.1** Données des paramètres utilisés dans la résolution du problème de diffusion [Alfred al., 1979; Shirrell et al., 1978; Gueribiz et al., 2009 , 2011; Bourenane et al., 2019 ]

Pour cette résolution, l'équation (III.2) sera adimensionnée en effectuant le changement de variable suivant:  $\phi = \frac{x}{L}$ ,  $\varepsilon = \frac{y}{L}$ ,  $\omega = \frac{D}{x^2} t$ , (où L représente la longueur du VER, les dimensions du VER deviennent égale  $1 \times 1$  au lieu de  $L \times L$ ). Pour cette résolution la fraction volumique des fibres est prise égale 50% de l'ensemble du VER, La solution du problème donne la distribution de la teneur en humidité dans le VER représentée sur la Figure **III.2**



**Figure III.2** Distribution de la teneur en humidité dans le cas de composite sain chargement en humidité (selon X, selon Y, selon XY) .



**Figure III.3** Evolution de cinétique de la diffusion dans le VER selon X, selon Y et XY.

Dans la Figure III.3 est présentée l'évolution de la teneur moyenne ou cinétique de la diffusion dans le composite sien (VER). Peut être obtenue à chaque instant juste par l'utilisation de la fonction intégration de la solution du Logiciel Comsol® cette courbe est présentée sur la Figure III.3. Nous constatons il y a une petite différence entre les courbes selon X et selon Y parce que la dispersion des fibres ne pas uniforme (Amorphe). Cela prouve que le rôle des fibres a un effet sur la cinétique de la diffusion dans le sens X et Y et XY.

### III.3. Cas d'une fissure transverse aléatoire

Nous considérons ici le cas de la diffusion dans un composite ayant une fissure transverse aléatoire à l'intérieur, celui-ci comme indiqué sur la Figure III.4. Dans le cadre de la modélisation du processus de diffusion de l'humidité au sein d'un matériau qui a une fissure transversal pour différente type de fraction volumique (1%, 3%, 5%), la condition sur les frontières de cette fissure est identique à celle appliquée sur les autres frontières du VER [ Roy et Bandorawalla, 1999Mu et al., 2013, Yue Li et al., 2016] en a garde les meme condition avec la forme uniforme.

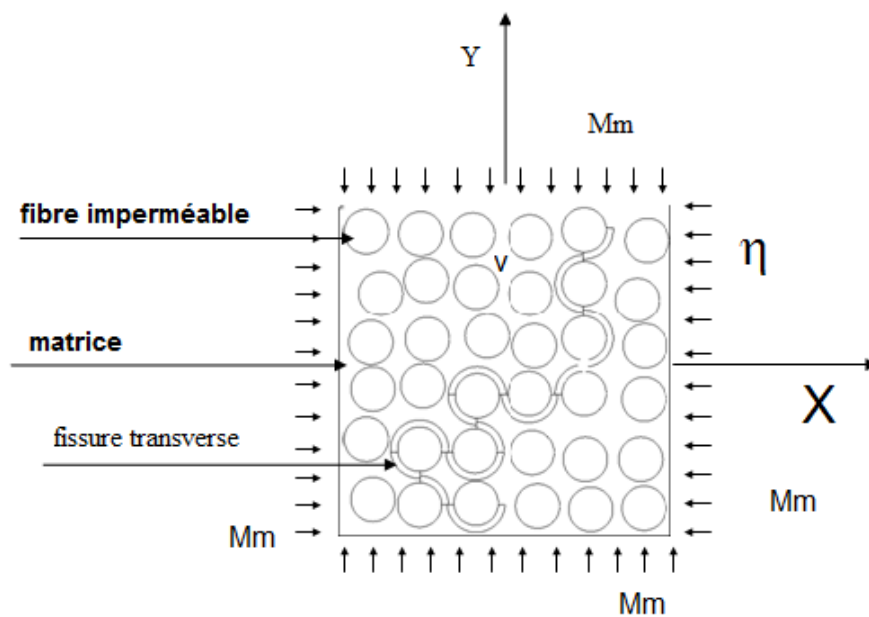
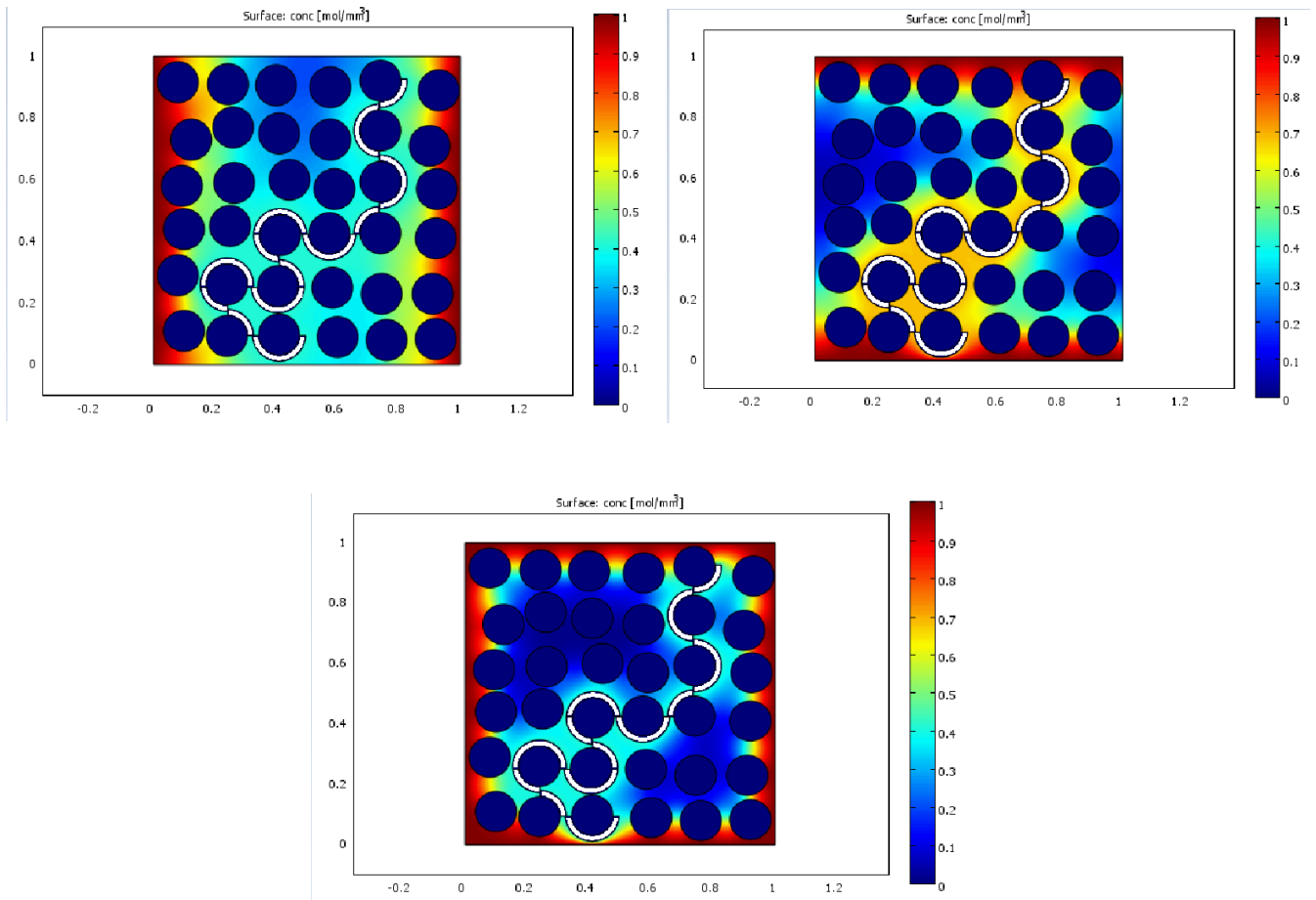


Figure III.4 VER relatif au composite endommagé selon l'axe XY

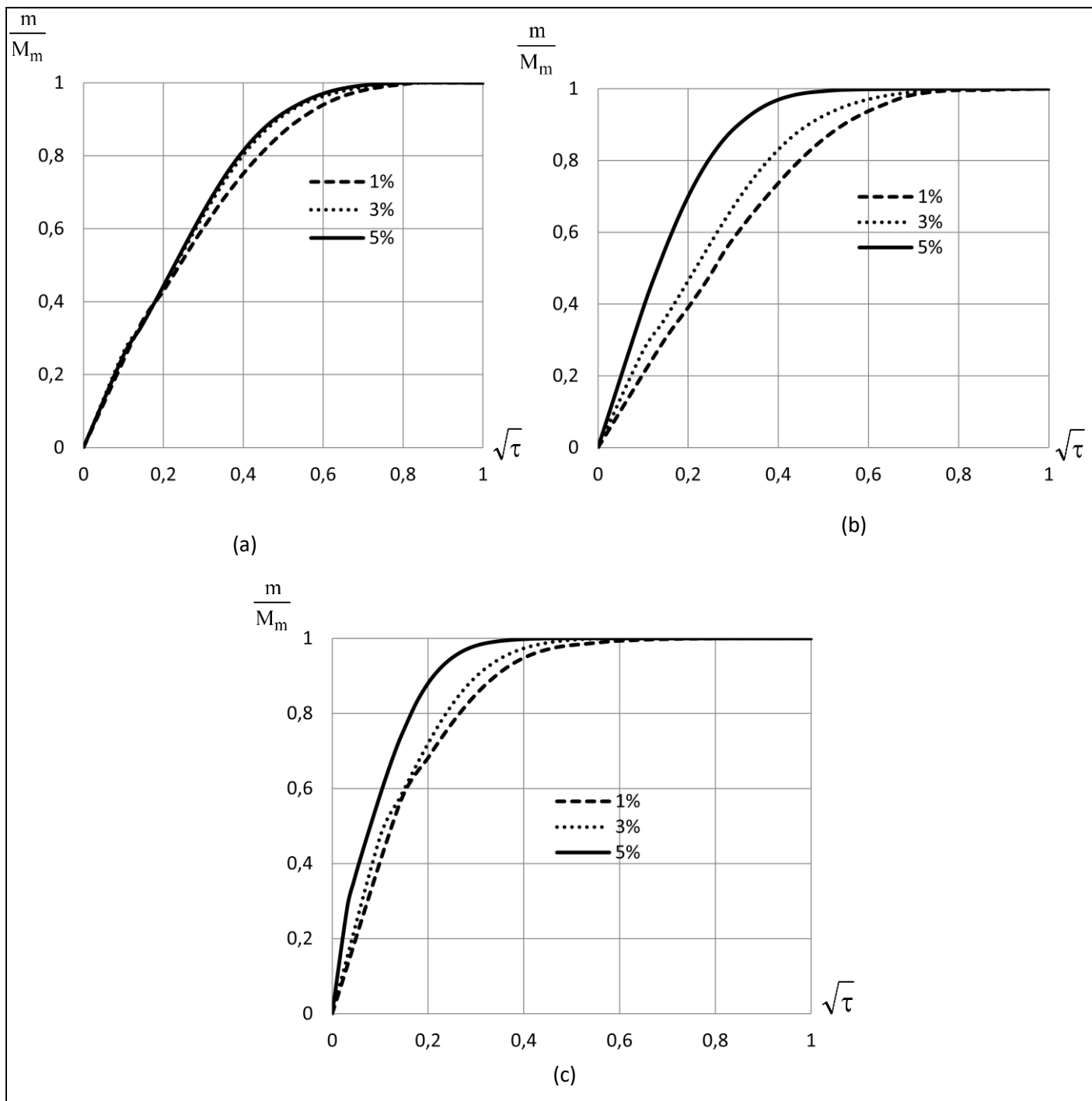
$$\left\{ \begin{array}{ll}
\frac{\partial m(x,y,t)}{\partial t} = D \Delta m(x,y,t) & \text{sur } \nu \times \mathbb{R}_+^* \\
\frac{\partial m}{\partial(x,y)} = 0 & \text{à l'interface fibre / matrice} \\
m(x,y,t) = M_m(\text{HR}(\%)) & \text{aux bord de la résine } \in \eta \\
m_{\text{cavité}}(x,y,t) = \tilde{X} & \text{interface cavité / résine} \\
m(x,y,0) = m_0(x,y) & \forall x,y \in \nu
\end{array} \right. \quad \text{III.3}$$

Pour la résolution du problème de diffusion nous adoptons la même démarche suivie dans le cas de composite aléatoire endommagé, l'équation **III.3** sera adimensionnée et les paramètres utilisés dans la résolution du problème correspondants à ceux du Tableau **III.2**. Pour la valeur du coefficient de diffusion d'humidité dans la fissure. Pour le composite, le taux de renforcement des fibres est pris égale 50% et celui des fissures est de 5%. Pour la forme géométrique de la fissure exprimée par le paramètre  $\eta$ , nous considérons trois forme géométrique de la fissure, suivant que la fissure peut avoir une forme transversale qui correspondant a des faibles valeurs de  $\eta$  ou une forme convexe relative à des valeurs moyennes de  $\eta$  ou à la limite 1 de se cas correspondant à  $\eta$  égale 1.



**Figure III.5** Cartographie de la diffusion d'eau dans un échantillon présentant un endommagement sous la forme d'une fissure transversale pour différente fraction volumique

La **Figure III.5** présente la solution au problème de diffusion dans le cas du composite endommagé, et présente l'évolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'une fissure transversale aléatoire, selon laquelle la fissure tend à avoir une forme de fissure transversale. Notez que la géométrie de la fissure est choisie dans la **Figure III.5**, les résultats de la simulation sont présentés sous la forme de cartes de diffusion.



**Figure III.6** Evolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme d'une fissure transverse aléatoire différente fraction. (a) selon X. (b) Selon Y, (c) Selon XY.

Dans le Figure III.6 sont tracées les courbes de l'évolution de la cinétique de diffusion dans le cas de l'endommagement sous forme d'une fissure transversale d'un composite aléatoire sous différents chargements en humidité. Pour tout type de chargement, les courbes montrent une évolution de type Dual Fick prononcé dans le sens X et XY par rapport aux autres courbes dans le sens Y, surtout lorsque la fissure tend vers une fraction volumique 5%.

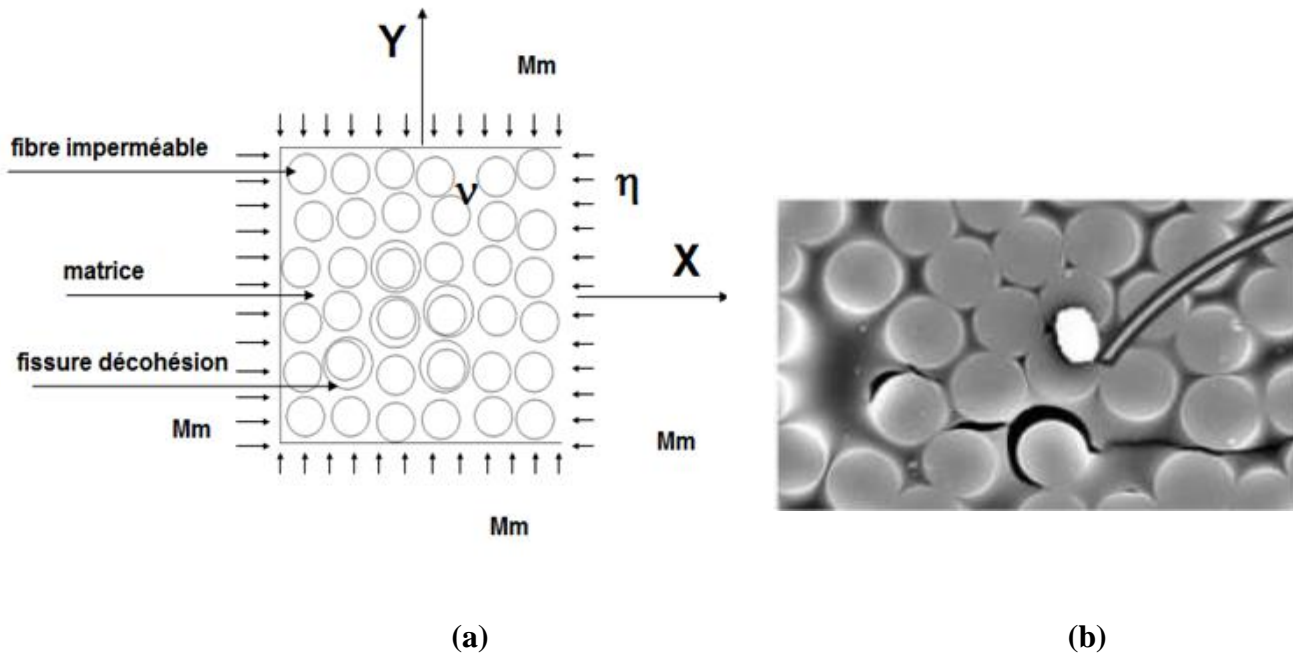
<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
<i>Fissure transverse aléatoire</i>				
<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>				
<i>Chargement selon XY</i>				
<i>Fraction volumique</i>	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
$f_V = 1\%$	22.02	0.18	0.165	0.833
$f_V = 3\%$	46.36	0.24	0.111	0.888
$f_V = 5\%$	439.11	0.49	0.113	0.886
	74			

**Tableau III.2** Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion (Figure III.6-c)

Dans le Tableau III.2, les résultats de la détermination des courbes (**Figure III.6-c**). Sont présentés dans le cas d'un chargement dans la direction XY. Sous ces termes, comme mentionné précédemment, on a un comportement Dual Fick de la géométrie transverse puis on détermine deux coefficients de diffusion effectifs dans le premier est supérieur au second dans tout les trois cas. Cela correspond à la courbe cinétique évolutive de diffusion indiquant que le processus de diffusion est initialement accéléré et ralenti à mesure qu'il approche de la saturation. En revanche, que le coefficient de diffusion effectif, ces résultats indiquent que ce dernier augmente lorsque la fraction volumique de la fissure augmente.

### III.4 Cas d'une fissure décohésion aléatoire

Nous considérons ici le cas de la diffusion dans un composite avec une fissure décohésion aléatoire. Dans ce cas, ce dernier est comme indiqué sur la Figure III.7. Dans le cadre de la modélisation du processus de diffusion de l'humidité au sein d'un matériau avec une fissure de décohésion amorphe d'un type de fraction volumique différent (1%, 3%, 5%)

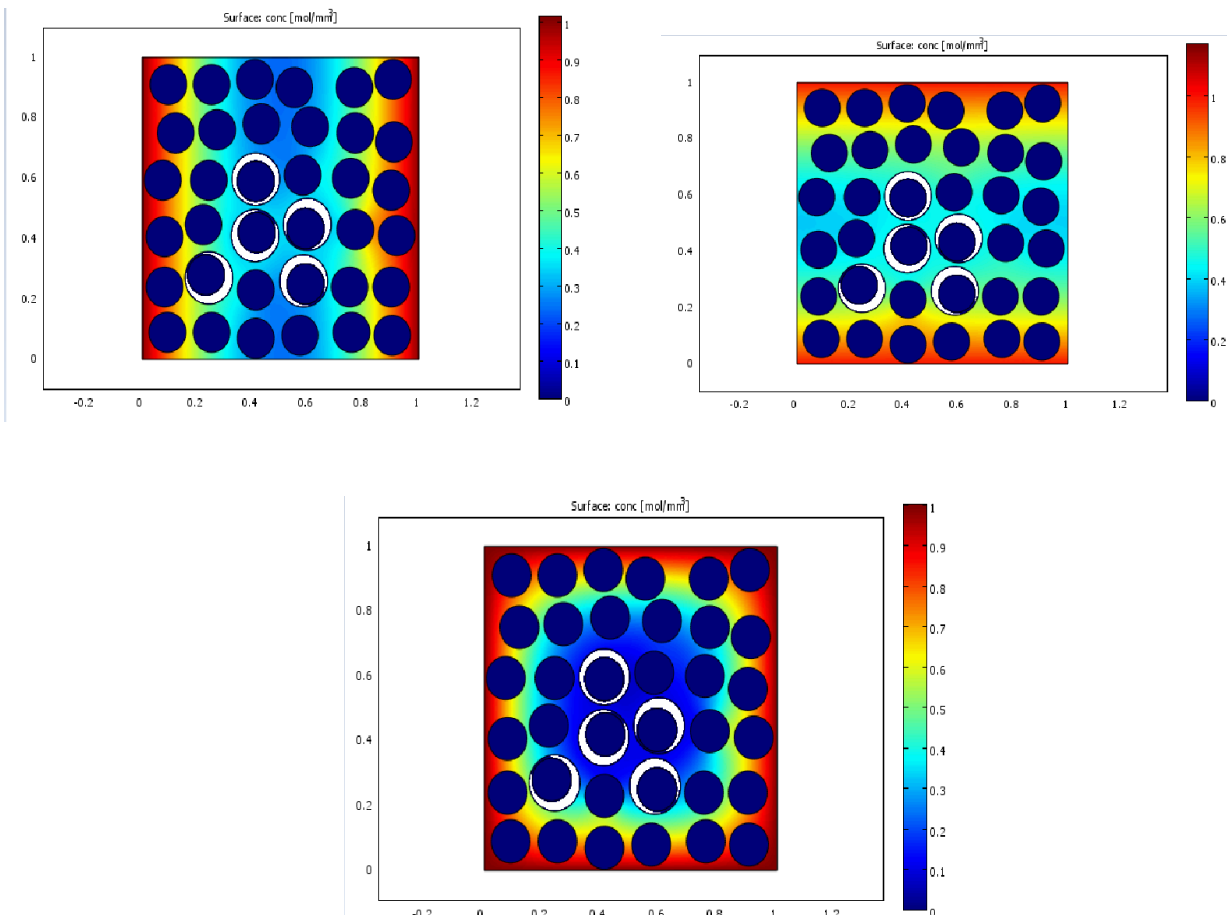


**Figure III.7** (a) VER relatif au composite endommagé, (b) fissure décohésion aléatoire

Nous considérons ici le cas de la diffusion dans un composite ayant une fissure décohésion aléatoire. Dans ce cas, la fissure commence à l'une des internes du VER et s'étend à l'intérieur de celui-ci comme indiqué sur la Figure III.7. Dans le cadre de la modélisation du processus de diffusion de l'humidité au sein d'un matériau qui a une fissure décohésion pour différente type de fraction volumique (1%, 3%, 5%). Sur les bords de ce VER est imposée une teneur d'eau en terme humidité  $M_m$  Figure III.8. Au départ, cette fissure est supposée remplie en air sec. Dans le composite la diffusion est supposée régit par la loi de Fick [Springer, 1981,1987, 1988]. Le VER est supposé être constitué de trois phases : la matrice, les fibres et la fissure, la fibre est supposée imperméable. Dans ce cas, le problème cellulaire de diffusion à résoudre dans le VER est défini par le système d'équation suivant :

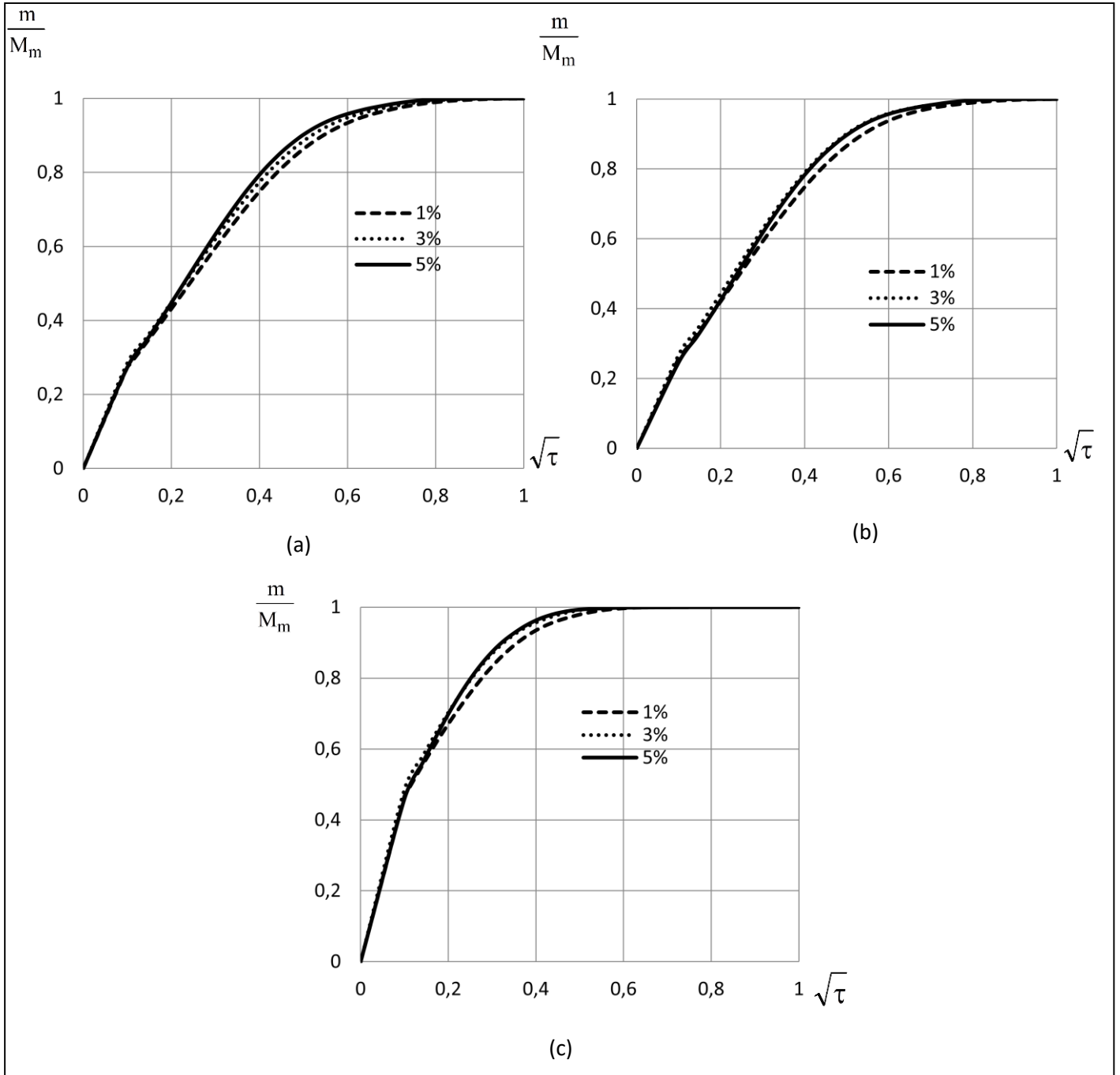
$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial m(x,y,t)}{\partial t} = D \Delta m(x,y,t) & \text{sur } \nu \times \mathbb{R}_*^+ \\ \frac{\partial m}{\partial \alpha(x,y)} = 0 & \text{à l'interface fibre / matrice} \\ m(x,y,t) = M_m(\text{HR}(\%)) & \text{aux bord de la résine } \in \eta \\ m_{\text{cavité}}(x,y,t) = \tilde{X} & \text{interface cavité / résine} \\ m(x,y,0) = m_0(x,y) & \forall x,y \in \nu \end{array} \right. \quad \text{III.4}$$

Pour résoudre le problème de diffusion, on adopte la même démarche que dans le cas du composite, les dimensions de l'équation III.1, et les paramètres utilisés pour résoudre le problème correspondant à ceux du tableau III.2, seront déterminés. Quant à la valeur du coefficient de diffusion de l'humidité de la fissure, nous acceptons la même hypothèse proposée dans le cas du composite endommagé. Le taux de renfort fibreux est de 50% et le taux de fissuration est de 5%. Pour la géométrie de fissure exprimée par le paramètre  $\eta$ , on considère trois formes de rupture volumique, selon que la fissure peut avoir une forme de décohérence correspondant aux valeurs basses de ou une forme convexe par rapport aux valeurs intermédiaires de  $\eta$  ou à la fin de Le cas correspondant à égal à 1.



**Figure III.8** Cartographie de la diffusion d'eau dans un échantillon présentant un endommagement sous la forme d'une fissure décohésion aléatoire de composite pour différente fraction volumique

La **Figure III.8** présente la solution au problème de diffusion dans le cas du composite endommagé, et présente l'évolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'une fissure décohésion aléatoire, les résultats de la simulation sont présentés sous la forme de cartes de diffusion.



**Figure III.9** Evolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme d'une fissure décohésion aléatoire différente fraction volumique. (a) selon X. (b) Selon Y, (c) Selon XY.

Les évolutions de la cinétique de diffusion sont illustrées sur la Figure III.9. Les évolutions pour le composites et ses constituants semblent avoir une évolution de type Dual Fick plus prononcé. Comme il est prévu la présence de la décohésion aléatoire a provoqué une augmentation significative de la teneur à saturation et un changement dans le comportement diffusif du composite. Ce ci dévoile un processus de diffusion très accéléré au départ suite à la présence d'un forte gradient en humidité entre la frontière du VER amorphe et son intérieur. Ce processus décélère au fur et à mesure que les fissure décohésion concentrée au centre de VER s'approchent de saturation. Cette décélération est affiché sur les courbes de la cinétique de diffusion du composite, par une déviation de la pente indiquant ainsi le début du deuxième stage de diffusion selon tous les directions X, Y, XY. Tandis que l'on constate une égalité de la vitesse de diffusion cinétique et sa congruence par rapport à 3% et 5%, et avec une légère augmentation de la cinétique de leur diffusion par rapport à leur homologue sur l'axe Y. On remarque également la même chose pour l'axe XY avec l'axe Y.

<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
<i>Fissure décohésion aléatoire</i>				
<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>				
<i>Chargement selon XY</i>				
<i>Fraction volumique</i>	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
$f_V = 1\%$	45.17	0.16	0.198	0.802
$f_V = 3\%$	48.53	0.196	0.186	0.814
$f_V = 5\%$	48.56	0.21	0.126	0.873

**Tableau III.3** Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion (Figure III.9-c)

Dans le tableau III.3, les résultats de la détermination des courbes (Figure.III.6-c), est présenté dans le cas d'un chargement dans la direction XY. Sous ces termes, comme mentionné précédemment, nous avons le comportement Dual-Fick de la géométrie de décohésion, puis définissons deux coefficients de diffusion effectifs, dans le premier est supérieur au second dans les trois fractions volumiques. Cela correspond à la courbe de diffusion cinétique évolutive qui indique que le processus de diffusion est initialement accéléré et ralenti à mesure qu'il approche de la saturation, ces résultats sont plus proche, Nous expliquons qu'en raison du changement de la géométrie de la fissure.

### III.5 Comparaison entre les résultats de composite uniforme et composite aléatoire

A ce stade, nous comparerons les résultats obtenus à partir de ces deux études entre les cas de fissuration, cas d'une fissure transversale pour un composite uniforme et aléatoire, le deuxième cas d'une fissure décohésion, avec des différentes fractions volumique.

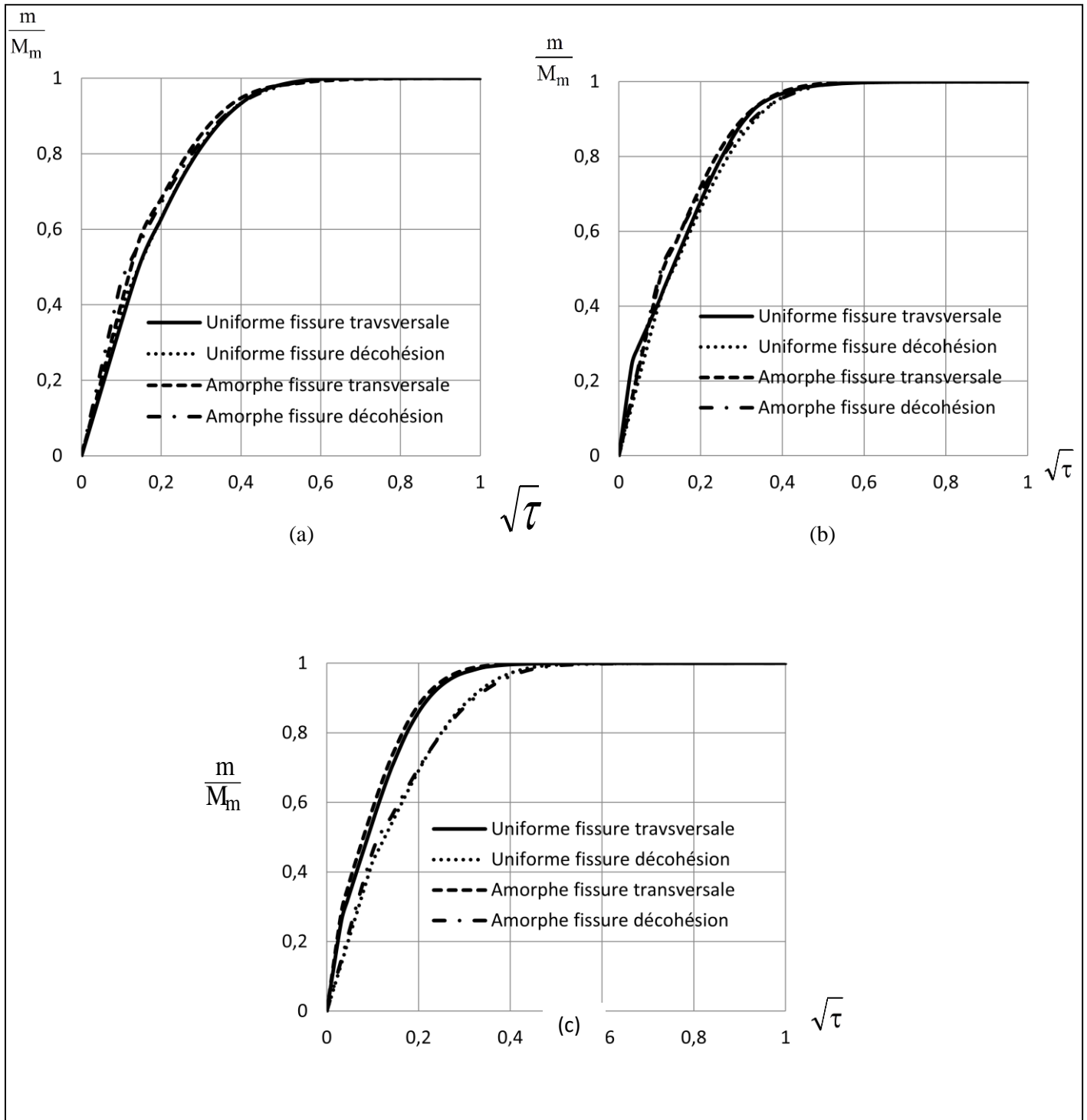


Figure III.10 Comparaison entre les coefficients de diffusion effectifs selon XY

Comme le montre la figure III.10, après avoir étudié les résultats suivants obtenus pour l'évolution des fraction volumique et la géométrie de la fissures dans ces deux cas par rapport le composite, On constate que pour les premier et deuxième cas, où la taille de la fissure représente 1% et 3%, les résultats obtenus pas un écart ou significative entre les courbes, pour une fraction volumique 5%, nous remarquons une divergence des résultats pour la fissure transversale avec une augmentation notable de la vitesse de diffusion et le coefficient de diffusion par rapport à la fissure décohésion dans les deux cas de composite uniforme et aléatoire, Nous concluons que la fissure transversale aide au processus de diffusion et accélère même, par rapport la forme décohésion, l'augmentation de la fraction volumique peuvent être augmenté la vitesse de diffusion .

Nous confirmons également les résultats obtenus dans les tableaux suivants :

<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
	<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>			
<i>Chargement selon XY pour une fraction volumique 3%</i>				
	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
<i>Uniforme fissure transversale</i>	70	0.21	0.092	0.908
<i>Uniforme fissure décohésion</i>	46.48	0.205	0.05	0.949
<i>aléatoire fissure transversale</i>	46.36	0.24	0.111	0.888
<i>aléatoire fissure décohésion</i>	48.53	0.196	0.186	0.814

**Tableau III.4** Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion pour une fraction volumique 3%

<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
	<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>			
<i>Chargement selon XY pour une fraction volumique 5%</i>				
	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
<i>Uniforme fissure transversale</i>	72	0.449	0.078	0.9212
<i>Uniforme fissure décohésion</i>	47.45	0.23	0.054	0.94
<i>Aléatoire fissure transversale</i>	74	0.49	0.113	0.886
<i>aléatoire fissure décohésion</i>	48.56	0.21	0.126	0.873

**Tableau III.5** Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion pour une fraction volumique 5%

<i>Coefficients de diffusion effective et teneurs à saturation</i>				
	<i>Composite endommagé (<math>v_f = 50\%</math>)</i>			
<i>Chargement selon XY pour une fraction volumique 1%</i>				
	$D_1^{eff}$	$D_2^{eff}$	$M_1$	$M_2$
<i>Uniforme fissure transversale</i>	20	0.17	0.047	0.95
<i>Uniforme fissure décohésion</i>	33.53	0.17	0.056	0.94
<i>aléatoire fissure transversale</i>	22.02	0.18	0.165	0.833
<i>aléatoire fissure décohésion</i>	45.17	0.16	0.198	0.802

**Tableau III.6** Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion pour une fraction volumique 1%

## *Conclusion générale*

Ce travail de mémoire, a porté sur la modélisation du comportement mécanique d'un composite à matrice polymérique en présence d'endommagement. L'objectif d'évaluer le comportement de diffusion effectifs d'un composite endommagé uniforme et aléatoire pour une fissure transverse et décohésion. Le problème est abordé une modélisation du comportement mécanique du milieu endommagé est proposée, en partant des notions de la mécanique de la rupture, nous avons établi une approche analytique simpliste pour évaluer l'effet de l'endommagement sur le coefficient de diffusion effectif du composite endommagé. En partant de l'hypothèse que l'endommagement est sous forme d'une fissure ayant une forme transverse et décohésion présente dans un composite.

La modélisation de la diffusion dans le composite est supposée régie par la loi de Fick tandis que dans la fissure supposée remplie en air, repose sur approche thermodynamique. Deux paramètres ont été choisis pour la modélisation de la fissure : sa configuration géométrique et sa fraction volumique. En ce qui concerne la position, deux cas représentatifs des fissures dans les matériaux ont été traités. Le premier représente le cas où la fissure transverse et le deuxième concernant les cas d'une fissure décohésion. Au départ nous avons commencé par le cas de la composite sien. Dans ce second cas, les effets induits par une variabilité de la fraction volumique de ces fissures ont été investigués. Avec la fissure transverse, les résultats obtenus montrent une diffusion significative lorsque la fissure présente une forme transversale. Il semble, en outre, que cette fissure soit très sensible à la fraction volumique. Par contre, pour la fissure décohésion, on constate toujours un écart similaire, compris pour un composite soit uniforme ou aléatoire par le VER. Dans le cas d'une fissure transverse, les résultats montrent un écart de comportement significatif par rapport au cas d'une fissure décohésion. En ce qui concerne la cinétique de diffusion, il apparut qu'elle influencé par la présence de l'endommagement. La géométrie de la fissure il fait accélérer ou décélérer le processus de diffusion. Les résultats de modélisation de la cinétique de diffusion d'humidité dans les composites montrent une sensibilité accrue à la présence d'endommagement dans le cas du composite à fissure transversale par rapport au cas du composite à fissure décohésion. En plus un forte du comportement diffusif est affiché surtout pour un composite uniforme par rapport un composite aléatoire.

## Référence Bibliographiques

- Benachour A. 2010. "Analyse des contraintes d'interface dans les poutres renforcées par des plaques composites collées sous précontrainte". Thèse de Doctorat université DjillaliLiabès de Sidi Bel Abbès, Algérie. 2010.
- Mechab I. 2009. "Etude des structures composites en utilisant les théories d'ordre élevé sous chargement thermomécanique". Thèse de Doctorat université DjillaliLiabès de Sidi Bel Abbès, Algérie. 2009.
- Draiche K. 2015. "Contribution a l'analyse de la vibration des plaques composites comportant des patches". Thèse de Doctorat université DjillaliLiabès de Sidi Bel Abbès, Algérie. 2015.
- Daniel B. Miracle and Steven L. Donaldson (2001) .Constituent Materials, Engineered Material Handbook ,Composites, ASM International, United States of America.
- CARMA –Actualisation octobre, 2006, "Glossaire des matériaux composites.
- Draiche K., TounsiA.,Khalfi Y., 2014. "A trigonometric four variable plate theory for free vibration of rectangular composite plates with patch mass". [éd.] Int. J., Steel Compos. Struct. 2014.
- Ladeveze, P., Le Dantec, E., Damage Modeling of the elementary ply for laminated composites. Composites Science and Technology, Vol. 43, pp. 257-267, 1992.
- Allix O., Ladevèze P., Interlaminar interface modelling for the prediction of laminates delamination, Composite Structures, Vol. 22, pp. 235-242, 1992.
- Gueribiz, D., Rahmani, M., Jacquemin, F., Fréour, S., Loucif, K., Modelling of the mechanical loading effects on the effective diffusive behavior of polymer matrix composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 30, pp. 337–346, 2011.
- Bourennane, H., Gueribiz, D., Jacquemin, F., Fréour, S., Modeling the effect of damage on diffusive behavior in a polymeric matrix composite material. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019
- Weistman, Y.J., Stress assisted diffusion in elastic and viscoelastic materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids., Vol. 35, pp. 73-93, 1987.
- Crank, J., The mathematics of diffusion. Journal of Composite Materials, Vol. 12, pp. 118-131, 1978.
- Weistman, Y.J., Stress assisted diffusion in elastic and viscoelastic materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids., Vol. 35, pp. 73-93, 1987.
- Roy, S., Bandorawalla, T., Modeling of Diffusion in a Micro-Cracked Composite Laminate Using Approximate Solutions. Journal of Composite Materials, Vol. 33, pp. 872-905, 1999.
- Berthelot, J.M., Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures. TEC&DOC,3éméédition,1999

- [Zweben C (2002).]- Zweben C (2002). Metal Matrix Composites, Ceramic Matrix Composites, Carbon Matrix Composites and Thermally Conductive Polymer Matrix Composites. Handbook of Plastics, Elastomers and Composites. New York
- [R. Warren Ed, (1992).]-R. Warren Ed, (1992). Ceramic-Matrix Composites, Chapman and Hall, New York
- [Daniel B. Miracle and Steven L. Donaldson (2001)] Daniel B. Miracle and Steven L. Donaldson (2001) .Constituent Materials, Engineered Material Handbook ,Composites, ASM International, United States of America
- [Miles I, Rostami S (1992).]Miles I, Rostami S (1992). Polymer matrix composites. Longmore Scientific and Technical. United States of America
- [BERTHELOT, Jean-Marie]. *Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures, 1999, vol. 4.*
- [1]-2015) ([http://avstop.com/ac/Aviation\\_Maintenance\\_Technician.AvStop](http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician.AvStop) Online Magazine
- [Crank,1975]J.Crank.The mathematics of diffusion.Oxford University Press,2<sup>nd</sup> edition,1975.
- [Apicella et al.,1983]A.Apicella,C.Migliaresi,L.Nicolais,L.Iaccarino,S.Roccatelli.The water ageing of unsaturated polyester-based composites: influence of resin chemical structure.Composites,Vol.14,N°4,387-392, 1983.
- [McKague et al., 1978] E. L. McKague Jr., J. D. Reynolds, J. E. Halkias. Swelling and glass transition relations for epoxy matrix material in humid environments. Journal of Applied Polymer Science, Vol.22,N°6, 1643-1654,1978.
- [Ennis et Karasz, 1986] T. S. Ennis, F. E. Karasz. Enthalpy recovery and physical aging of polymer-diluent binary systems: A network epoxy and water. Polymer Engineering and Science, Vol.26, N°4, 290-296, 1986.
- [Le Gac et al., 2014] P. Y. Le Gac, G. Roux, P. Davies, B. Fayolle, J. Verdu. Water clustering in polychloroprene. Polymer, Vol.55,N°12, 2861-2866, 2014.
- [Adamson,1980]M.J.Adamson.Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials. Journal of Materials Science, Vol.15, N°7, 1736-1745,1980.
- [Youssef et al.,2009]G.Youssef,S.Fréour,F.Jacquemin.Stress-dependent moisture diffusion in composite materials.Journal of Composite Materials, Vol.43 ,N°15,1621-1637,2009.
- [Barrer,1951]R.M.Barrer.Diffusion in and through solids.Cambridge University Press,1951.

- [Soles et al., 2000] C. L. Soles, F. T. Chang, B. A. Bolan, H. A. Hristov, D. W. Gidley, A. F. Yee. Contributions of the nanovoid structure to the moisture absorption properties of epoxy resins. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 36, N° 17, 3035-3048, 2000.
- [Starkova et al., 2013] O. Starkova, S. T. Buschhorn, E. Mannov, K. Schulte, A. Aniskevich. Water transport in epoxy/MWCNT composites. *European Polymer Journal*, Vol. 49, N° 8, 2138-2148, 2013.
- [Moyet Karasz, 1980] P. Moy, F. E. Karasz. Epoxy-water interactions. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 20, N° 4, 315-319, 1980.
- [Antoon et al., 1981] M. K. Antoon, J. L. Koenig, T. Serafini. Fourier-transform infrared study of reversible interaction of water and crosslinked epoxy matrix. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, Vol. 19, N° 10, 1567-1575, 1981.
- [Bondet Smith, 2006] D. A. Bond, P. A. Smith. Modeling the transport of flow-molecular-weight penetrants within polymer matrix composites. *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 59, N° 5, 249-268, 2006.
- [McKague et al., 1978] E. L. McKague Jr., J. D. Reynolds, J. E. Halkias. Swelling and glass transition relations for epoxy matrix material in humid environments. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 22, N° 6, 1643-1654, 1978.
- [Zhou et Lucas, 1999a] J. Zhou, J. P. Lucas. Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy, *Polymer*, Vol. 40, N° 20, 5505-5512, 1999.
- [Vanlandingham et al., 1999] M. R. Vanlandingham, R. F. Eduljee, J. W. Gillespie Jr. Moisture diffusion in epoxy systems. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 71, N° 5, 787-798, 1999.
- [J. Zhou, J.P. Lucas], Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy, *Polymer*, Vol. 40, 5505-5512, 1999a.
- [H.G. Carter, K.G. Kibler, Langmuir]-Type Model for Anomalous Moisture Diffusion in Composite Resins, *Journal of Composite Materials*, Vol. 12, 118-131, 1978.
- [H.G. Carter, K.G. Kibler, Langmuir]-Type Model for Anomalous Moisture Diffusion in Composite Resins, *Journal of Composite Materials*, Vol. 12, 118-131, 1978.
- [W.K. Loh, A.D]. Crocombe, M.M. Abdel Wahab, I.A. Ashcroft, Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 25, 1-12, 2005.
- [A. Fick], Ueber Diffusion. *Annalen der Physik*, Vol. 170, No. 1, 59-86, 1855. [I-129] J. Crank, *The mathematics of diffusion*, Clarendon Press, Oxford, 1975.

- [M. Autran, R. Pauliard, L. Gautier, B. Mortaigne, F. Mazeas, and P. Davies], Influence of mechanical stresses on the hydrolytic aging of standard and low styrene unsaturated polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 84, 2185–2195, 2002.
- [J. Jedidi, F. Jacquemin, A. Vautrin], Accelerated hygrothermal cyclical tests for carbon/epoxy laminates, *Composites: Part A*, Vol. 37, 636–645, 2006.
- [P. Kanouté], Etude du comportement hygromécanique de matériaux composites à matrice polymérique – application à l’analyse de la stabilité dimensionnelle de structures de détecteurs de particules, thèse de doctorat de l’université Paris VI, Paris, 30 Mars 1999.
- [J. El Yagoubi, Lubineau, G.F. Roger, J. Verdu], A fully coupled diffusion-reaction scheme for moisture sorption - desorption in an anhydride-cured epoxy resin. *Polymer*, Vol. 53, 5582-5595, 2013.
- [S. Popineau], Durabilité en milieu humide d’assemblages structuraux collés type aluminium/composite, thèse de l’école des Mines de Paris, 16 Mars 2005.
- [T. Peret], Etude du comportement des matériaux composites soumis à des chargements mécaniques en milieu humide, thèse de doctorat de l’université de Nantes, 04-11-2015.

## *Liste des figures*

### **Chapitre I : Etude bibliographique**

<b>Figure I.1</b> Structure d'un matériau composite.....	3
<b>Figure I.2</b> Fibres d'aramide.....	6
<b>Figure I.3</b> Fibres de Graphite (a), fibre de Carbone (b).....	7
<b>Figure I.4</b> Fibre de verre.....	8
<b>Figure I.5</b> Fibre naturelle de Cactus.....	10
<b>Figure I.6</b> Structure composite stratifié.....	11
<b>Figure I.7</b> Structure sandwich.....	11
<b>Figure I.8</b> – Schématisation du volume libre $V_L = V - V_m$ .....	12
<b>Figure I.9</b> Schématisation du gonflement hygroscopique induit par la rupture de liaisons hydrogène inter-segmentaires .....	14
<b>Figure I.10</b> Mécanismes de diffusion des molécules d'eau au sein d'un réseau polymère selon la cinétique de sorption de Langmuir, à 3 instants successifs [17].....	16

### **Chapitre II : Modélisation de l'effet de l'endommagement sur le comportement diffusif dans un matériau composite à fibre imperméable uniforme**

<b>Figure II.1</b> VER relatif à un composite saine.....	18
<b>Figure II.2</b> Distribution de la teneur en humidité dans le cas de la matrice saine (a): chargement en humidité selon X, (b): selon Y, (c) selon XY).....	20
<b>Figure II.3</b> Evolution de cinétique de la diffusion dans le VER selon X, selon Y et XY.....	20
<b>Figure II.4</b> (a): VER relatif au composite endommagé; (b): Fissuration transverse (source, Gamsted et Sjögren, 1999).....	21

<b>Figure II.5</b> Cartographie de la diffusion d'eau dans un composite endommagé par une fissure transversal.....	23
<b>Figure II.6</b> La cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme d'une fissure transversale pour différente de fraction volumique. (a) selon X. (b) Selon Y, (c) Selon XY.....	24
<b>Figure II.7</b> Principe du modèle Dual Fick : (2D).....	25
<b>Figure II.8</b> Modèle équivalent du composite endommagé pour le cas 2D.....	26
<b>Figure II.10</b> VER relatif au composite endommagé (a) : diffusion unidirectionnelle selon l'axe XY.....	27
<b>Figure II.11</b> Diffusion d'eau dans un échantillon présentant un endommagement sous la forme d'une fissure décohésion .....	28
<b>Figure II.12</b> Evolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme de décohésion uniforme fibre/matrice (a) selon X ; (b) Selon Y; (c) Selon XY.....	29
 <b>Chapitre III Modélisation de l'effet de l'endommagement sur le comportement diffusif dans un matériau composite à fibre imperméable aléatoire</b>	
<b>Figure III.1</b> VER relatif à un composite saine.....	32
<b>Figure III.2</b> Distribution de la teneur en humidité dans le cas de composite sain chargement en humidité selon X, selon Y, selonXY).....	34
<b>Figure III.3</b> Evolution de cinétique de la diffusion dans le VER selon X, selon Y et XY.....	34
<b>Figure III.4</b> VER relatif au composite endommagé selon l'axe XY.....	35
<b>Figure III.5</b> Cartographie de la diffusion d'eau dans un échantillon présentant un endommagement sous la forme d'une fissure transverse pour différente fraction volumique.....	37
<b>Figure III.6</b> Evolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme d'une fissure transverse amorphe différente fraction. (a) selon X. (b) Selon Y, (c) Selon XY.....	38
<b>Figure III.7</b> (a) VER relatif au composite endommagé, (b) fissure décohésion aléatoire .....	40

<b>Figure III.8</b> Cartographie de la diffusion d'eau dans un échantillon présentant un endommagement sous la forme d'une fissure décohésion aléatoire de composite pour différente fraction volumique.....	41
<b>Figure III.9</b> Evolution de la cinétique de diffusion dans le cas d'endommagement sous forme d'une fissure décohésion aléatoire différente fraction volumique. (a) selon X. (b) Selon Y, (c) Selon XY.....	42
<b>Figure III.10</b> Comparaison entre les coefficients de diffusion effectifs selon XY...	44

## *Liste des tableaux*

### **Chapitre I : Etude bibliographique**

<b>Tableau I.1</b> Caractéristiques mécaniques de mono filaments aramides.....	6
<b>Tableau I.2</b> Caractéristiques mécaniques de carbone.....	7
<b>Tableau I.3</b> Caractéristiques mécaniques de verre.....	8
<b>Tableau I.4</b> Caractéristiques mécaniques des fibres de bore, bore-carbure de bore et silice.....	9

### **Chapitre II : Modélisation de l'effet de l'endommagement sur le comportement diffusif dans un matériau composite à fibre imperméable uniforme**

<b>Tableau II.1</b> Données des paramètres utilisés dans la résolution du problème de diffusion [Alfred al., 1979; Gueribiz et al., 2009 , 2011; Bourenane et al., 2019 ].....	19
<b>Tableau II.2</b> Résultats d'identification des coefficients de diffusion effectifs selon XY.....	26
<b>Tableau II.3</b> Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion (Figure II.12-c).....	30

### **Chapitre III Modélisation de l'effet de l'endommagement sur le comportement diffusif dans un matériau composite à fibre imperméable aléatoire**

<b>Tableau. III.1</b> Données des paramètres utilisés dans la résolution du problème de diffusion [Alfred al., 1979; Shirrell et al., 1978; Gueribiz et al., 2009 , 2011; Bourenane et al., 2019 ].....	33
<b>Tableau III.2</b> Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion (Figure III.6-c).....	39
<b>Tableau III.3</b> Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion (Figure III.9-c).....	43

<b>Tableau III.4</b> Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion pour une fraction volumique 3%.....	45
<b>Tableau III.5</b> Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion pour une fraction volumique 5%.....	46
<b>Tableau III.6</b> Résultats d'identification pour les paramètres de diffusion pour une fraction volumique 1%.....	46