



**HAL**  
open science

**Modélisation par éléments finis du comportement  
mécanique d'un composite Interlock 2.5D = Finite  
element analysis of the elastic constitutive behaviour of  
a 2.5D Interlock composite**

Samer Nehme, Benjamin Hagege, Malik Benzeggagh, Zoheir Aboura

► **To cite this version:**

Samer Nehme, Benjamin Hagege, Malik Benzeggagh, Zoheir Aboura. Modélisation par éléments finis du comportement mécanique d'un composite Interlock 2.5D = Finite element analysis of the elastic constitutive behaviour of a 2.5D Interlock composite. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. 9 p. hal-00387288

**HAL Id: hal-00387288**

**<https://hal.science/hal-00387288>**

Submitted on 11 Jun 2009

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

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

# Modélisation par éléments finis du comportement mécanique d'un composite Interlock 2.5D

## *Finite element analysis of the elastic constitutive behaviour of a 2.5D Interlock composite*

NEHME Samer, HAGEGE Benjamin, BENZEGGAGH Malk, ABOURA Zoheir

Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire ROBERVAL, UMR 6253

### Résumé

Cette étude propose un modèle numérique pour la prédiction des propriétés mécaniques des matériaux composites à renfort Interlock fourni par la société SNECMA. Une nouvelle méthodologie de construction du maillage du volume élémentaire représentatif 'VER' est proposée. La technique consiste à mailler en tétraèdres la matrice (de comportement isotrope) et en hexaèdres les mèches (de comportement isotrope transverse). Les éléments de contact disponible sur le logiciel industriel 'Ansys' permettent d'appréhender le phénomène d'endommagement. Les résultats obtenus sont compatibles avec les résultats expérimentaux.

### Abstract

This work is consisted to study a 2.5D braided composites provided by SNECMA Company. We thus propose a new meshing methodology to build an elementary volume made of tetrahedral for the isotropic matrix and of mapped hexahedra for the transversely isotropic yarns. The industrial software "Ansys" is used to solve this problem. Contact elements are generated to allow creating damages in our proceeding works inside the composite. The final results are compatible with the experimental results.

**Mots Clés:** composite, interlock, éléments finis, homogénéisation

**Keywords:** composite, interlock, finite elements, homogenization

## 1. Introduction

Le progrès technique dans le domaine des matériaux composites, met à la disposition du secteur industriel des structures complexes ayant une bonne résistance dans les trois directions, par exemple, dans le domaine aéronautique et aérospatial. Dans le cas des composites unidirectionnels, l'objet présente une résistance privilégiée dans le sens longitudinal des fibres, alors que les composites bidirectionnels stratifiés souffrent d'une faiblesse dans la troisième direction. Les interlocks (ou encore composites à renfort 2,5 D) sont des structures particulières de composites tissées. Leurs propriétés mécaniques sont fortement liées à la structure. Leurs architectures offrent une amélioration importante des propriétés mécaniques comparable aux autres types de composites. En effet, le croisement des mèches de chaîne avec les mèches de trame dans les trois directions confère au composite résultant, un potentiel structural élevé. Pour évaluer le comportement mécanique, il est possible d'obtenir numériquement les constantes élastiques de l'ingénieur à partir d'un modèle éléments finis. Cette technique d'essai virtuel consiste à analyser en contrainte-déplacement le composite à une échelle mésoscopique afin d'obtenir une réponse à l'échelle macroscopique.

Les travaux de simulation numérique réalisés sur les interlocks restent à ce jour limités à la modélisation géométrique d'une part et d'autre part, au maillage automatique par éléments tétraédriques. Il est de fait difficile de prendre compte le comportement anisotrope des mèches constituées de fibres.

Dans les premiers modèles, seule l'ondulation dans le sens chaîne était prise en compte [1]. Ces modèles ont évolué pour prendre en compte également l'ondulation dans le sens trame [2] et le décalage relatif des couches. En 1994, Sankar et al. [3] ont proposé un modèle analytique appelé Selective Averaging Method (SAM) basé sur une combinaison de moyenne en rigidité et compliance pour estimer les propriétés thermo élastiques 3D. Huang en 1999 [4] a développé un modèle micromécanique pour prédire les propriétés

élastiques du composites tissés. La section de la mèche était supposée de forme elliptique et l'ondulation de la mèche a été décrite par une fonction sinusoïdale.

Scida, et al. [5] ont développé un modèle analytique appelé MESOTEX (la simulation mécanique des textiles) basé sur la théorie classique de stratification (CLT) pour prévoir dans les trois directions du composite tissé les propriétés élastiques en plus de l'évolution de l'endommagement.

Ping et al. [6] proposent une modélisation du comportement élastique d'un orthogonal 3D en utilisant des modèles analytiques similaires, basés sur les conditions d'isocontrainte et d'isodéformation sur des micro-éléments du volume élémentaire représentatif (VER) réparti en série ou en parallèle.

Barbero [7] a développé des modèles d'éléments finis précis associés à des conditions de périodicité concernant les tissus d'armure toile pour déterminer leurs propriétés mécaniques en utilisant l'iso-contrainte, l'iso-déformation, et la théorie classique de stratification.

Concernant la présente étude, une nouvelle méthodologie de construction du maillage du volume élémentaire représentatif 'VER' est proposée. Afin de réaliser la discrétisation, un modèle géométrique est développé à partir des mesures prises par photomicrographie pour un matériau fourni par la société SNECMA, l'objectif étant de modéliser le comportement mécanique (élastiques et endommagement) d'un matériau composite de type interlock (couche à couche) à architecture 2.5D composé de fibres de carbone T300j et de la résine en époxy RTM6.

## 2. Architectures des tisseurs et modélisations géométriques :

En surface le tissage ressemble au tissu taffetas. Les échantillons pour ce tisseur sont repérés par le numéro 69 joints d'après le fournisseur. La figure1 montre l'architecture de l'interlock sur la surface. Deux couches successives sens chaîne sont décalées d'une rangée de trame selon un plan vertical.

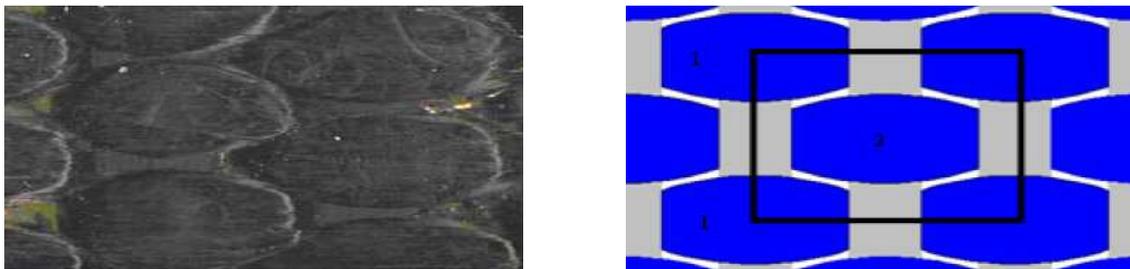


Figure 1 : Vue de dessus du tisseur

L'observation microscopique au MEB des sections des mèches, montre qu'elles sont elliptiques [8]. Ces sections sont modélisées géométriquement par un rectangle et deux demi-ellipses respectant les dimensions des mèches [9] avec pour objectif la définition d'une géométrie simple représentative de la rigidité et capable de supporter un maillage hexaédrique.

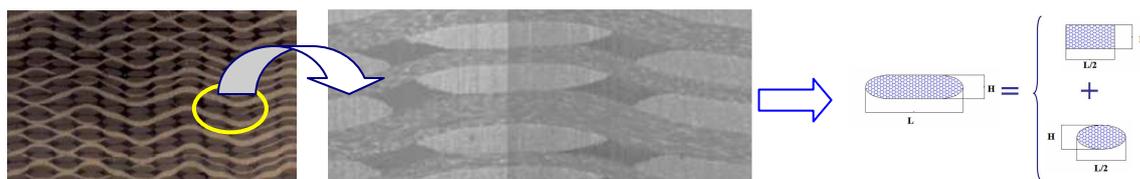


Figure 2 : observations microscopiques et modélisation de la section des mèches

L'observation microscopique a également permis, de définir l'architecture du tisseur et les dimensions géométriques liées à la structure. Ces dimensions sont définies dans le tableau suivant.

Mèche sens chaîne		Mèche sens trame		Distance entre les mèches	
Largeur	Epaisseur	Largeur	Epaisseur	Mèches trame	Mèche chaîne
$a_w$ (mm)	$h_w$ (mm)	$a_f$ (mm)	$h_f$ (mm)	$C_L$ (mm)	$C_T$ (mm)
4.4706	06471	3.163	0.5882	2.8235	0

Tableau 1 : Les paramètres géométriques du tisseur

Le VER du tisseur est constitué de deux couches sens Chaîne (les plans verticaux) et de quatre couches sens Trame. Dans ce VER, chaque couche dans le plan vertical est constituée de trois mèches sens chaîne et chaque couche dans le plan horizontal constitué de deux mèches sens trame.

Le VER doit être fiable au niveau de la représentation du comportement mécanique total du tisseur. L'objectif est de définir un volume géométrique simple qui permet de représenter le tisseur et supporter un maillage hexaédrique.

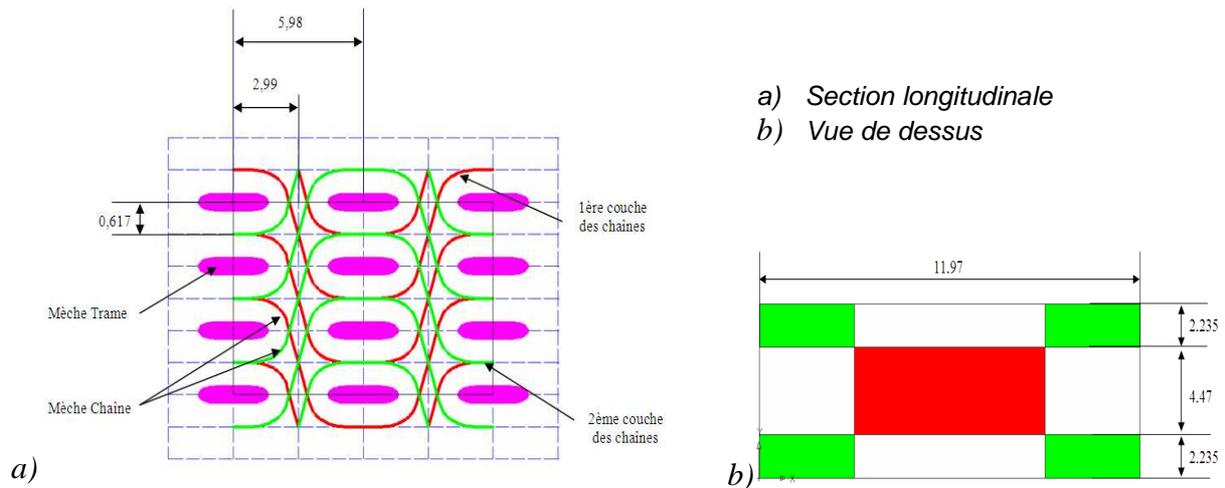


Figure 3: Dimensions et architecture du VER (unité en mm)

La figure 3 illustre les dimensions du VER ainsi que l'empilement des couches dans les deux sens, les dimensions étant données en millimètre. Les mèches sens chaîne sont formées de deux zones : une zone où la mèche est courbée et reste toujours tangente à la surface de la mèche sens trame, et une zone où les mèches sont linéaires. La dernière zone est limitée par deux points à partir desquels la mèche sens chaîne quitte la mèche sens trame vers la mèche suivante.

L'équation de la fibre moyenne de la mèche chaîne est gérée par la fonction sinusoïdale suivante:

$$z(x) = \frac{h_w + h_f}{2} \cdot \cos\left(\frac{2}{a_f + 2c_L} \pi \cdot x\right) \quad (\text{éq. 1})$$

La création de l'1/4 de la section conduit à un maillage quadratique de bonne qualité. Le fait de construire une surface en utilisant un maillage quadratique permet d'obtenir un maillage hexaédrique (en volume). Pour aboutir à la géométrie d'une mèche, il suffit d'extruder la section selon la courbe sinusoïdale (éq. 1) qui définit l'allure de la mèche (figure 4).

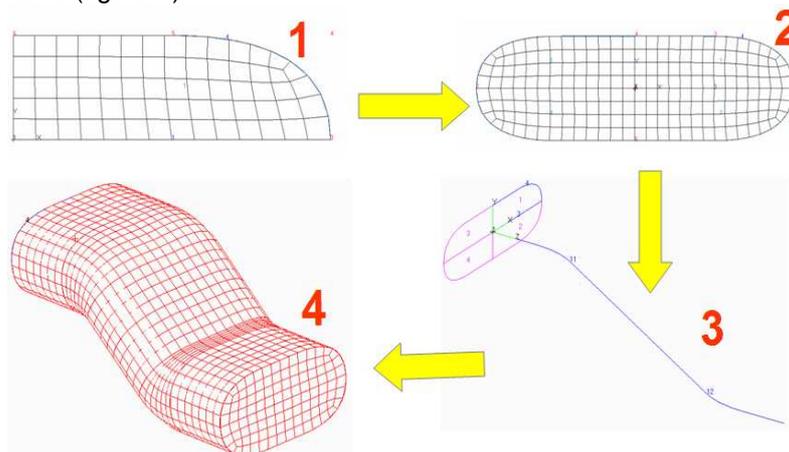


Figure 4 : création d'une mèche chaîne

Dans le but de trouver la taille convenable des éléments hexaédriques, les VER sont sollicités par plusieurs essais du maillage. La recherche d'éléments trop fins est certainement favorable pour obtenir des résultats précis. Tout en compliquant la convergence des calculs. Ces aspects nécessitent une machine assez puissante et un temps de calcul long. En se basant sur ce qui a précédé un maillage satisfaisant du tisseur a été créé d'une part et d'autre part la coïncidence entre les nœuds des éléments triangulaires (surfaces extérieurs de la résine) et les éléments hexaédriques (mèches) a été assurée.

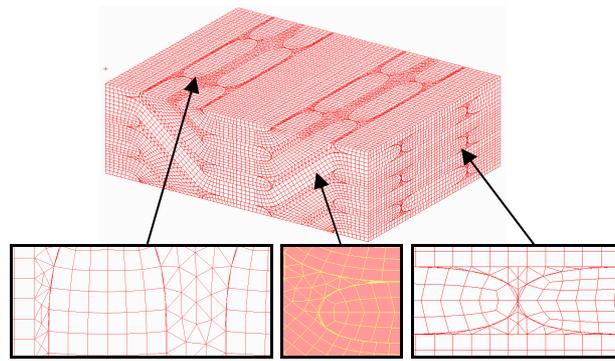


Figure 5 : maillage du VER (coïncidence des nœuds)

La structure du tisseur présente une géométrie particulière. En effet, le VER possède deux plans de symétrie verticaux (selon les plans XZ et YZ). Ces plans de symétrie facilitent la démarche de la conception assistée par ordinateur (CAO). C'est la raison pour laquelle un quart de VER a été considéré (figure 6). Enfin, les résistances mécaniques du tisseur ont été déterminées dans les trois directions en respectant certaines conditions limites.

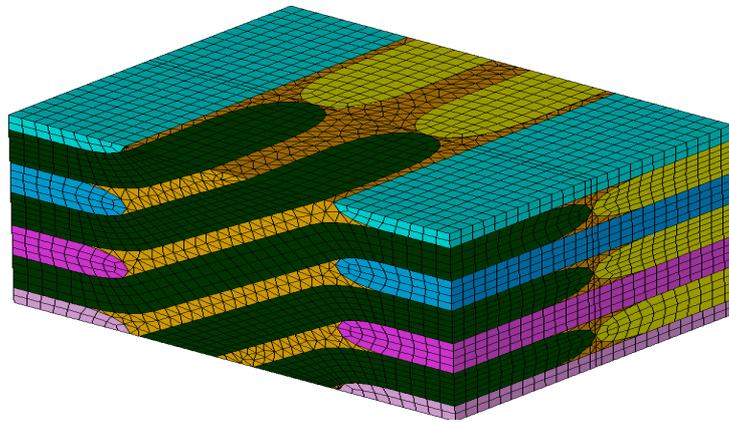


Figure 6: Assemblage des mèches et de la résine

### 3. Propriétés mécaniques

La matrice assure la liaison entre les mèches. Dans le cas de nos interlocks, la matrice est en époxy. Les résines époxydes sont les plus utilisées dans l'industrie de la haute performance comme l'aéronautique. Elle présente un bon accrochage sur les fibres et un faible retrait au moulage ( $\approx 0,5\%$ ). Les caractéristiques mécaniques de ce polymère thermodurcissable sont résumées dans le tableau 2:

Module de Young $E_m$ (Mpa)	Coefficient de Poisson $\nu_m$	Module de cisaillement $G_m$ (Mpa)
3500	0.4	1250

Tableau 2 : Propriétés mécaniques de l'époxy

Une mèche résulte de l'association des fibres longues et de la résine dont leurs caractéristiques se combinent avec synergie. Une mèche peut contenir environ 10 000 fibres.

Les mèches sont modélisées comme un composite unidirectionnel, et par conséquent, la loi de mélange est applicable.

Les caractéristiques mécaniques de la fibre de carbone de haute résistance [10] utilisée sont données dans le tableau 3.

Module Longitudinal $E_{f_l}$ (Mpa)	Module Transversal $E_{f_t}$ (Mpa)	Module de cisaillement $G_{f_{lt}}$ (Mpa)	Coefficient de Poisson $\nu_{f_{lt}}$	Coefficient de Poisson $\nu_{f_{tz}}$
230000	15000	50000	0.28	0.03

Tableau 3 : Propriétés mécaniques d'une fibre de carbone

Le tableau 4 donne l'ensemble des paramètres mécaniques des mèches.

Fraction volumique des fibres de Carbone / VER (%)	60
Fraction volumique des fibres de Carbone / Mèche Vf (%)	78,25
(1-Vf) (%)	21,75
$E_L$ (Mpa)	180396.5
$E_T$ (Mpa)	8516.4
$E_z$ (Mpa)	8516.4
$G_{LT}$ (Mpa)	5272,8
$G_{Lz}$ (Mpa)	5272,8
$G_{TZ}$ (Mpa)	4246,7
$\nu_{LT}$	0,306
$\nu_{Lz}$	0,306
$\nu_{TZ}$	0,03

Tableau 4 : Paramètres mécaniques des mèches

Ces propriétés sont applicables selon les directions principales des mèches comme le montre la figure 7.

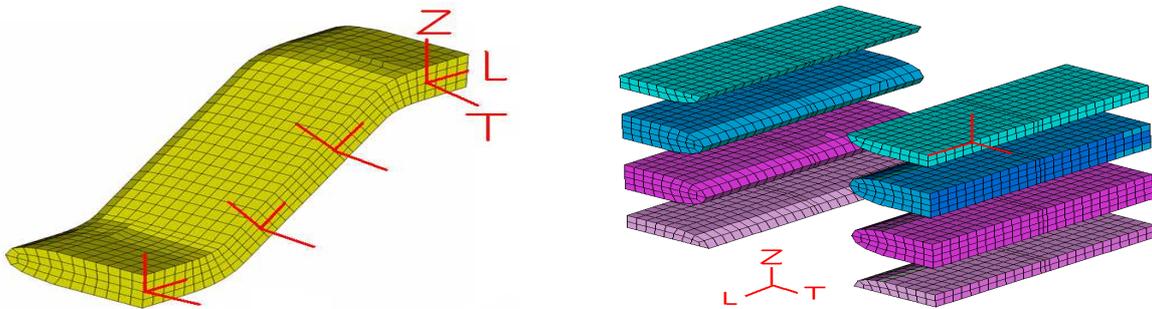


Figure 7: Orientation du repère des propriétés mécaniques selon la direction des mèches

## 4. Modélisation numérique

### 4.1. Les interface

Pour modéliser les interfaces mèche/résine et mèche/mèche, des éléments de contact sont utilisés « en peau ». Le contact est défini comme un contact collé. Ceci nous permet de créer des endommagements « constants » à l'intérieur du composite par suppression des éléments de contact, la taille du défaut étant une contrainte par la taille de maille.

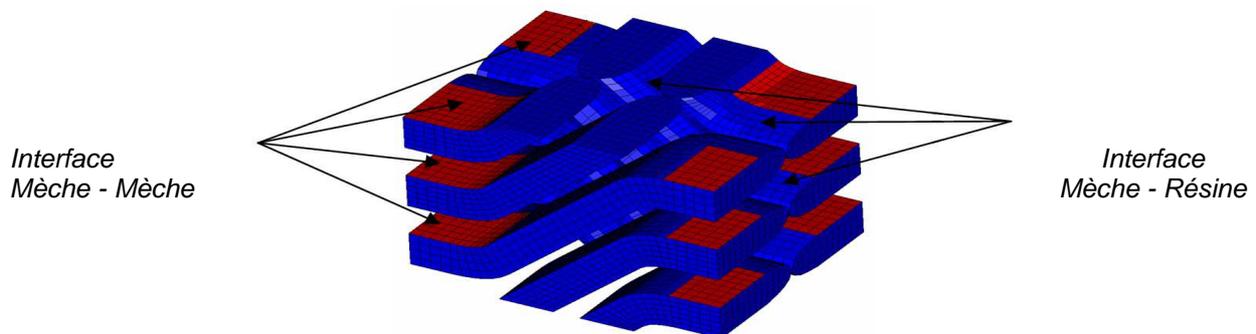


Figure 8: Détermination des zones du contact entre les mèches

### 4.2. Condition limite et condition de la périodicité:

Dans un problème statique, les conditions aux limites doivent être employées pour empêcher le modèle de se déplacer dans n'importe quelle direction, autrement dit, le mouvement non restreint de corps rigide produit des singularités dans la matrice de rigidité. Bien entendu, à chaque étape, les conditions aux limites

nécessaires ont été appliquées pour maintenir la structure à l'état d'équilibre. Des conditions de périodicité sur le VER ont été imposées en utilisant les équations de la contrainte sur 'Ansys'.

#### 4.3. Résultat :

	% Carbone / VER	Ex (Gpa)	Ey (Gpa)	Ez (Gpa)	Gxy (Gpa)	Gxz (Gpa)	Gyz (Gpa)	Vyx	Vxz	Vyz
<b>Expérimentale</b>	60	**	<b>45,07</b>	**	**	**	**	<b>0.163</b>	**	**
<b>ABAQUS</b>	60	20,21	<b>47.09</b>	7.86	**	**	**	**	**	**
<b>ANSYS</b>	60	18.26	<b>45.27</b>	9.72	6.41	8.65	4.86	0.144	0.239	0.166

Tableau 5 : Résultats de la simulation

Le tableau 5 présente les résultats de la simulation numérique. Les rigidités déterminées dans les trois directions sont comparées avec les résultats expérimentaux. Dans la traction suivant l'axe y (direction de la mèche sens trame) une erreur de 0.44% a été constatée.

#### 4.4. Effet de la résine :

	Ex (Gpa)	Ey (Gpa)	Ez (Gpa)
<b>Avec résine</b>	18.26	<b>45.27</b>	9.726
<b>Sans résine</b>	5.546	<b>42.498</b>	2.7
<b>% de diminution</b>	69.6%	6.1%	72.2%

Tableau 6 : rôle de la résine

Si on enlève la résine, on remarque une chute importante du module d'élasticité dans l'axe X et l'axe Z de 69% et 72% respectivement. Selon la direction X seulement une seule chaîne réagit à la traction tandis que les autres ne réagissent pas. Selon l'axe Z, la partie linéaire des mèches chaînes réagit à la traction tandis que la partie ondulée ne peut pas réagir. Selon la direction Y toutes les trames résistent à la traction pour une faible chute de 6% a été observée, donc on peut conclure que l'influence de la résine sur les propriétés mécaniques du matériau est limitée et que son rôle est d'assurer le lien entre les fibres et répartir les efforts.

## 5. Endommagement

Pendant la mise en service des matériaux composites, les comportements mécaniques doivent répondre aux exigences fonctionnelles pour assurer une durée de vie prédéterminée d'une part et d'autre part la sécurité de l'utilisateur d'autre part. La présence des défauts internes liés à la mise en forme ou à l'utilisation provoque la dégradation rapide du matériau.

L'objectif est de modéliser les mécanismes d'endommagement des interfaces Mèches/Résine et Mèche/Mèche dans le tisseur. La modélisation par éléments finis de l'endommagement est à l'échelle mésoscopique. Des fissures numériques ont été créées selon les mécanismes d'apparition et de propagation définis par EL HAGE [8]. Une méthode d'analyse de délaminage dans la structure des composites à renfort interlock a été utilisée permettant ainsi de décrire l'influence de la taille de la fissure initiale sur la rigidité globale. En effet, des fissures numériques concentrées dans des endroits bien définis ont été créées. Les résultats de la simulation numérique ont été comparés avec les résultats obtenus sans endommagement.

### 5.1. Mécanisme d'endommagement expérimental

L'observation microscopique dans le bloc de la matière des composite à renfort interlock montre que le déclenchement des fissurations a lieu aux interfaces de bloc résine avec les mèches sens chaîne par décohésion entre mèches et résine.

Les étapes de l'apparition, propagation et rupture sont illustrées par la figure 9.

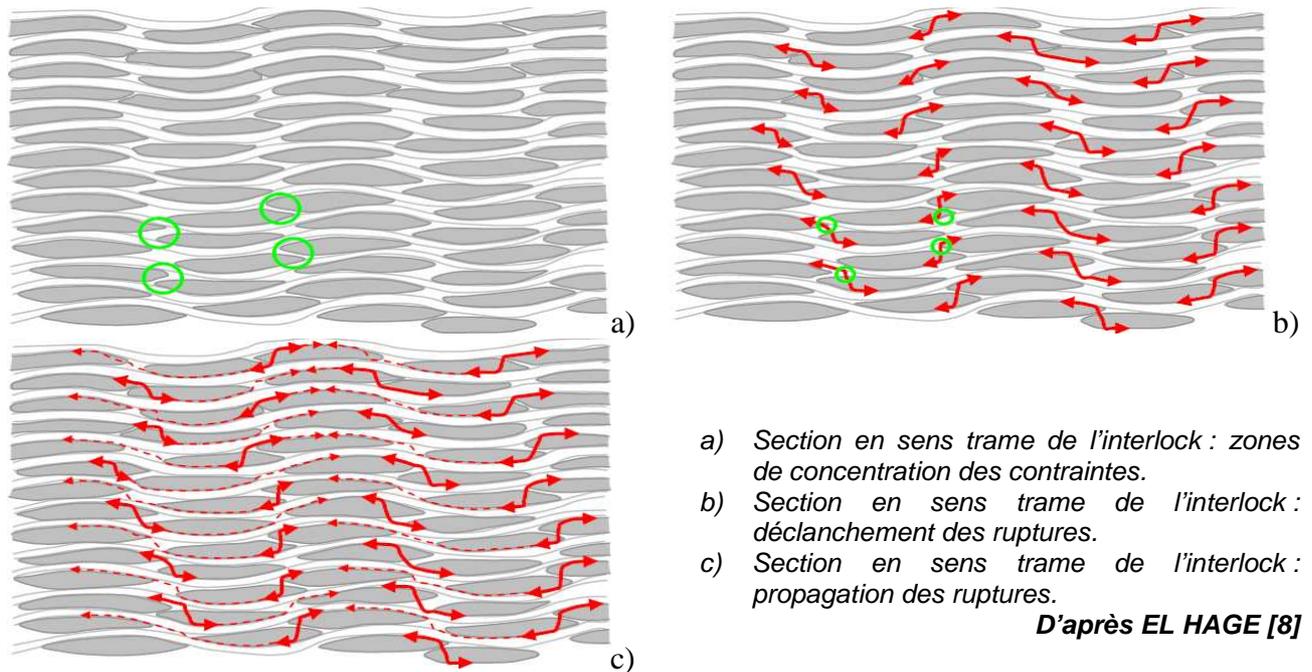


Figure 9: Mécanisme de la rupture dans les composites à renfort interlock

## 5.2. Fissure numérique : méthode d'introduction dans le modèle numérique.

Dans le modèle numérique, les contacts Mèches/Résine et Mèche/Mèche sont définis dans la carte des interactions comme des contacts collés. Ansys gère et modélise le contact entre deux surfaces réunies au sein d'une paire de contact collé. La force de maintien est fortement liée à la taille de la surface de contact. Ainsi, si on réduit le nombre d'éléments intervenant dans ce contact, la rigidité de l'interface décroît.

Dans cet esprit, quelques éléments de contact Chaînei/Tramej ont été effacés et l'effet sur la rigidité du tisseur a été analysé. Bien entendu, la taille minimale d'une fissure est égale à la taille d'un élément. Le maillage réalisé sur ce tisseur permet d'introduire un endommagement de l'ordre de 200 $\mu$ m. C'est un autre point qui montre la qualité du maillage et la validité de la méthodologie utilisée.

Dix expériences avec une taille de fissure croissante ont été réalisées. Le tableau 7 résume ces expériences. Les fissures sont localisées dans les endroits expliqués par les données expérimentales.

	Nombre des lignes éliminées par interface	Nombre total des éléments éliminé dans le VER
Expérience 1	1	92
Expérience 2	2	184
Expérience 3	3	276
Expérience 4	4	368
Expérience 5	5	460
Expérience 6	6	552
Expérience 7	7	644
Expérience 8	8	736
Expérience 9	9	828
Expérience 10	10	920

Tableau 7: Procédures expérimentales de la création d'endommagement

Il est important de signaler que dans l'expérience 10, tous les éléments intervenant dans le contact aux endroits de localisation des fissures ont été éliminés.

La figure 10 montre les endroits où les endommagements ont été introduits.

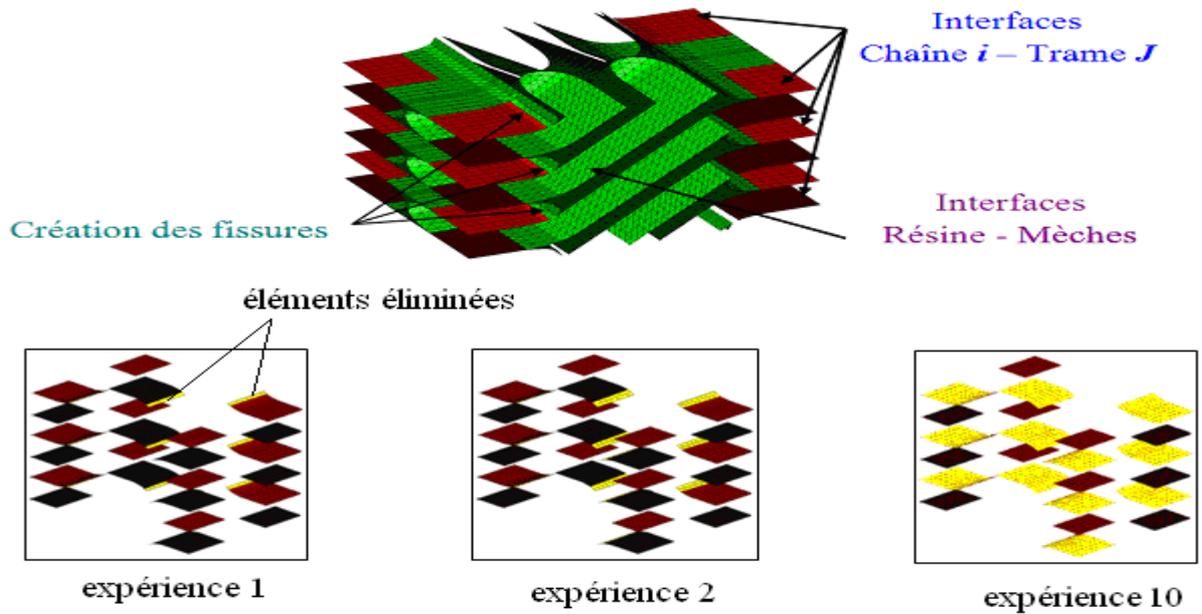


Figure 10: Les endroits de localisation des endommagements

### 5.3. Résultats d'analyse

Dans les graphes ci-dessous, les résultats de l'analyse suivant les trois directions.

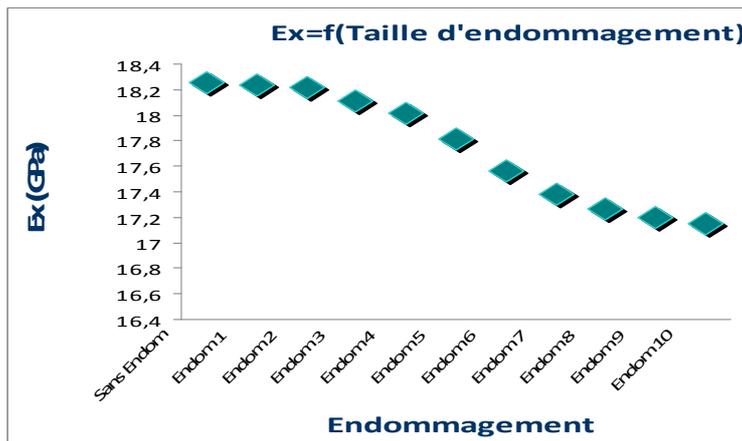


Figure 11 : Endommagement suivant l'axe X

Pour un endommagement de taille égale 0.2 mm, on observe dans la direction X (direction du mèche chaîne) une diminution de la rigidité de 0,15%, et si la taille du défaut interne augmente de l'ordre de 2mm, le module d'élasticité dans la direction X décroît de 6.1%.

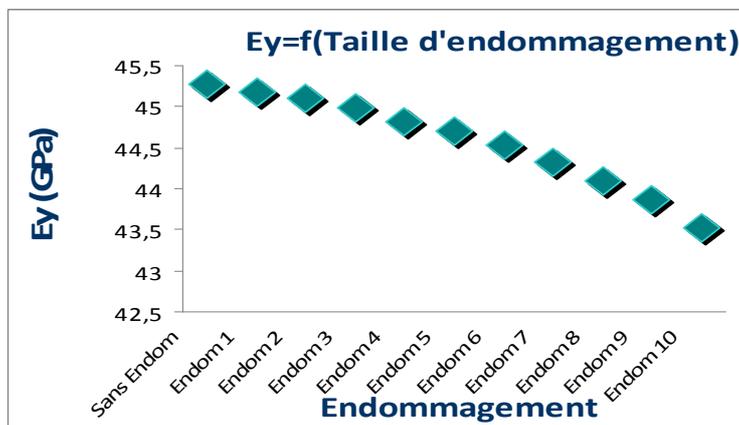


Figure 12 : Endommagement suivant l'axe Y

Pour un endommagement de taille égale 0.2 mm, on observe dans la direction Y (direction du mèche trame) une diminution de la rigidité de 0,19%, et si la taille du défaut interne augmente de l'ordre de 2mm, le module d'élasticité dans la direction Y décroît de 3.87%.

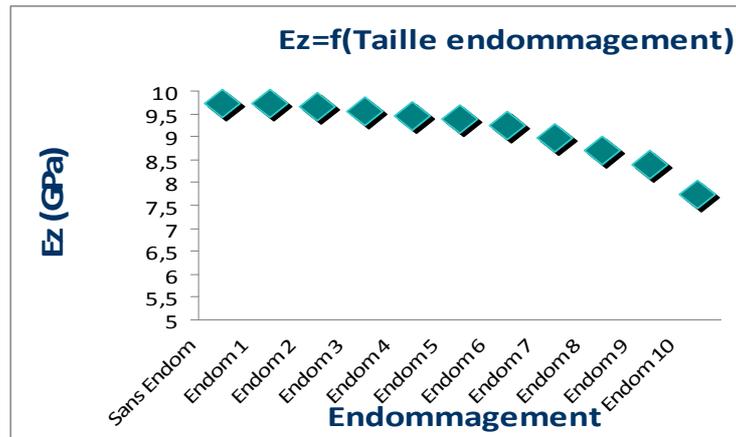


Figure 13 : Endommagement suivant l'axe Z

Pour un endommagement de taille égale 0.2 mm, on observe dans la direction Z (direction dans l'épaisseur) une diminution de la rigidité de 0,12%, et si la taille du défaut interne augmente de l'ordre de 2mm, on remarque une chute très importante dans le module d'élasticité de 20.3%.

Comme interprétation, l'introduction des fissures dans le modèle numérique engendre une chute des propriétés mécaniques

## 6. CONCLUSION

Cette étude a abordé la modélisation du comportement mécanique d'un matériau composite à renfort carbone interlock. La détermination des propriétés élastiques s'est faite en utilisant un modèle numérique. La modélisation de l'endommagement du matériau composite interlock est mise en place grâce à des éléments de contact. Cette étude révèle l'importance du choix du VER et le maillage sur certaines propriétés mécaniques. Le modèle numérique proposé a été validé suite à une comparaison avec les essais expérimentaux. De plus les rigidités, dépendantes des endommagements possibles, sont déterminées dans les trois directions et sont comparées avec les résultats expérimentaux.

## Références

- [1] Ishikawa et al. 82[11] Ishikawa T, Chou TW. Stiffness and strength behavior of wove fabric composite. *J Mater Sci* 1982;17:3211–20.
- [2] Aboura Z., Chouchaoui C.S., Benzeggagh M.L. (1993), « Analytical model of woven composite laminate superposition effect of two plies », *Congrès ECCM 6*, EACM, Bordeaux, 1993.
- [3] Sankar B., Marrey R., 1997. "Analytical method for micromechanics of textile composites", *Composites Science and Technology*, v. 57, pp. 703-713.
- [4] Huang ZM. The mechanical properties of composites reinforced with woven and braided fabrics. *Compos Sci Technol* 1999;60:479–98.
- [5] D.Scida, Z.Aboura, M.L.Benzeggagh et E.Bocherens, « *Amicromechanics model for 3D elasticity and failure of woven-fibre composite materials* », 1998.
- [6] Ping T., Liyong T., Steven G.P., 2000. "Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part II. FEA and analytical modeling approaches", *Composites: Part A*, v. 31, pp. 273-281.
- [7] E.J. Barbero, J. Trovillion, J.A. Mayugo, K.K. Sikkil, "Finite element modelling of plain weave fabrics from photomicrograph measurements", *Composite Structure* 73 (2006), pp. 41-52.
- [8] Christiane HAGE, Thèse « Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel », Université de Technologie de Compiègne, 2006.
- [9] KAABI Abedrrahmen « Modélisation par éléments finis du comportement mécanique des composites à renforts 2,5 D », France, 2007.
- [10] Daniel GAY, « *Matériaux composites* », 4 eme édition, HERMES, Paris, 1997.