

# Thèse

*présentée par*

**Christiane EL HAGE**

*pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE COMPIEGNE**

**Spécialité: Mécanique Avancée et Applications**

---

## Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel

---

**Soutenu le 27 Octobre 2006**

devant le jury composé de:

MM. <b>Jean-Marc ROELANDT</b>	Professeur des universités, UTC, Compiègne	(Président)
<b>Rezak AYAD</b>	Professeur des universités, ESIEC, Université de Reims Champagne Ardenne	(Rapporteur)
<b>Philippe OLIVIER</b>	Maître de Conférence-HDR, IUT Paul Sabatier Toulouse	(Rapporteur)
<b>Zoheir ABOURA</b>	Maitre de Conférence-HDR, IUT de Tremblay en France, Paris 8	(Co-directeur de thèse)
<b>Malk BENZEGGAGH</b>	Professeur des universités, UTC, Compiègne	(Directeur de thèse)
<b>Bruno DAMBRINE</b>	Docteur, Expert émérite SNECMA, Directeur Technique SNECMA Moteur, Moissy- Cramayel	
<b>Rafic YOUNES</b>	Docteur, Responsable Master II Mécanique, Université Hadath, Beyrouth, Liban	
<b>Mohamad ZOAETER</b>	Professeur, Doyen de la faculté de Génie, Université Hadath, Beyrouth, Liban	



## Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué par une convention de codirection entre l'UTC et l'Université Libanaise - Faculté de Génie. Tout d'abord, je tiens à remercier les personnes qui ont donné le jour à cette thèse et qui m'ont accordé leur confiance avec les conditions d'alternance citées dans la convention: Pr. François PECCOUD *le président de l'Université de Technologie de Compiègne*, Pr. Ibrahim KOBEISSI *le recteur de l'Université Libanaise*, Pr. Mohamad ZOATER *le doyen de la faculté de Génie de l'Université Libanaise*, les directeurs de thèse Français, Pr. Malk BENZEGGAGH et Dr. Zoheir Aboura et le co-cadreur Libanais Dr. Rafic Younès.

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail et en particulier messieurs, Philippe OLIVIER de l'I.U.T. Paul Sabatier de Toulouse et Rezak AYAD de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Emballage et Conditionnement de Reims, d'avoir accepté d'être rapporteurs de mon manuscrit et à M. Jean-Marc ROELANDT, Directeur du Laboratoire Roberval qui a assuré la présidence.

Je suis très contente que M. Bruno DAMBRINE Directeur Technique SNECMA Moteur soit un membre du jury car la recherche n'a pas de valeur sans un soutien industriel.

Pour ce qui a trait au déroulement de la thèse, j'adresse mes vifs remerciements pour mon directeur de thèse Malk BENZEGGAGH qui a initié et motivé à plusieurs reprises l'étude, mes co-directeurs de thèse, Zoheir ABOURA qui a été plus particulièrement précieux sur l'aspect "stratégie de modélisation" et l'aspect "expérimental" et Rafic YOUNES sur l'aspect "optimisation". Merci à eux d'avoir contribué chacun à leur façon à ce travail, par les idées motivantes qui ont contribué à l'avancement de la thèse.

A travers les plusieurs cours séjours passés au Laboratoire Roberval au centre de recherche au sein de l'UTC, j'ai pu mesurer à quel point il était enrichissant et nécessaire de développer des études de recherche avec des chercheurs de spécialités. Dommage de ne pas avoir eu plus d'occasion de vivre la réelle vie de recherche au sein du groupe composites polymères. Je pense ici à Malk BENZEGGAGH et Zoheir ABOURA qui ont dû souffrir de ma présence durant les vacances scolaires d'été ainsi qu'à Kamel KHELLIL, Samir ALLOUI et Bertrand LASCOUP avec qui j'ai eu refuge pour toute aide logistique.

Finalement je dédie ma thèse à mes parents, mon père, ma mère, mes deux frères, mes trois sœurs et leurs familles tout en les remerciant pour leur soutien inconditionnel qu'ils m'ont accordé durant ces longues années.



## Sommaire

Sommaire .....	5
Liste des figures .....	11
Liste des photos .....	19
Liste des tableaux .....	21
<b><i>Introduction générale</i></b> .....	<b>25</b>
<b><i>I. Première partie: Généralités sur les composites textiles</i></b> .....	<b>29</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>31</b>
<b>I.1. Généralités</b> .....	<b>33</b>
<b>I.2. Les préformes bidimensionnelles</b> .....	<b>34</b>
I.2.1. Les tricotés .....	34
I.2.2. Les tissus .....	35
I.2.3. Les tressés .....	35
<b>I.3. Les préformes tridimensionnelles</b> .....	<b>36</b>
<b>I.3.1. Les cousus</b> .....	<b>37</b>
I.3.1.1. Les tressés .....	38
<b>I.3.2. Les tricotés</b> .....	<b>39</b>
I.3.2.1. Les multiaxiaux .....	39
I.3.2.2. Sandwich tricoté .....	39
<b>I.3.3. Les tissés</b> .....	<b>40</b>
I.3.3.1. Machine de tissage 3D .....	40
I.3.3.2. Les tissage angle Interlock .....	41
I.3.3.2.1. Tissage angle Interlock 3D .....	41
I.3.3.2.2. Tissage angle couche - couche, 2.5D .....	42
I.3.3.2.3. Tissage angle Interlock couche à couche, 2.5D .....	42
I.3.3.2.4. Tissage Interlock orthogonal .....	42
I.3.3.3. Performances des tissés .....	43
<b>Conclusion de la première partie</b> .....	<b>45</b>
<b><i>II. Deuxième Partie: Etudes expérimentales</i></b> .....	<b>47</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>49</b>
<b>II.1. Chapitre 1 : Présentation des matériaux</b> .....	<b>51</b>
<b>II.1.1. Le tissage angle interlock 2.5D</b> .....	<b>51</b>
II.1.1.1. Type 1 – Tisseur 1 .....	52

II.1.1.2.	Type 2 – Tisseurs 2, 3 et 4 .....	54
II.1.1.2.1.	Tisseur 2 .....	54
II.1.1.2.2.	Tisseur 3 .....	56
II.1.1.2.3.	Tisseur 4 .....	58
II.1.1.3.	Tableau récapitulatif des tissages interlock .....	60
<b>II.1.2.</b>	<b>Le tissage orthogonal 3D .....</b>	<b>61</b>
II.1.2.1.	Présentation générale .....	61
II.1.2.2.	Etudes microscopiques.....	61
<b>II.2.</b>	<b>Chapitre 2: Comportement expérimental des Interlocks .....</b>	<b>63</b>
<b>II.2.1.</b>	<b>Interlock type 1- H2 .....</b>	<b>63</b>
<b>II.2.2.</b>	<b>Interlock type 2 .....</b>	<b>64</b>
<b>II.2.3.</b>	<b>Différences comportementales en fonction des architectures.....</b>	<b>65</b>
II.2.3.1.	Etudes microscopiques – Interlock type 1: H2 .....	66
II.2.3.1.1.	Essais dans le sens chaîne.....	66
II.2.3.1.2.	Essais dans le sens trame .....	77
II.2.3.2.	Etudes macroscopiques – Interlock type 2 .....	89
II.2.3.2.1.	Tisseur 2- Tissage type 71 .....	89
II.2.3.2.2.	Tisseur 2- Tissage type 74 .....	91
II.2.3.2.3.	Tisseur 3- Tissage type 66 .....	93
II.2.3.2.4.	Tisseur 4- Tissage type 69 .....	94
II.2.3.2.5.	Discussions comportementales.....	95
II.2.3.3.	Résultats mécaniques des essais de traction .....	95
II.2.3.3.1.	Interlocks type 1-H2 .....	95
II.2.3.3.2.	Interlocks type 2, tisseur 2, 3 et 4.....	98
II.2.3.4.	Etudes d'émission acoustique.....	101
II.2.3.4.1.	Le traitement des signaux d'émission acoustique.....	101
II.2.3.4.2.	Les résultats des essais de traction suivi de l'émission acoustique .....	103
<b>II.3.</b>	<b>Chapitre 3: Comportement du 3D orthogonal .....</b>	<b>131</b>
<b>II.3.1.</b>	<b>Présentation de l'essai de compression .....</b>	<b>131</b>
<b>II.3.2.</b>	<b>Instrumentation des éprouvettes .....</b>	<b>131</b>
II.3.2.1.	Plan de chargement XY .....	133
II.3.2.2.	Plan de chargement XZ.....	134
II.3.2.3.	Plan de chargement YZ .....	135
<b>II.3.3.</b>	<b>Résultats et discussions .....</b>	<b>135</b>
II.3.3.1.	Essais dans le plan de chargement XY.....	135
II.3.3.2.	Essais dans le plan de chargement XZ.....	138
II.3.3.3.	Essais dans le plan de chargement YZ.....	140
<b>II.3.4.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>142</b>
	<b>Conclusion de la deuxième partie .....</b>	<b>143</b>
<b>III.</b>	<b>Troisième partie: Modélisation .....</b>	<b>145</b>
	<b>Introduction .....</b>	<b>147</b>
<b>III.1.</b>	<b>Chapitre 1 : Etudes bibliographiques .....</b>	<b>149</b>

<b>III.1.1. Détermination des propriétés élastiques .....</b>	<b>149</b>
<i>III.1.1.1. Le concept d'homogénéisation .....</i>	<i>149</i>
<i>III.1.1.2. Modélisation analytique du niveau meso.....</i>	<i>150</i>
III.1.1.2.1. Les approches théoriques.....	150
III.1.1.2.2. La théorie des stratifiés .....	152
III.1.1.2.3. Modélisation numérique.....	153
<i>III.1.1.3. Modélisation analytique du niveau macro.....</i>	<i>153</i>
III.1.1.3.1. Les modèles "x model, y model et z model".....	153
III.1.1.3.2. La méthode moyenne sélective (SAM).....	154
III.1.1.3.3. Le modèle de cellule (MC) .....	155
<b>III.1.2. Détermination des propriétés ultimes .....</b>	<b>156</b>
<i>III.1.2.1. Définition des critères de résistance.....</i>	<i>157</i>
<i>III.1.2.2. Critère de Hoffman.....</i>	<i>157</i>
<i>III.1.2.3. Critère de Tsai-Wu .....</i>	<i>158</i>
<i>III.1.2.4. Critère de la contrainte maximale.....</i>	<i>158</i>
<i>III.1.2.5. Critère de la déformation maximale .....</i>	<i>159</i>
<b>III.1.3. Critères tridimensionnels d'endommagement .....</b>	<b>159</b>
<b>III.2. Chapitre 2 : Processus de la modélisation analytique.....</b>	<b>160</b>
<b>III.2.1. Démarche du processus d'homogénéisation .....</b>	<b>160</b>
<i>III.2.1.1. L'homogénéisation du niveau macro .....</i>	<i>160</i>
III.2.1.1.1. Recherche de la matrice de rigidité du VER.....	161
III.2.1.1.2. Calcul des propriétés 3D du composite.....	162
<i>III.2.1.2. L'homogénéisation du niveau meso.....</i>	<i>163</i>
III.2.1.2.1. Recherche des propriétés 2D d'une mèche.....	163
III.2.1.2.2. Calcul de la fraction volumique de fibre d'une mèche .....	165
<b>III.2.2. Modèles comportementaux jusqu'à la rupture.....</b>	<b>165</b>
<i>III.2.2.1. Critère d'endommagement I .....</i>	<i>166</i>
<i>III.2.2.2. Critère d'endommagement II.....</i>	<i>166</i>
<i>III.2.2.3. Critère d'endommagement III.....</i>	<i>167</i>
<b>III.3. Chapitre 3 : Validation des modèles .....</b>	<b>168</b>
<b>III.3.1. Le tissage orthogonal 3D .....</b>	<b>169</b>
<i>III.3.1.1. Propriétés géométriques .....</i>	<i>169</i>
<i>III.3.1.2. Choix du VER .....</i>	<i>170</i>
III.3.1.2.1. Cellule unitaire (CU).....	170
III.3.1.2.2. Cellule globale (CG) .....	171
<i>III.3.1.3. Propriétés élastiques et à rupture .....</i>	<i>173</i>
III.3.1.3.1. Propriétés élastiques .....	173
III.3.1.3.2. Propriétés ultimes.....	175
<i>III.3.1.4. Etudes de simulation .....</i>	<i>178</i>
III.3.1.4.1. Effet du grammage sur les propriétés 3D.....	179
III.3.1.4.2. Effet du pas de tissage sur les propriétés 3D.....	180
<b>III.3.2. Le tissage angle Interlock 2.5D .....</b>	<b>182</b>
<i>III.3.2.1. Stratégie de modélisations géométriques des VER.....</i>	<i>182</i>

III.3.2.1.1.	Les études fractographiques .....	182
III.3.2.1.2.	Le suivi de la stratégie.....	188
III.3.2.2.	<i>Formulations des modélisations géométriques</i> .....	189
III.3.2.2.1.	Modélisation du profil d'une mèche ondulatoire .....	189
III.3.2.2.2.	Modélisation de la section transversale d'une mèche .....	189
III.3.2.2.3.	Caractéristiques géométriques de la partie ondulatoire d'une mèche ....	189
III.3.2.3.	<i>Modélisations géométriques des VER</i> .....	192
III.3.2.3.1.	Le Type 1: tisseur 1-H2, Interlock couche – couche .....	192
III.3.2.3.2.	Le Type 2: tisseur 2, 3 et 4 .....	200
III.3.2.4.	<i>Propriétés élastiques et à rupture</i> .....	205
III.3.2.4.1.	Tisseur 1, type 1-H2 .....	205
III.3.2.4.2.	Tisseur 2, Type 2-71 .....	215
III.3.2.4.3.	Tisseur 3, Type 2-66 .....	221
III.3.2.4.4.	Tisseur 4, Type 2-69 .....	223
	<b>Conclusion de la troisième partie .....</b>	<b>227</b>
	<b>IV. Quatrième partie: Etudes d'optimisation .....</b>	<b>229</b>
	<b>Introduction .....</b>	<b>231</b>
	<b>IV.1. Chapitre 1 : Etudes bibliographiques .....</b>	<b>233</b>
IV.1.1.	<b>Le concept de base d'une étude d'optimisation .....</b>	<b>233</b>
IV.1.2.	<b>Parcours historique des études optimales.....</b>	<b>234</b>
IV.1.2.1.	<i>Le compromis Design/poids .....</i>	<i>234</i>
IV.1.2.2.	<i>Le compromis Design/coût .....</i>	<i>234</i>
IV.1.2.3.	<i>Le compromis Design/performance .....</i>	<i>235</i>
IV.1.2.4.	<i>Le compromis Design/coût/performance.....</i>	<i>236</i>
IV.1.3.	<b>Les applications d'optimisation des stratifiés .....</b>	<b>237</b>
	<b>IV.2. Chapitre 2 : Processus de l'étude d'optimisation .....</b>	<b>241</b>
IV.2.1.	<b>La démarche d'une étude d'optimisation .....</b>	<b>241</b>
IV.2.2.	<b>La formulation du processus d'optimisation .....</b>	<b>243</b>
IV.2.2.1.	<i>La fonction objectif et les fonctions contraintes.....</i>	<i>244</i>
IV.2.2.2.	<i>Le problème mathématique de l'analyse.....</i>	<i>246</i>
IV.2.3.	<b>Application 1:</b>	
IV.2.3.1.	<b>Optimisation du tissage orthogonal 3D .....</b>	<b>251</b>
IV.2.3.1.	<i>Les variables et les contraintes .....</i>	<i>251</i>
IV.2.3.2.	<i>Les résultats de l'étude d'optimisation.....</i>	<i>253</i>
IV.2.4.	<b>Application 2:</b>	
IV.2.4.1.	<b>Optimisation du tissage angle interlock .....</b>	<b>262</b>
IV.2.4.1.	<i>Les variables et les contraintes .....</i>	<i>262</i>
IV.2.4.2.	<i>Les résultats de l'étude d'optimisation.....</i>	<i>264</i>
	<b>Conclusion de la quatrième partie .....</b>	<b>279</b>
	<b>Conclusions générales et perspectives.....</b>	<b>281</b>

<b>A. Annexe A</b> .....	<b>287</b>
<b>Etude d'émission acoustique</b> .....	<b>287</b>
A.1. <i>Tisseur 1, Interlock type H2</i> .....	287
A.2. <i>Tisseur 2, type 71 et 74</i> .....	289
A.2.1. <i>Tisseur 2, type 71 sollicité dans le sens chaîne</i> .....	289
A.2.2. <i>Tisseur 2, type 71 sollicité dans le sens trame</i> .....	292
A.2.3. <i>Effet de la proportionnalité en fibre dans le tissage 71</i> .....	296
A.2.4. <i>Tisseur 2, type 74 sollicité dans le sens chaîne</i> .....	298
A.2.4. <i>Effet de proportionnalité en fibre entre les tissages 71 et 74</i> .....	301
A.3. <i>Etude comportementale entre les tissages couche-couche</i> .....	305
A.4. <i>Tisseur 3, type 66</i> .....	310
A.5. <i>Tisseur 4, type 69</i> .....	313
A.6. <i>Etude comportementale dans la famille couche à couche</i> .....	317
<b>B. Annexe B</b> .....	<b>318</b>
B.1. <i>Matrices changement de base de tenseurs contrainte et déformation</i> .....	318
B.2. <i>Expression de la fraction volumique des fibres/mèche</i> .....	320
<b>C. Annexe C</b> .....	<b>322</b>
<b>Modélisation du tissage orthogonal 3D</b> .....	<b>322</b>
C.1. <i>Propriétés géométrique du tissage 3D orthogonal</i> .....	322
C.2. <i>Modélisation de la courbure de la mèche verticale</i> .....	323
C.3. <i>Modélisation numérique de type EF</i> .....	327
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>333</b>



## Liste des figures

<i>Figure I-1 La structure des types de préforme textile.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure I-2 Quelques types de Textile tricotés .....</i>	<i>35</i>
<i>Figure I-3 Quelques types de tissus 2D.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure I-4 Quelques types de tressés 2D.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure I-5 Structure sandwich cousu, Lascoup (2005).....</i>	<i>37</i>
<i>Figure I-6 stratifié cousu (non tissé) .....</i>	<i>38</i>
<i>Figure I-7 stratifié satin de 5 cousu avec la T900 obtenu par MEB .....</i>	<i>38</i>
<i>Figure I-8 Tressé 3D.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure I-9 Tricoté 3D multiaxial .....</i>	<i>39</i>
<i>Figure I-10 Le tisseur "Jacquard" .....</i>	<i>40</i>
<i>Figure I-11 Tissage angle Interlock 3D .....</i>	<i>41</i>
<i>Figure I-12 Tissage polaire, Adanur et Liao (1998) .....</i>	<i>41</i>
<i>Figure I-13 Tissage angle Interlock couche-couche.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure I-14 Tissage angle Interlock couche à couche .....</i>	<i>42</i>
<i>Figure I-15 Quelques motif du tissage orthogonal 3D.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure I-16 Quelques motifs de tissages Interlock orthogonal .....</i>	<i>43</i>
<i>Figure I-17 Effet du renfort Textile sur la contrainte interlaminaire .....</i>	<i>44</i>
<i>Figure I-18 Effet du type de renfort et de la matrice, sur la contrainte en compression post impact .....</i>	<i>44</i>
<i>Figure II-1 Les figures de sections longitudinales de l'Interlock 2.5D type H2 pour 5 mèches longitudinales au coeur de la préforme .....</i>	<i>53</i>
<i>Figure II-2 Schématisation du motif de l'interlock 2.5D type H2 .....</i>	<i>53</i>
<i>Figure II-3 Les figures de sections longitudinales dans l'épaisseur de la préforme de l'Interlock 2.5D tissé par le tisseur 2 (71-74).....</i>	<i>56</i>
<i>Figure II-4 Les figures de sections longitudinales dans l'épaisseur de la préforme de l'Interlock 2.5D tissé par le tisseur 3 (66) .....</i>	<i>57</i>
<i>Figure II-5 Les figures de sections longitudinales dans l'épaisseur de la préforme de l'Interlock 2.5D tissé par le tisseur 4 (69) .....</i>	<i>59</i>
<i>Figure II-6 Présentation du tissage orthogonal 3D.....</i>	<i>61</i>
<i>Figure II-7 Etude microscopique du tissage orthogonal 3D.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure II-8 Schématisation du tissage orthogonal 3D.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure II-9 Spécimen de traction dans le sens chaîne.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure II-10 Spécimen de traction dans le sens trame.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure II-11 Spécimen de traction dans le sens chaîne.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure II-12 Eprouvettes Interlock 2.5D type 2-tisseur (71-74-69-66), testées en traction uniaxiale.....</i>	<i>65</i>

Figure II-13	Schématisation des premiers endommagements en section longitudinale de l'interlock H2- sous traction uniaxiale dans le sens chaîne.....	74
Figure II-14	Schématisation des endommagements en section longitudinale de l'interlock H2- sous traction uniaxiale dans le sens chaîne.....	74
Figure II-15	Courbes expérimentales contrainte- déformation par Traction sens chaîne de l'Interlock type H2.....	96
Figure II-16	Courbes expérimentales contrainte- déformation par traction sens trame de l'Interlock type H2.....	97
Figure II-17	Courbes expérimentales contrainte- déformation, différence comportementale de l'Interlock types H2 entre le sens chaîne/trame .....	97
Figure II-18	Courbes expérimentales contrainte- déformation par Traction sens chaîne pour l'Interlock de types 71 et 74 .....	98
Figure II-19	Courbes expérimentales contrainte- déformation sous traction uniaxial dans le sens trame, pour l'Interlock de types 66, 69 et 71 .....	99
Figure II-20	Courbes expérimentales contrainte- déformation, différence comportementale de l'Interlock type 71 entre le sens chaîne/trame .....	100
Figure II-21	Attribution des plages d'amplitude aux différents types d'endommagement [Barré et Benzeggagh (1994)].....	102
Figure II-22	Représentation 3D des résultats d'EA (nombre des évènements, amplitudes, temps) de l'interlock type H2, sous traction dans le sens chaîne .....	104
Figure II-23	Représentation 2D des résultats d'EA de l'interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	105
Figure II-24	Représentation 2D des résultats d'EA (selon les choix de réduction de la série d'amplitude)- Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne.....	105
Figure II-25	Résultats MEB/l'EA dans la plage 35-50 dB - Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	106
Figure II-26	Résultats MEB/l'EA dans la plage 50-60 dB - Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	107
Figure II-27	Résultats MEB/l'EA dans la plage 60-65 dB - Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	108
Figure II-28	Plage 65-82 dB-Type H2, traction uniaxiale dans le sens chaîne.....	108
Figure II-29	Résultats MEB/l'EA dans la plage 82-100 dB - Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	109
Figure II-30	Représentation 3D des résultats d'EA (nombre d'évènements, amplitudes, temps). Interlock type H2, traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	110
Figure II-31	Représentation 2D des résultats d'EA de l'interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....	111
Figure II-32	Représentation 2D des résultats d'EA (selon deux principes de minimisation de la série d'amplitude)- Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....	111
Figure II-33	Résultats MEB/l'EA dans la plage 35-50 dB - Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....	112
Figure II-34	Résultats MEB/l'EA dans la plage 50-60 dB - l'interlock type H2 sous traction uniaxiale dans le sens trame .....	113
Figure II-35	Résultats MEB/l'EA dans la plage 60-65 dB - l'interlock type H2 sous traction dans le sens trame .....	114

Figure II-36 Résultats MEB/l'EA dans la plage 65-82 dB - l'interlock type H2 sous traction dans le sens trame. ....	115
Figure II-37 Résultats MEB/l'EA dans la plage 82-100 dB - l'interlock type H2 sous traction dans le sens trame. ....	116
Figure II-38 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction sens chaîne suivi par l'EA de l'Interlock type H2 .....	117
Figure II-39 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction sens chaîne suivi par l'EA de l'Interlock type H2 .....	117
Figure II-40 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction sens trame suivi par l'EA de l'Interlock type H2 .....	118
Figure II-41 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction sens trame suivi par l'EA de l'Interlock type H2 .....	118
Figure II-42 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens chaîne suivi par EA –Interlock type 71 .....	120
Figure II-43 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens chaîne suivi par EA- Interlock type 71 .....	120
Figure II-44 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l'EA- Interlock type 71 .....	122
Figure II-45 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l'EA-Interlock type 71 .....	122
Figure II-46 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens chaîne suivi par l'EA-Interlock type 74 .....	123
Figure II-47 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens chaîne suivi par l'EA-Interlock type 74 .....	123
Figure II-48 Présentation 3D et 2D des cumuls des évènements par plage d'amplitude, sous essai de traction uniaxiale dans le sens chaîne suivi par l' EA .....	124
Figure II-49 Présentation 3D et 2D des cumuls des évènements par plage d'amplitude, sous essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l' EA .....	125
Figure II-50 Présentation 3D et 2D des cumuls des évènements par plage d'amplitude, sous essai de traction uniaxiale dans le sens chaîne suivi par l' EA .....	125
Figure II-51 Présentation 3D et 2D des cumuls des évènements par plage d'amplitude, sous essai de traction uniaxial dans le sens trame suivi par l' EA .....	126
Figure II-52 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l' EA-Interlock type 66 .....	127
Figure II-53 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l'EA-Interlock type 66 .....	127
Figure II-54 Présentation 3D et 2D des cumuls des évènements par plage d'amplitude, sous essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l' EA .....	128
Figure II-55 Cumul des évènements par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l'EA-Interlock type 69 .....	129
Figure II-56 Cumul des énergies par plage d'amplitude d'un essai de traction uniaxiale dans le sens trame suivi par l'EA-Interlock type 69 .....	129
Figure II-57 Schématisation des détails architecturaux de l'éprouvette (cube de 8mm) de l'orthogonal 3D .....	132
Figure II-58 Schématisation de l'éprouvette instrumentée de l'orthogonal 3D .....	132
Figure II-59 Schématisation des différents plans de chargement .....	133

Figure II-60 Eprouvette instrumentée sous compression selon l'axe Z.....	134
Figure II-61 Eprouvette instrumentée sous compression dans le sens Y.....	134
Figure II-62 Eprouvette instrumentée sous compression dans le sens X.....	135
Figure II-63 Plan de chargement XY à l'état d'endommagement.....	135
Figure II-64 Etat d'endommagement sur les facettes du l'éprouvette chargée dans le plan XY.....	136
Figure II-65 Eprouvette cisailée sous compression dans le sens Z.....	137
Figure II-66 Courbes contrainte micro déformation, d'essai de compression chargé dans le plan XY.....	137
Figure II-67 Eprouvette endommagée sous compression dans le sens Y.....	138
Figure II-68 Schématisation des endommagements produits sous compression dans le sens Y.....	139
Figure II-69 Courbes contrainte déformation en compression selon Y.....	139
Figure II-70 Eprouvette endommagée sous compression dans le sens X.....	140
Figure II-71 Eprouvette endommagée sous compression dans le sens X, en vue du plan de chargement et de son opposé.....	141
Figure II-72 Courbes contrainte micro déformation d'essai de compression chargé dans le plan YZ.....	141
Figure III-1 Schématisation du principe d'homogénéisation du MC.....	156
Figure III-2 Schématisation du concept d'homogénéisation.....	161
Figure III-3 Boucle du critère d'endommagement III, appliqué sous compression uniaxiale.....	167
Figure III-4 Organigramme de la modélisation sous tension uniaxiale.....	168
Figure III-5 Mesures microscopiques sur le tissage orthogonal 3D (MEB).....	170
Figure III-6 Schématisation du VER (CU).....	171
Figure III-7 Schématisation de la modélisation du VER (CG).....	172
Figure III-8 Modélisation des orientations des fibres de la courbure.....	172
Figure III-9 Variation du module Ez fonction du rayon de courbure pour trois taux de fibre du composite.....	175
Figure III-10 Zones de vérification locale de rupture: Tsai/fractographie.....	176
Figure III-11 Courbes contrainte/micro-déformation sous compression selon l'axe Z. Etudes comparatives entre modèles analytiques/expérimentales.....	177
Figure III-12 Courbes contrainte/micro-déformation sous compression selon l'axe Y. Etudes comparatives entre modèles analytiques/expérimentales.....	177
Figure III-13 Courbes contrainte/micro-déformation sous compression selon l'axe X. Etude comparative entre modèle CG/expérimentale.....	178
Figure III-14 Variation du module d'élasticité en épaisseur en fonction du pas de tissage dans les deux cas de modélisation du VER.....	179
Figure III-15 Variation des trois modules d'élasticité en fonction du pas de tissage dans le cas de la modélisation du VER (CU).....	180
Figure III-16 Variation des trois modules d'élasticité en fonction du pas de tissage dans le cas des deux modélisations du VER (CU) et (CG).....	180
Figure III-17 Variation du paramètre de tissage.....	181

Figure III-18	Section longitudinal du tisseur 1, Interlock Type1-H2 (MEB) .....	183
Figure III-19	Section transverse du tisseur 1, Interlock Type1-H2 (MEB) .....	183
Figure III-20	Analyse architecturale du Tisseur 1, Type 1-H2 .....	184
Figure III-21	Analyse architecturale du Tisseur 2, Type 2-71 et 74 .....	185
Figure III-22	Analyse architecturale du Tisseur 3, Type 2-66 .....	186
Figure III-23	Analyse architecturale du Tisseur 4, Type 2-69 .....	187
Figure III-24	Modélisation du profil d'une ondulation .....	189
Figure III-25	Modélisation du profil d'une ondulation .....	190
Figure III-26	Modélisation de la section transverse de mèche trame .....	192
Figure III-27	Modélisation de la section longitudinale – Cas 1 .....	193
Figure III-28	Modélisation de la section longitudinale – Cas 2 .....	194
Figure III-29	Modélisation de la section Transverse – Cas 1 .....	196
Figure III-30	Modélisation de la section transverse – Cas 2 .....	197
Figure III-31	Modélisation de la section transverse – Cas 3 .....	198
Figure III-32	Modélisation de la section longitudinale du tisseur 2 .....	200
Figure III-33	Modélisation de la section longitudinale du tisseur 3 .....	201
Figure III-34	Modélisation de la section longitudinale du tisseur 4 .....	202
Figure III-35	Modélisation de la section transverse du Type 2 .....	204
Figure III-36	Prédiction analytique des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne, Interlock type 1-H2.....	207
Figure III-37	Prédiction analytique des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne/résultats expérimentaux, .....	208
Figure III-38	Comparaison de courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne entre les 2 critères d'endommagement I et II /études expérimentales, Interlock type 1-H2.....	209
Figure III-39	Prédiction analytique des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens trame, par les 6 combinaisons, .....	209
Figure III-40	Comparaison de courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens trame entre les 2 critères d'endommagement I et II par rapport aux résultats expérimentaux, Interlock type 1-H2 .....	210
Figure III-41	Comparaison de courbe contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens trame entre les modèles analytiques avec le critère d'endommagement II et les résultats expérimentaux, Interlock type 1-H2 .....	211
Figure III-42	Comparaison de l'avènement et de la localisation des endommagements prédits par le modèle analytique avec les études fractographiques et l'EA, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne, .....	213
Figure III-43	Comparaison de l'avènement et de la localisation des endommagements prédits par le modèle analytique avec les études fractographiques et l'EA , sous traction uniaxiale dans le sens trame,.....	214
Figure III-44	Courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne prédit par les modèles: "escalier" et "ondulatoire", type 2-71 .....	216
Figure III-45	Comparaison des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne avec les deux critères d'endommagement I, et II/résultats expérimentaux, type 2-71 .....	217

Figure III-46 Comparaison des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne avec le critère d'endommagement I et les résultats expérimentaux, type -71 .....	217
Figure III-47 Comparaison de l'avènement et de la localisation des endommagements prédits par les modèles analytiques avec les études d'EA, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne, pour le tisseur 2-Type 71 .....	218
Figure III-48 Courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens trame prédit par les modèles: "escalier" et "ondulatoire", type 2-71 .....	219
Figure III-49 Comparaison des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens trame avec les deux critères d'endommagement I, et II/résultats expérimentaux, type 2-71 .....	219
Figure III-50 Comparaison de l'avènement et de la localisation des endommagements prédits par les modèles analytiques avec les études d'EA, sous traction uniaxiale dans le sens trame, pour le tisseur 2- Type 71.....	220
Figure III-51 Comparaison des courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne avec les deux critères d'endommagement I et II/résultats expérimentaux, type 2-66 .....	222
Figure III-52 Comparaison de l'avènement et de la localisation des endommagements prédits par les modèles analytique avec les études d'EA, sous traction uniaxiale dans le sens trame, pour le tisseur 3- Type 66.....	223
Figure III-53 Courbes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne prédit par les modèles: "escalier" et "ondulatoire", type 2-69.....	225
Figure III-54 Courbes des diagrammes contrainte déformation sous traction uniaxiale dans le sens chaîne avec les deux critères d'endommagement I et II/résultats expérimentaux, type 2-69 .....	225
Figure III-55 Comparaison de l'avènement et de la localisation des endommagements prédits par les modèles analytiques avec les études d'EA, sous traction uniaxial dans le sens trame, pour le tisseur 4- Type 2-69 .....	226
Figure IV-1 Organigramme de l'analyse d'optimisation.....	250
Figure IV-2 Le tissage orthogonal 3D.....	251
Figure IV-3 Le VER de la CU du tissage orthogonal 3D .....	252
Figure IV-4 Perspective du tissage angle interlock 2.5D type 1.....	262
Figure IV-5 Sections du tissage angle interlock 2.5D type H2 – VER "cas 1-3".....	263
Figure IV-6 Section transversale d'une mèche avant et après l'injection.....	265
Figure IV-7 Section longitudinale de l'interlock pour $n_e = 1$ .....	274
Figure IV-8 Section longitudinale de l'interlock pour $n_e = 2$ .....	274
Figure IV-9 Section longitudinale de l'interlock pour $n_e = 3$ .....	274
Figure IV-10 Section longitudinale de l'interlock pour $n_e = 4$ .....	274
Figure A-1 Résultats d'EA en nombres d'évènement, par plage d'amplitude.....	287
Figure A-2 Représentation 3D des résultats d'EA (nombre des évènements, amplitudes, temps) de l'interlock type 71 sous traction dans le sens chaîne. ....	289
Figure A-3 Représentation 2D des résultats d'EA (nombre d'évènement, amplitude) de l'interlock type 71 sous traction dans le sens chaîne .....	290
Figure A-4 Représentation 2D des résultats d'EA par les plages d'amplitude (nombre d'évènement, énergie dissipée) de l'interlock type 71 sous traction dans le sens chaîne .....	292

Figure A-5	Représentation 3D des résultats d'EA (nombre des évènements, amplitudes, temps) de l'interlock type 71 sous traction uniaxiale dans le sens trame. .292
Figure A-6	Représentation 2D des résultats d'EA (nombre d'évènement, amplitude) de l'interlock type 71 sous traction uniaxiale dans le sens trame.....293
Figure A-7	Représentation 2D des résultats d'EA par les plages d'amplitude (nombre d'évènement, énergie dissipée) de l'interlock type 71 sous traction uniaxiale dans le sens trame .....295
Figure A-8	Résultats d'EA en nombres d'évènement, par plage d'amplitude.....297
Figure A-9	Représentation 3D des résultats d EA (nombre des évènements, amplitudes, temps) de l'interlock type 74 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne. 298
Figure A-10	Représentation 2D des résultats d'EA (nombre d'évènement, amplitude) de l'interlock type 74 sous traction uniaxial dans le sens chaîne.....299
Figure A-11	Représentation 2D des résultats d'EA par les plages d'amplitude (nombre d'évènement, énergie dissipée) de l'interlock type 74 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne.....301
Figure A-12	Résultats d'EA en nombres d'évènement, par plage d'amplitude.....302
Figure A-13	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement et en énergie dissipée - Interlock type 71 et 74- Plage d'amplitude [35-50[ dB.....303
Figure A-14	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement et en énergie dissipée - Interlock type 71 et 74- Plage d'amplitude [50-60[ dB.....303
Figure A-15	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement et en énergie dissipée - Interlock type 71 et 74- Plage d'amplitude 60-100 dB.....304
Figure A-16	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement .....305
Figure A-17	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement .....306
Figure A-18	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement .....307
Figure A-19	Résultats d'EA en cumul de l'énergie dissipée .....308
Figure A-20	Résultats d'EA en cumul de nombres d'évènement .....308
Figure A-21	Résultats d'EA en cumul d'énergie dissipée .....309
Figure A-22	Représentation 3D des résultats d EA (nombre des évènements, amplitudes, temps) de l'interlock type 66 sous traction dans le sens trame. ....310
Figure A-23	Représentation 2D des résultats d'EA (nombre d'évènement, amplitude) de l'interlock type 66 sous traction dans le sens trame.....311
Figure A-24	Représentation 2D des résultats d'EA par les plages d'amplitude (nombre d'évènement, énergie dissipée) de l'interlock type 66 sous traction uniaxiale dans le sens trame .....313
Figure A-25	Représentation 3D des résultats d EA (nombre des évènements, amplitudes, temps) de l'interlock type 69 sous traction uniaxiale dans le sens trame. .313
Figure A-26	Représentation 2D des résultats d'EA (nombre d'évènement, amplitude) de l'interlock type 69 sous traction uniaxiale dans le sens trame.....314
Figure A-27	Représentation 2D des résultats d'EA par les plages d'amplitude (nombre d'évènement, énergie dissipée) de l'interlock type 69 sous traction dans le sens trame .....316
Figure C-1	Modélisation de la courbure de la mèche verticale du VER (CG) .....322
Figure C-2	Génération de la courbure de la mèche verticale du VER (CG) .....323
Figure C-3	Généralisation de la courbure de la mèche verticale du VER (CG) .....325

Figure C-4 Maillage par EF du VER (CU) .....327

## Liste des photos

<i>Photo II-1</i>	<i>Scanner de la section longitudinale de l'Interlock 2.5D type H2</i> .....	52
<i>Photo II-2</i>	<i>Vue de dessus du tisseur 2</i> .....	54
<i>Photo II-3</i>	<i>Section longitudinale macroscopique de l'échantillon type 74</i> .....	54
<i>Photo II-4</i>	<i>Vue de dessus du tisseur 3</i> .....	56
<i>Photo II-5</i>	<i>Section longitudinale macroscopique de l'échantillon type 66</i> .....	57
<i>Photo II-6</i>	<i>Vue de dessus du tisseur 4</i> .....	58
<i>Photo II-7</i>	<i>Section longitudinale macroscopique de l'échantillon type 69</i> .....	58
<i>Photo II-8</i>	<i>Section longitudinale de l'interlock type H2-non endommagée- MEB</i> .....	67
<i>Photo II-9</i>	<i>Section longitudinale de l'interlock type H2-endommagée sous traction uniaxiale dans le sens longitudinal- MEB</i> .....	67
<i>Photo II-10</i>	<i>Déclenchement des ruptures aux interfaces, sur une partie d'une section longitudinale de l'interlock type H2 - MEB</i> .....	69
<i>Photo II-11</i>	<i>Déclenchement des ruptures aux interfaces, sur une partie d'une section longitudinale de l'interlock type H2 - MEB</i> .....	70
<i>Photo II-12</i>	<i>Le motif du déclenchement des ruptures aux interfaces dans une section longitudinale de l'interlock type H2 – MEB</i> .....	71
<i>Photo II-13</i>	<i>Encerclement des mèches sens trame dans les plis médians dans une section longitudinale de l'interlock type H2 - MEB</i> .....	71
<i>Photo II-14</i>	<i>Rupture d'interface et rupture transverse de mèche sens trame dans une section longitudinale de l'interlock type H2 – MEB</i> .....	72
<i>Photo II-15</i>	<i>Rupture transverse des mèches sens trame des plis médians et rupture d'interface par encerclement des mèches sens trame des plis de bord, dans une section longitudinale de l'interlock type H2 – MEB</i> .....	72
<i>Photo II-16</i>	<i>Rupture transverse des mèches sens trame des plis de bord et succession de rupture des mèches sens trame des plis médians, dans une section longitudinale de l'interlock type H2 - MEB</i> .....	73
<i>Photo II-17</i>	<i>Rupture transverse de mèche sens trame dans une section longitudinale de l'interlock type H2 – MEB</i> .....	73
<i>Photo II-18</i>	<i>Endommagement dans la section longitudinale de l'interlock type H2, à fort grossissement – MEB</i> .....	73
<i>Photo II-19</i>	<i>Section longitudinale en phase de rupture finale sollicitée en traction dans le sens chaîne - Interlock type H2– MEB</i> .....	74
<i>Photo II-20</i>	<i>Section transverse de l'échantillon sein -Interlock type H2- MEB</i> .....	75
<i>Photo II-21</i>	<i>Section transverse de l'Interlock type H2- endommagé sous traction uniaxiale dans le sens longitudinal -MEB</i> .....	75
<i>Photo II-22</i>	<i>Endommagement au sein des mèches sens chaîne dans la section transverse de l'Interlock type H2, sous traction uniaxiale dans le sens longitudinal -MEB</i> .....	76
<i>Photo II-23</i>	<i>Section en sens trame de l'interlock type H2-non endommagée</i> .....	78
<i>Photo II-24</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) de l'interlock type H2-endommagée sous traction uniaxiale dans le sens trame- MEB</i> .....	78
<i>Photo II-25</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) de l'interlock type H2- en zone de concentration de contrainte- MEB</i> .....	80

<i>Photo II-26</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) de l'interlock type H2- déclenchement des ruptures- MEB .....</i>	<i>80</i>
<i>Photo II-27</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) de l'interlock type H2- propagation des ruptures- MEB.....</i>	<i>80</i>
<i>Photo II-28</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) de l'interlock type H2- motif du processus de ruine- MEB .....</i>	<i>81</i>
<i>Photo II-29</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) en phase de rupture finale - Interlock type H2– MEB .....</i>	<i>81</i>
<i>Photo II-30</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) par progression d'endommagement - Interlock type H2– MEB .....</i>	<i>82</i>
<i>Photo II-31</i>	<i>Section en sens trame (direction du chargement) en phase de ruine - Interlock type H2– MEB.....</i>	<i>82</i>
<i>Photo II-32</i>	<i>Section en sens chaîne (direction perpendiculaire au chargement) en phase 1 d'endommagement - Interlock type H2– MEB.....</i>	<i>84</i>
<i>Photo II-33</i>	<i>Section en sens chaîne (direction perpendiculaire au chargement) en phase 2 d'endommagement - Interlock type H2– MEB.....</i>	<i>85</i>
<i>Photo II-34</i>	<i>Section en sens chaîne (direction perpendiculaire au chargement) Stade avancé d'endommagement dans les blocs de résine.....</i>	<i>85</i>
<i>Photo II-35</i>	<i>Vue de dessus de l'éprouvette à l'état de ruine sous traction uniaxiale dans le sens trame de l'Interlock type H2– MEB.....</i>	<i>86</i>
<i>Photo II-36</i>	<i>Mèche sens chaîne en état de rupture longitudinale sous traction uniaxiale dans le sens trame du tissage- Interlock type H2– MEB.....</i>	<i>87</i>
<i>Photo II-37</i>	<i>Blocs de résine cisailés sous traction uniaxiale dans le sens trame du tissage- Interlock type H2– MEB .....</i>	<i>87</i>
<i>Photo II-38</i>	<i>Faciès transverse de rupture de l'éprouvette, sous traction uniaxiale dans le sens trame de l'Interlock type H2– MEB.....</i>	<i>88</i>
<i>Photo II-39</i>	<i>Vue en surface de l'éprouvette du tissage type 71, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne.....</i>	<i>89</i>
<i>Photo II-40</i>	<i>Vue de l'épaisseur de l'éprouvette du tissage type 71, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....</i>	<i>90</i>
<i>Photo II-41</i>	<i>Vue en surface de l'éprouvette du tissage type 71, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....</i>	<i>90</i>
<i>Photo II-42</i>	<i>Vue de l'épaisseur de l'éprouvette du tissage type 71, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....</i>	<i>91</i>
<i>Photo II-43</i>	<i>Vue en surface de l'éprouvette du tissage type 74, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne.....</i>	<i>92</i>
<i>Photo II-44</i>	<i>Vue de l'épaisseur de l'éprouvette du tissage type 74, sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....</i>	<i>92</i>
<i>Photo II-45</i>	<i>Vue en surface de l'éprouvette du tissage type 66, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....</i>	<i>93</i>
<i>Photo II-46</i>	<i>Vue dans l'épaisseur de l'éprouvette du tissage type 66, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....</i>	<i>93</i>
<i>Photo II-47</i>	<i>Vue en surface de l'éprouvette du tissage type 69, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....</i>	<i>94</i>
<i>Photo II-48</i>	<i>Vue dans l'épaisseur de l'éprouvette du tissage type 69, sous traction uniaxiale dans le sens trame .....</i>	<i>94</i>

## Liste des tableaux

Tableau II-1	Tableau récapitulatif des matériaux.....	60
Tableau II-2	Propriétés mécaniques expérimentales par traction sens chaîne de l'Interlock type H2 .....	96
Tableau II-3	Propriétés mécaniques expérimentales par traction sens trame de l'Interlock type H2 .....	97
Tableau II-4	Propriétés mécaniques expérimentales par traction sens chaîne pour l'Interlock de type 71 et 74 .....	98
Tableau II-5	Propriétés mécaniques expérimentales par traction sens trame pour l'Interlock de types 66, 69 et 71 .....	99
Tableau II-6	Résultats expérimentaux pour l'essai de compression chargé dans le plan XY.....	138
Tableau II-7	Résultats expérimentaux pour l'essai de compression chargé dans le plan XZ.....	140
Tableau II-8	Résultats expérimentaux pour l'essai de compression chargé dans le plan YZ.....	142
Tableau III-1	Réduction des rigidités des mèches sous tension uniaxiale .....	166
Tableau III-2	Propriétés géométriques du tissage orthogonal 3D (MEB).....	169
Tableau III-3	Propriétés 2D des mèches prédites analytiquement .....	173
Tableau III-4	Propriétés 3D du tissage orthogonal 3D.....	174
Tableau III-5	Etude comparative des propriétés 3D du tissage orthogonal 3D.....	175
Tableau III-6	Etude comparative du suivi des zones endommagées et des ruptures des mèches: traction sens y/compression sens z.....	176
Tableau III-7	Propriétés élastiques 3D de plusieurs pas de tissage prédit avec le modèle de CG .....	181
Tableau III-8	Propriétés géométriques du tisseur 1, Interlock type1- H2 (MEB) .....	183
Tableau III-9	Propriétés géométriques des types 2.....	187
Tableau III-10	Stratégie de modélisations géométriques de la structure des VER.....	188
Tableau III-11	Volumes et proportions des constituants des VER du Type1 .....	199
Tableau III-12	Volumes et proportions des constituants des VER du type2.....	204
Tableau III-13	Propriétés 2D des mèches prédites analytiquement .....	205
Tableau III-14	Propriétés 3D du tissage Interlock, type 1- H2 .....	206
Tableau III-15	Ecart sur la prédiction analytique du module élastique $E_x$ -H2 .....	206
Tableau III-16	Ecart sur la prédiction analytique du module élastique $E_y$ -H2.....	207
Tableau III-17	Propriétés ultimes, analytique/expérimentale de l'Interlock-H2 sollicité en traction uniaxial dans le sens chaîne et trame.....	211
Tableau III-18	Propriétés 3D du tissage Interlock, type 2- 71 .....	215
Tableau III-19	Propriétés ultimes, analytique/expérimentale du type 2-71.....	215
Tableau III-20	Propriétés 3D du tissage Interlock, type 2-66 .....	221

Tableau III-21 Propriétés ultimes, analytique/expérimentale du type 2-66.....	221
Tableau III-22 Propriétés 3D du tissage Interlock, type 2- 69 .....	223
Tableau III-23 Propriétés ultimes, analytique/expérimentale du type 2-69.....	224
Tableau IV-1 Propriétés des mèches - Torayca, SOFICAR (2004) .....	247
Tableau IV-2 Propriétés des résines, Hexcel.composite (2004).....	247
Tableau IV-3 Comparaison des dimensions des mèches entre optimisation/expérimentales pour l'orthogonal 3D (T300J-Tex 396/RTM6).....	255
Tableau IV-4 Comparaison des surfaces des mèches et des rapports dimensions/épaisseur, entre l'optimisation/ expérimentales pour l'orthogonal 3D avec la T300J-Tex 396/RTM6.....	255
Tableau IV-5 Comparaison des proportions volumiques des mèches, optimisation/ expérimentales de l'orthogonal 3D avec la T300J-Tex 396/RTM6 .....	255
Tableau IV-6 Comparaison des caractéristiques et des propriétés de tissage, optimisation/expérimental de l'orthogonal 3D avec la T300J-Tex 396/RTM6 .....	256
Tableau IV-7 Comparaison des propriétés élastiques mécaniques 3D, optimisation/expérimentales de l'orthogonal 3D avec la T300J-Tex 396/RTM6 .....	256
Tableau IV-8 Résultats de l'étude d'optimisation des dimensions des mèches avec de la résine RTM6 résistant sous une contrainte uniaxiale de 770 MPa .....	257
Tableau IV-9 Résultats de l'optimisation des dimensions des mèches avec la RTM120, résistant sous une contrainte uniaxiale de 770 MPa .....	258
Tableau IV-10 Caractéristiques et propriétés du tissage 3D orthogonal avec la RTM6, résistant à la contrainte uniaxiale de 770 MPa.....	258
Tableau IV-11 Caractéristiques et propriétés du tissage 3D orthogonal avec la RTM120, résistant à la contrainte uniaxiale de 770 MPa.....	258
Tableau IV-12 Les 9 modules de l'ingénieur prédits pour le tissage 3D orthogonal 3D avec la RTM6, résistant à la contrainte uniaxial de 770 MPa .....	259
Tableau IV-13 Les 9 modules de l'ingénieur prédits pour le tissage 3D orthogonal avec la RTM120, résistant à la contrainte uniaxial de 770 MPa.....	259
Tableau IV-14 Caractéristiques et propriétés du tissage solutions de l'étude d'optimisation avec contraintes sur les modules $G_{12}$ et $G_{13}$ , pour l'orthogonal 3D avec la RTM6, résistant à la contrainte uniaxial de 770 MPa .....	261
Tableau IV-15 Les 9 modules de l'ingénieur prédits pour les tissages orthogonal 3D avec contraintes sur les modules $G_{12}$ et $G_{13}$ , avec la RTM6, résistant à la contrainte uniaxial de 770 MPa .....	261
Tableau IV-16 Comparaison des proportions volumiques des mèches, optimisation/expérimentales pour l'interlock 2.5D type 1, avec la T300J-Tex 396/RTM6, pour $c_T=0.2\text{mm}$ , sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	267
Tableau IV-17 Comparaison des caractéristiques et des propriétés de tissage optimisation/expérimentales pour l'interlock 2.5D type 1, avec la T300J-Tex 396/RTM6, pour $c_T=0.2\text{mm}$ , sous traction uniaxiale dans le sens chaîne .....	267
Tableau IV-18 Comparaison des proportions volumiques des mèches, optimisation/expérimentales pour l'interlock 2.5D type 1, avec la T300J-Tex 396/RTM6, pour $c_T=0.2\text{mm}$ , sous traction uniaxiale dans le sens trame.....	268
Tableau IV-19 Comparaison des caractéristiques et des propriétés du tissage, optimisation/expérimentales pour l'interlock 2.5D type 1, avec la T300J-	

<i>Tex 396/RTM6, pour <math>c_T=0.2\text{mm}</math>, sous traction uniaxiale dans le sens trame</i>	268
<i>Tableau IV-20 Comparaison des proportions volumiques des mèches, optimisation/expérimentales pour l'interlock 2.5D type 1, avec la T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6, pour <math>c_T = 0.2\text{mm}</math>, tension biaxiale</i>	269
<i>Tableau IV-21 Comparaison des caractéristiques et des propriétés de tissage optimisation /modèle analytique pour l'interlock 2.5D type 1, avec la T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6, pour <math>c_T=0.2\text{mm}</math>, sous tension biaxiale</i>	270
<i>Tableau IV-22 Comparaison des propriétés élastique, optimisation /expérimentales de l'interlock type 1, pour <math>c_T = 0.2\text{mm}</math>, et T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6</i>	270
<i>Tableau IV-23 Variation de la distance <math>c_T</math>, sous tension biaxiale</i>	271
<i>Tableau IV-24 Variation des propriétés élastiques mécaniques 3D du tissage de l'interlock 2.5D type 1, fonction de la distance <math>c_T</math>, avec la T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6</i>	271
<i>Tableau IV-25 Caractéristiques et propriétés des tissages solutions de l'étude d'optimisation pour l'interlock 2.5D type 1, avec de la résine RTM6, sous une tension biaxiale</i>	272
<i>Tableau IV-26 Les 9 modules de l'ingénieur prédits pour les tissages solutions de l'étude d'optimisation pour l'interlock 2.5D type 1, avec de la résine RTM6, sous une tension biaxiale</i>	273
<i>Tableau IV-27 Caractéristiques et propriétés élastiques des tissages interlock 2.5D type 1, avec <math>c_T=0.2\text{mm}</math> et T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6, fonction de <math>n_e</math>, sous tension uniaxiale dans le sens chaîne.</i>	275
<i>Tableau IV-28 Caractéristiques et propriétés élastiques des tissages interlock 2.5D type 1, avec <math>c_T=0.2\text{mm}</math> et T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6, fonction de <math>n_e</math>, sous tension uniaxiale dans le sens trame.</i>	276
<i>Tableau IV-29 Caractéristiques et propriétés élastiques des tissages interlock 2.5D type 1, avec <math>c_T=0.2\text{mm}</math> et T300J-<i>Tex</i> 396/RTM6, fonction de <math>n_e</math>, sous tension biaxiale dans le sens trame.</i>	276
<i>Tableau A-1 Tableau numérique du comportement de l'interlock type H2 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne et le sens trame</i>	287
<i>Tableau A-2 Tableau récapitulatif du comportement de l'interlock type H2 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne et le sens trame</i>	288
<i>Tableau A-3 Tableau récapitulatif du comportement de l'interlock type 71 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne et le sens trame</i>	296
<i>Tableau A-4 Tableau numérique du comportement de l'interlock type 71 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne et le sens trame</i>	297
<i>Tableau A-5 Tableau numérique du comportement de l'interlock tisseur 2 entre les types 71 et 74 sous traction uniaxiale dans le sens chaîne</i>	302
<i>Tableau A-6 Tableau récapitulatif comparatif du comportement de l'interlock couche à couche, type 66 et 69 sous traction uniaxiale sens trame</i>	317
<i>Tableau C-1 Volumes et proportions des constituants des VER (CU) et (CG)</i>	322



## Introduction générale

L'évolution des techniques de tissage vers des tissus dits "techniques" a permis à cette industrie de proposer des renforts pour élaborer de nouveaux matériaux composites innovants.

Sous l'impulsion des industries de pointe, notamment aéronautique, une nouvelle génération de matériaux composites a vu le jour, utilisant des tissus à armure tridimensionnelle. L'introduction d'un renfort dans la troisième direction constitue une grande avancée dans le domaine des composites.

En effet la précédente génération (renfort 1D et 2D) souffre de carences des propriétés mécaniques dans cette troisième direction de l'espace ainsi que des problèmes liés aux contraintes inter-laminaires. Néanmoins, le challenge actuel est à la dimension de l'avancée.

La maîtrise de ces matériaux pour une utilisation viable économiquement nécessite la compréhension de leur comportement mécanique en vue d'une élaboration d'outils prévisionnels d'aide à la décision fiables et robustes. Or compte tenu de la complexité de préformes, la tâche apparaît très importante.

L'objectif de cette thèse est d'apporter une petite contribution dans l'exploration comportementale et la modélisation de cette nouvelle génération de matériaux. On se restreindra à deux familles architecturales: l'orthogonal 3D et les renforts interlocks.

La réalisation de ces concepts de matériaux nécessite:

- La connaissance des détails architecturaux internes des motifs de chaque type de tissage.
- La détermination des mécanismes d'endommagement de chaque type de tissage en fonction de la sollicitation.
- L'écriture d'un processus d'endommagement déduit des mécanismes, tout en tenant compte des paramètres géométriques et de tissage.

L'organisation de ce mémoire s'articule autour de quatre parties:

### ***La première partie***

Elle est consacrée, premièrement à une introduction aux composites tissés 3D, suivie de la présentation du contexte et des motivations de l'utilisation du tissage angle interlock 2.5D et de l'orthogonal 3D, vis-à-vis de leur comportement mécanique.

### ***La deuxième partie***

Elle est consacrée aux études expérimentales:

- Dans le premier chapitre, on présentera les différents types de tissage angle interlock 2.5D et orthogonal 3D mis à la disposition de cette étude. On présentera les caractéristiques détaillées de la géométrie interne propre à chaque type.

- Le second chapitre est consacré à fournir un éclairage sur la chronologie du processus de dégradation des différents tissages sous un chargement uniaxial. En premier lieu, on expose l'ensemble des résultats de la campagne d'essai de traction uniaxiale, réalisée sur les différents types d'interlock, accompagnée d'un suivi des signaux d'émission acoustique (EA). En second, une étude de corrélation d'image issue des observations microscopiques permet la mise en place d'un scénario de mécanismes d'endommagement jusqu'à la ruine. En troisième, une analyse conjointe de micrographie et d'EA permet de réaliser une étude comportementale et comparative entre les divers tissages. Elle tiendra en compte du comportement en sens chaîne et en sens trame pour en pouvoir mettre en relief l'effet de l'anisotropie et l'effet des proportions de fibres, sur le comportement global.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude du comportement de l'orthogonal 3D. Une campagne d'essai de compression simple est menée sur les trois facettes d'éprouvette en forme cubique, pour déterminer d'une part les propriétés dans le sens de l'épaisseur, et d'autre part pour la compréhension du comportement tridimensionnel anisotrope.

### ***La troisième partie***

Elle présente le coeur de la thèse. Elle est consacrée à la modélisation du comportement élastique endommageable des composites tissés 3D:

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique de modèles d'homogénéisation analytique d'échelle méso et macro conçus pour la prédiction des propriétés élastiques, suivi d'un bref aperçu des lois de comportement, les plus adaptées et les plus répandues pour le domaine des composites textiles.
- Le second chapitre est consacré à la présentation du modèle analytique d'homogénéisation pour la prédiction des propriétés 3D élastique, basé sur la somme moyenne des rigidités des constituants. Afin de maîtriser et de mettre au point la validité du modèle analytique d'homogénéisation, ce dernier a été appliqué sur le tissage orthogonal 3D, le plus simple comme architecture interne. On y met en évidence l'effet du choix de la modélisation géométrique des volumes élémentaires représentatifs (VER) sur les propriétés élastiques 3D. Un critère d'endommagement I, composé par la dualité du modèle analytique avec le critère de rupture 3D de Tsai-Wu appliqué sur les mèches, est mis en place pour prédire le comportement endommageable jusqu'à la rupture. Pour le cas de chargement en compression, une extension permettant d'éliminer les composantes négatives du tenseur de déformation des mèches est proposée pour accompagner le critère d'endommagement I. Sur les tissages interlock, on propose des extensions sur le critère d'endommagement I, donnant naissance au critère d'endommagement II, pour améliorer la prédiction de la contrainte de rupture en particulier pour les essais de traction uni axiaux dirigés dans le sens trame.

### ***La quatrième partie***

Elle finalise le manuscrit par une étude d'optimisation. Cette dernière est basée sur des concepts mathématiques, structurés en variables continues et résolus à l'aide des méthodes déterministes exactes. Le problème d'optimisation est formulé sur la base de la modélisation analytique, validée expérimentalement dans la troisième partie. Il permet avec sa formulation et avec la fonction objectif, sous des conditions d'égalité et d'inégalité de déterminer les propriétés du tissage tridimensionnel et les propriétés élastiques 3D. Deux applications de tissage seront analysées, une sur l'orthogonal 3D et une seconde sur l'angle interlock. Une validation des résultats de l'étude d'optimisation est recherchée à travers les résultats expérimentaux des tissages orthogonal 3D et Interlock 2.5D.

La fin de ce mémoire est consacrée à la conclusion générale de notre étude doctorale, avec un résumé sur les principaux résultats ainsi que les perspectives ouvertes, à la fois vers l'expérience et vers le développement du concept proposé, dans le cas des études d'endommagement sous certaines exigences.

