



Université de Lille1 – Sciences et Technologies

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

THESE

présentée pour obtenir le titre de

Docteur

en

Mécanique

Par

Ayham ALRUHBAN

Le 25 novembre 2013

« Contribution à l'analyse de la déformabilité de renforts tricotés »

Directeur de thèse : Guy CAIGNAERT

Co-encadrants : Mme Maryline ROCHERY, M. Stéphane GIRAUD, M. Xavier LEGRAND

Membres du jury

M. Damien SOULAT, Professeur, ENSAIT-Roubaix	Président
Mme Marie-Ange BUENO, Professeur, Université de Haute-Alsace	Rapporteur
M. Pierre OUAGNE, Maître de Conférences, HDR, Université d'Orléans	Rapporteur
M. Guy CAIGNAERT, Professeur émérite, ARTS et METIERS PARISTECH-Lille	Examineur
Mme Maryline ROCHERY, Maître de Conférences, ENSAIT-Roubaix	Invitée
M. Stéphane GIRAUD, Maître de Conférences, ENSAIT-Roubaix	Invité
M. Xavier LEGRAND, Maître de Conférences, ENSAIT-Roubaix	Invité

Table des matières

0.	Introduction générale.....	12
1.	CHAPITRE I : Paramétrage d'une structure tricotée	16
1.1	Introduction	16
1.2	Terminologie textile	18
1.3	Classification des fibres	20
1.3.1	Fibres naturelles	21
1.3.2	Fibres chimiques	22
1.3.3	Fibres spéciales	24
1.3.4	Fibres fonctionnalisées	25
1.4	Procédés de fabrication	26
1.4.1	Le procédé de filage	26
1.4.2	Le procédé de filature	28
1.4.3	Les procédés de transformation des fils et filés	29
1.5	Propriétés physiques et mécaniques	29
1.5.1	Les propriétés physiques	30
1.5.2	Les propriétés mécaniques	30
1.6	La préparation des filés avant le tricotage	34
1.7	Technologie de tricotage	35
1.7.1	Introduction	35
1.7.2	Le procédé du tricotage	36
1.7.3	Les paramètres principaux pendant le procédé de tricotage	38
1.7.4	Machines à tricoter	40
1.7.5	Les structures tricotées de base à maille cueillie	47
1.8	Analyse paramétrique des structures tricotées à maille cueillie	53
1.9	Conclusions du chapitre I	64
2.	CHAPITRE II : Comportement mécanique membranaire d'une structure tricotée	66
2.1	Introduction	66

2.2	Comportement mécanique membranaire dans un renfort sec	66
2.2.1	Comportement en traction.....	68
2.2.2	Comportement en cisaillement plan	81
2.3	Objectifs et contraintes de l'étude	89
2.4	Caractérisation membranaire d'une structure tricotée (côte 1 et 1)	91
2.4.1	Fils utilisés.....	91
2.4.2	Structure tricotée.....	92
2.4.3	Les éprouvettes	94
2.5	Démarches expérimentales	111
2.5.1	Banc de traction uni axiale	111
2.5.2	Méthode de mesure optique simplifiée	111
2.5.3	Procédures.....	118
2.6	Résultats et interprétations	118
2.6.1	La différence entre le comportement des colonnes et des rangées.....	119
2.6.2	L'influence de l'orientation sur le comportement mécanique.....	119
2.6.3	Le glissement local dans une structure tricotée – (45°).....	120
2.6.4	L'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique	122
2.6.5	Courbes de traction locale de Groupe (4).....	124
2.6.6	La déformation globale et locale	126
2.6.7	L'influence de l'orientation des colonnes sur l'effet du bord.....	128
2.6.8	Vérification de l'homogénéité des déformations locales – Groupe 4 (0°, 45°)	129
2.7	Conclusions & perspectives du chapitre II	131
3.	CHAPITRE III : La mise en forme d'une structure tricotée	133
3.1	Introduction	133
3.2	La mise en œuvre des matériaux composites	134
3.2.1	Le renfort textile pour matériau composite	134
3.2.2	Les procédés de mise en œuvre des composites	136
3.3	Mécanismes de déformation d'un renfort lors de la mise en forme.....	138
3.3.1	Cisaillement dans le plan	138
3.3.2	Tension	139

3.3.3	Flexion	140
3.3.4	Compaction	140
3.3.5	Analyse des modes de la déformation dans les renforts textile (tissé vs tricoté)	141
3.4	Démarches expérimentales	145
3.4.1	Introduction	145
3.4.2	Banc d'emboutissage développé	146
3.4.3	Préparations des éprouvettes	148
3.4.4	Méthode de mesure optique simplifiée	149
3.5	Résultats et interprétations	155
3.5.1	Analyse de l'avalement	156
3.5.2	Analyse des efforts d'emboutissage	161
3.6	Le lien entre la mise en forme et le comportement membranaire	164
3.7	Conclusions et perspectives du chapitre III	167
4.	CHAPITRE IV : Conclusions et perspectives générales	170
5.	Annexe A : Propagation des incertitudes	174
5.1	Introduction	174
5.2	Mesure	174
5.3	Les incertitudes des mesures	175
5.3.1	Les erreurs systématiques	175
5.3.2	Les erreurs accidentelles	175
5.3.3	La dispersion statistique	176
5.4	Incertitudes sur une mesure composée ; loi de propagation	178
6.	Bibliographie	179

Listes des figures

Figure 0-1: Classification des architectures textiles, (Miravete, 1999).....	14
Figure 1-1 : Matériaux textiles, procédés et produits, (Wilson 2001).....	17
Figure 1-2 : Fibre de Lin (Caramaro 2005).....	18
Figure 1-3 : a) Fil continu ; b) Fil discontinu, (Duhovic 2004).....	18
Figure 1-4 : Surfaces textiles de non-tissés, (Caramaro 2006).....	19
Figure 1-5 : Différents modes de tricotage, (Caramaro 2006)	20
Figure 1-6 : Fibres naturelles, (Baley 2005).....	22
Figure 1-7 : Fibres chimiques, (Wulfhorst et al. 2006)	23
Figure 1-8 : Fils hybrides, (Duhovic 2004).....	25
Figure 1-9 : l'influence de procédé de filage (voie sèche) sur les propriétés du fil, (McIntyre 2005).....	26
Figure 1-10 : Le procédé d'extrusion par voie fondue, (Wulfhorst et al. 2006).....	27
Figure 1-11 : Voie sèche, (McIntyre 2005)	27
Figure 1-12 : Voie humide, (McIntyre 2005).....	28
Figure 1-13 : L'opération de cardage, (Wulfhorst et al. 2006)	28
Figure 1-14 : Les propriétés de fibres en traction (contrainte spécifique - déformation), (McIntyre 2005)	31
Figure 1-15 : Phénomène de fibrillation pour la fibre para-aramide, (Caramaro 2005).....	33
Figure 1-16 : Comparaison de certaines propriétés de matériaux composites aux renforts textiles, (Padaki et al. 2006).....	36
Figure 1-17 : Technologie de tricotage, (Leong et al. 2000).....	37
Figure 1-18 : Boucles de type : a) Charge ; b) Flotté, (Leong et al. 2000).....	38
Figure 1-19 : Tension du fil dans la zone de tricotage, (Innovation Centre 2009).....	39
Figure 1-20 : Le phénomène de "robbing back", (Ray 2012)	40
Figure 1-21 : Une machine rectiligne, (Stoll 2012).....	42
Figure 1-22 : La disposition des aiguilles sur la fonture, (Innovation Centre 2009).....	42
Figure 1-23 : La mécanisme des cames, (Innovation Centre 2009)	43
Figure 1-24 : Coupe transversale d'une machine à tricoter rectiligne, (Ray 2012).....	43
Figure 1-25 : Un métier circulaire, (Hunter 2009)	44
Figure 1-26 : Machine circulaire : a) aiguilles de cylindre ; b) aiguilles de plateau, (Leong et al. 2000)..	44
Figure 1-27 : Une machine tricot, (Karl Mayer 2010)	45
Figure 1-28 : Une machine Raschel, (Hunter 2008).....	46
Figure 1-29 : Machine Raschel, (Hunter 2008).....	47
Figure 1-30 : Notation graphique des structures de base à maille cueillie, (Ray 2012)	48
Figure 1-31 : Notation schématique des structures de base à maille cueillie, (Ray 2012)	48
Figure 1-32 : Formation d'une maille, (Innovation Centre 2009)	49
Figure 1-33 : Zones de contact dans une boucle, (Innovation Centre 2009).....	49
Figure 1-34 : L'avant et l'envers d'une boucle, (Innovation Centre 2009).....	50
Figure 1-35 : Jersey, (Innovation Centre 2009).....	51

Figure 1-36 : Côte(1 et 1), (Innovation Centre 2009)	51
Figure 1-37 : Mailles retournées, (Innovation Centre 2009)	52
Figure 1-38 : Interlock, (Innovation Centre 2009)	52
Figure 1-39 : L'effet de curling d'une structure tricotée, (Bueno 2008)	54
Figure 1-40 : Technologie de platine, (Innovation Centre 2009)	57
Figure 1-41 : Deux facteurs de couverture pour une structure de type jersey : a) K=15 ; b) K=10, (Bueno 2008).....	59
Figure 1-42: représentation schématique des structure tricotées de base à maille cueillie (a) Jersey, (b) (côte 1 et 1), (c) côte (2*2), (d) Interlock (1*1), (e) Côte perlée, (f) Swiss piqué, (g) French piqué et (h) Punto-di-Roma, (Bueno 2008)	63
Figure 2-1: Les principales étapes du procédé RTM, (Boisse 2004)	67
Figure 2-2: Aspect multi échelle de la structure tricotée.....	68
Figure 2-3 : Courbe de traction uniaxiale d'une structure tricotée, (de Araújo et al. 2003)	69
Figure 2-4 : Comportement général d'un tricot sec sur traction uniaxiale, (Balea 2011)	71
Figure 2-5 : Traction dans la direction colonne et rangée, (Balea 2011)	72
Figure 2-6 : La phase transitoire : point de la déformation critique, (Balea 2011)	72
Figure 2-7 : La phase (4): une déformation physique du matériau, (Balea 2011).....	73
Figure 2-8 : Zones de rupture d'une structure tricotée simple, (Balea 2011)	73
Figure 2-9 : Conception une structure tricotée pour des propriétés particulières, (de Araújo et al. 2003)..	74
Figure 2-10 : Traction uniaxiale (tissu VS tricot), (Balea 2011).....	75
Figure 2-11 : a) Machine de traction biaxiale; b) Eprouvette, (Lomov et al. 2008).....	76
Figure 2-12 : Courbes de traction biaxiale d'une structure tissée, (Buet-Gautier & Boisse 2001).....	77
Figure 2-13 : a) Machine de traction biaxiale ; b) Eprouvette, (Luo & Verpoest 2002).....	78
Figure 2-14- Courbe de traction biaxiale (Force membranaire - Déformation logarithmique), (Luo & Verpoest 2002)	79
Figure 2-15- Courbes de la déformation sous charge maximale, (Luo & Verpoest 2002)	80
Figure 2-16: Test de bias : (a) le dispositif, (b) éprouvette rectangulaire initiale avec des fils orientés à $\pm 45^\circ$, (c) l'éprouvette déformée, (d) la courbe de charge de cisaillement. Les angles calculés à partir de l'analyse mésoscopique, (Lomov et al. 2008)	82
Figure 2-17: Mécanisme de cisaillement d'un interlock de carbone, (Dridi 2010).....	83
Figure 2-18: Deux types d'éprouvettes sur « Picture Frame »: (a) large échantillon, (b) petit échantillon, (c) dispositif de la position des fils dans le cas (b), (Lomov et al. 2008)	84
Figure 2-19: Exemple des dispositifs de « picture frame », (Dridi 2010).....	85
Figure 2-20: Deux différents cadres, (Dridi 2010)	85
Figure 2-21: Définition de F_{sh} , (Dridi 2010)	86
Figure 2-22: Courbe de comportement en cisaillement d'un renfort tissé de fibre de verre, avec des prise de vue mésoscopique, (Dumont 2003).....	87
Figure 2-23: L'orientation de la structure tricotée a) Force appliquée à 45° avec la colonne et la rangée, b) Force appliquée est parallèle à la colonne et la rangée, (Duhovic 2004)	88
Figure 2-24: Comparaison entre les orientations de renfort (a) et (b), (Duhovic 2004).....	89

Figure 2-25: Courbes de traction uniaxiale des fils utilisés.....	91
Figure 2-26: Diagramme technique du tricot (côte 1 et 1)	92
Figure 2-27: Caractéristiques géométriques d'une maille.....	94
Figure 2-28: Orientation d'une structure tricotée.....	95
Figure 2-29 : Quadrillage sur l'éprouvette étudié.....	95
Figure 2-30 : Un schéma de l'éprouvette aux différents angles (L/W=1,5)	97
Figure 2-31 : Un schéma de l'éprouvette aux différents angles (L/W=1)	98
Figure 2-32 : Un schéma de l'éprouvette aux différents angles (L/W=0,5)	98
Figure 2-33 : L'orientation des colonnes de boucles à (30°) aux différents rapports (L/W=0.5, 1, 1.5) ...	99
Figure 2-34 : L'orientation des colonnes de boucles à (45°) aux différents rapports (L/W=0.5, 1, 1.5) .	100
Figure 2-35 : L'orientation des colonnes de boucles à (60°) aux différents rapports (L/W=0.5, 1, 1.5).	101
Figure 2-36 : Une éprouvette surjetée	102
Figure 2-37: (a) jauge 7, (b) jauge 13.....	103
Figure 2-38 : Analyse de Force dans la zone principale.....	105
Figure 2-39: La déformation de la zone principale bloquée (30°)	106
Figure 2-40- analyse des forces lors que les deux bandes sont bloquées	106
Figure 2-41: Une bande de colonnes bloquées et une bande de rangées libres.....	107
Figure 2-42: Une bande de colonnes bloquées et une bande de rangées bloquées.....	108
Figure 2-43: Une bande de colonnes libres et une bande de rangées bloquées.....	109
Figure 2-44: Une bande de colonnes libres et une bande de rangées libres	110
Figure 2-45: a) L'aspect 3D du tricot ; b) Vue latérale du tricot, (Duhovic 2004; Innovation Centre 2009)	112
Figure 2-46: Le quadrillage sur la zone d'intérêt.....	113
Figure 2-47: Les coordonnées d'un point dans une image, (Sciammarella et al. 2012)	114
Figure 2-48: L'image traitée	114
Figure 2-49: L'installation de l'éprouvette sur le banc de traction uniaxiale	115
Figure 2-50: Le schéma du quadrillage avant et après la déformation.....	116
Figure 2-51: La différence entre le comportement des colonnes et des rangées	119
Figure 2-52: L'influence de l'orientation sur le comportement mécanique	120
Figure 2-53: Le glissement local dans une structure tricotée – (45°).....	121
Figure 2-54: L'effet du bord dans la direction (0°).....	123
Figure 2-55: L'effet du bord dans la direction (30°).....	123
Figure 2-56: L'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique	124
Figure 2-57: Courbes de traction locale de Groupe (4).....	125
Figure 2-58: Les courbes de la déformation globale et locale.....	127
Figure 2-59: La rupture d'une éprouvette dans la direction (0°)	128
Figure 2-60: Le rétrécissement de la structure tricotée en fonction de l'orientation	129
Figure 2-61: Le début de la rupture sur la ligne de séparation entre la bande des colonnes bloquées et la zone secondaire dans éprouvette à (30°) du groupe (4)	129
Figure 2-62: Vérification de l'homogénéité des déformations locales – Groupe 4 (0°)	130

Figure 2-63: Vérification de l'homogénéité des déformations locales – Groupe 4 (45°)	131
Figure 3-1: Principaux types d'architectures textiles de renfort, (Nemoz 2003)	134
Figure 3-2: Renfort à armure toile fibre de verre, (Najjar 2012).....	135
Figure 3-3: Aspect multi échelle de la structure tricotée.....	135
Figure 3-4: Les principales étapes du procédé RTM, (Boisse 2004)	137
Figure 3-5: Simulation des mèches soumises au cisaillement, (Durville 2009).....	138
Figure 3-6: Mécanisme de déformation en cisaillement au niveau local, (Najjar 2012) a) $\gamma=90^\circ-\Theta=0$, b) $\gamma=90^\circ-\Theta>0$, c) $\gamma=90^\circ-\Theta=\gamma_{\text{blocage}}$, d) $\gamma=90^\circ-\Theta>\gamma_{\text{blocage}}$	139
Figure 3-7: Manifestation des mèches soumises à la tension uniaxiale, (Charmetant et al. 2010)	140
Figure 3-8: Les modes des déformation à l'échelle macro dans la structure textile, (Duhovic & Bhattacharyya 2006).....	141
Figure 3-9: Les zones de croisement entre les fils dans la structure tricotée, (Innovation Centre, 2009). 142	
Figure 3-10: Les modes des déformations à l'échelle micro dans la structure textile, (Duhovic & Bhattacharyya 2006).....	143
Figure 3-11: Les courbes (déplacement de force) des structures tissée et tricotée. * Notez que les ordres de grandeurs dans certaines régions et l'échelle des deux courbes ont été modifiés pour le but d'explication. (Duhovic & Bhattacharyya 2006)	144
Figure 3-12: Machine d'emboutissage réalisée, (Najjar, 2012)	147
Figure 3-13: Préformage hémisphérique d'une structure tricotée.....	148
Figure 3-14: Les renforts utilisés dans l'essai d'emboutissage	148
Figure 3-15: Mesure de l'angle de cisaillement sur un quart de préforme (a) numérique (b) expérimentale, (Najjar, 2012)	149
Figure 3-16: Le renfort avant et après l'emboutissage.....	151
Figure 3-17: La mise en forme du renfort au cours du procédé d'emboutissage	152
Figure 3-18: Coordonnées sphériques, (Weisstein 2013).....	153
Figure 3-19: Evolution de la déformation entre deux points sur une surface sphérique	154
Figure 3-20: Schéma du dispositif d'essai d'emboutissage.....	155
Figure 3-21: La fin du procédé d'emboutissage dans les directions (a) 0° et (b) $\pm 45^\circ$	157
Figure 3-22: Avalement d'une préforme tissée hémisphérique (a) orientation 0°-90° (b) $\pm 45^\circ$, (Najjar, 2012)	157
Figure 3-23: a) Comportement mécanique d'un renfort tissé très déséquilibré. b) Avalement lors de sa mise en forme sur poinçon hémisphérique, (Zouari et al., 2006)	158
Figure 3-24: Le calcul des deux zones d'avalement par ImageJ	158
Figure 3-25: Schéma de l'éprouvette lors du procédé d'emboutissage dans la direction (0°/90°).....	160
Figure 3-26: Schéma de l'éprouvette lors du procédé d'emboutissage dans la direction (45°/-45°)	161
Figure 3-27: Les courbes d'emboutissage (Force – déformation locale) dans la direction (0°/90°).....	162
Figure 3-28: Les courbes d'emboutissage (Force – déformation locale) dans la direction (45°/-45°).....	163
Figure 3-29: Effort d'emboutissage/course du poinçon pour un renfort tissé de carbone, (Najjar, 2012) 164	
Figure 3-30: Le lien entre le comportement membranaire et la mise en forme de la structure tricotée (0° vs 90°).....	166

Figure 3-31: Le lien entre le comportement membranaire et la mise en forme de la structure tricotée (45°) 167

Figure 5-1: Distribution de Gauss, (Hughes, 2010; Taylor et al., 1999) 176

Listes de tableaux

Tableau 0-1 : Poids relatifs des applications composites et attentes performances/coût/cadences, (Nodal Consultants, 2001).....	12
Tableau 1-1 : Codes BISFA (Bureau International de Standardisation des Fibres Artificielles) des principales familles de fibres artificielles et synthétiques, (Caramaro 2005).....	21
Tableau 1-2 : le comportement mécanique en traction de différentes fibres techniques, (Caramaro 2005)	32
Tableau 1-3 : Propriétés mécaniques en compression, (Caramaro 2005)	33
Tableau 1-4 : Modules de cisaillement, (Caramaro 2005)	33
Tableau 1-5 : Résistance au noeud et à la boucle, (Caramaro 2005).....	34
Tableau 1-6: Valeurs des K_c et K_w pour certaines structures tricotées à maille cueillie après la relaxation complète (les valeurs correspondent au nombre des colonnes et rangées par cm). Ces valeurs sont expérimentales et numériques. Le rapport entre l'épaisseur de la structure tricotée et le diamètre du fil t/d , (JJF & W 1971; Postle et al. 1988b; ITF-Maille 1976; Knapton et al. 1968b; Postle et al. 1988a).....	62
Tableau 1-7: Les valeurs de K_c et K_w pour certaines structures tricotées complexes à maille cueillie après la relaxation complète et pour différents rapports de run-in, (Knapton 1974).....	62
<i>Tableau 1-8: Les paramètres du fil utilisé dans notre étude expérimentale</i>	<i>65</i>
Tableau 1-9: Les paramètres de la structure tricotée utilisée dans notre étude expérimentale.....	65
Tableau 2-1- Les valeurs de $1/\psi^3$ aux différents taux de déplacement pour deux structures tricotées (côte 1 et 1) et Milano, (Luo & Verpoest 2002).....	80
Tableau 2-2: Les caractéristiques de fils utilisés.....	92
Tableau 2-3: Caractéristiques dimensionnelles de la structure tricotée étudiée	93
Tableau 2-4: Les groupes des éprouvettes testées dans notre étude.....	103
Tableau 2-5: Les informations extraites du quadrillage au cours de la traction.....	117
Tableau 2-6: Les dimensions du quadrillage pour chaque groupe	117
Tableau 2-7: Le nombre des photos prises et le déplacement entre deux photos successives au cours de test de traction.....	118
Tableau 2-8: La rigidité spécifique et la déformation globale critique des éprouvettes dans la direction (0°) en fonction des paramètres de la longueur, du bord et la jauge de la machine.	124
Tableau 2-9: La rigidité spécifique, la déformation locale critique et le nombre des colonnes et rangées bloquées des éprouvettes du groupe (4) en fonction de l'orientation (0° , 30° , 45° , 60° , 90°)	126
Tableau 2-10: Les valeurs de la rigidité spécifique et de la déformation critique des éprouvettes du groupe (4) dans l'orientation (0°) au niveau globale et locale	127
Tableau 3-1: Les coordonnées cartésiennes (x , y , z) et sphériques (r , Θ , ϕ) lorsqu'elles sont définies par rapport au même repère cartésien (O , x , y , z) suivent les lois de transformations, (Weisstein 2013).....	153
Tableau 5-1 : Les incertitudes des cellules dans les bancs de traction uni axiale et d'emboutissage.....	175

Remerciement

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire GEMTEX de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT).

En entamant mes études doctorales je doutais de ma capacité à relever le défi, je craignais de stagner sans pouvoir avancer. Mais cette phase est maintenant terminée et je ressors grandit de cette expérience à la fois humaine et professionnelle. Au terme de ce travail, je souhaite adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et ont permis par leur soutien et leurs conseils, de le mener à bien.

Je tiens tout d'abord à remercier cordialement Madame le Professeur Marie-Ange BUENO et Monsieur le Docteur Pierre OUAGNE. Je vous remercie sincèrement de l'intérêt que vous avez bien voulu porter à ce travail de thèse en acceptant d'en être rapporteurs.

Je tiens aussi à remercier Monsieur le Professeur Damien SOULAT de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de ma soutenance de thèse. Je vous remercie de l'intérêt que vous avez porté à ce travail depuis votre arrivée à l'ENSAIT.

Je tiens sincèrement à remercier mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur Guy CAIGNAERT, qui m'a dirigé durant ce travail. Je vous suis reconnaissant pour votre encouragement et pour la confiance que vous m'avez accordée pendant ces années de thèse.

Je tiens ensuite à souligner toute ma gratitude envers Messieurs les Professeurs Guy CAIGNAERT et Damien SOULAT (chef d'équipe MTC « Mechanics, Textile, Composites ») pour leur aide. La force de ce binôme vient des personnalités et des compétences très différentes de ses membres, ce qui m'a donné deux appuis solides car ne reposant pas sur la même base. Leurs conseils et suivi furent toujours pertinents, et ponctués de discussions en tout genre, tout en ayant le bon goût de me laisser jouir d'une autonomie faisant de ce travail ma propre thèse, ce qui est véritablement essentiel.

Je tiens sincèrement à remercier, Madame le Docteur Maryline ROCHERY, et Messieurs les Docteurs Stéphane GIRAUD et Xavier LEGRAND, de m'avoir accueilli au sein de GEMTEX au début de mon travail de thèse. Je vous remercie tous pour l'aide et le soutien que vous m'avez apportés, aussi bien au niveau professionnel que personnel.

Je tiens enfin à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné lors de ces années de thèse. Les échanges avec les doctorants et Post doctorants de différentes nationalités ont été pour moi d'une très grande richesse et m'ont permis de découvrir d'autres horizons. Je leur souhaite à tous de continuer à aller au bout de leur ambition, et d'avoir plein de réussite dans leur vie professionnelle et personnelle.

Contribution à l'analyse de la déformabilité de renforts tricotés

Résumé : Lors des procédés de fabrication des matériaux composites de type «RTM» (Resin Transfer Moulding) des résines sont injectées au travers du renfort préalablement mis en forme. La maîtrise de la mise en forme du renfort sec dans le moule est essentielle pour la maîtrise des défauts. De nombreuses études couvrent des domaines très larges associés à cette étape pour les renforts tissés, autant peu de travaux ont porté sur la déformabilité des renforts tricotés lors de cette phase de préformage, malgré leur grande extensibilité et leur potentialité en tant que renforts de matériaux composites. Le comportement macroscopique des textiles techniques est essentiellement dû à un effet de structure. Dans le cadre de ces travaux sont détaillés l'élaboration et la conception de renforts tricotés afin de bien comprendre les paramètres spécifiques à ces structures textiles. Puis une étude expérimentale du comportement mécanique est conduite en traction uni axiale. Au travers de l'utilisation de méthodes de mesure des déformations sans contact l'analyse du comportement dans le sens colonnes et rangées est menée. Associé à la détermination du comportement, des essais de préformage de renforts secs tricotés sont réalisés sur un banc spécifique. L'analyse des résultats en termes d'avalement, d'efforts d'emboutissages et des déformations dans le fil montre la spécificité de la déformabilité de ces structures, comparativement aux renforts tissés. En vue de qualifier la faisabilité de cette étape de mise en forme de ces renforts tricotés, une corrélation entre le comportement en traction et le comportement lors du procédé est proposée.

Mots clés : renforts textiles, matériaux composites, Resin Transfer Moulding « RTM », mise en forme, emboutissage, analyse de la déformabilité, structures tricotée.

Contribution to the analysis of the deformability of knitted reinforcements

Abstract: During the manufacturing process of composite materials, such as «RTM» (Resin Transfer Moulding); resin is injected through the preformed reinforcement. The mastery of dry reinforcement layout in the mold is essential for defects control. Many studies cover wide areas related to this step for woven reinforcements, while few studies have focused on the deformability of knitted reinforcements at forming stage in spite of their significant extensibility and their potential as reinforcements of composite materials. The macroscopic behavior of the technical textiles is mainly due to their structural effect. In this research, the development and detailed design of knitted reinforcements in order to understand the specific parameters as textile structures are carried out. An experimental study of the uniaxial tensile mechanical behavior is conducted. The mechanical behavior of knitted structures in different orientations is analyzed by using contactless deformation measurements. In association with the characterization of in-plan behavior, forming tests of dry knitted reinforcements are performed on a special rig. Analysis of the results in terms of shortening, forming forces and local deformations shows the specificity of the deformability of these structures compared with woven reinforcements. To describe the formability of the knitted reinforcements, a correlation between the tensile and forming behavior is given.

Keywords: textile reinforcements, composite materials, Resin Transfer Moulding « RTM », forming, stamping, deformability analysis, knitted structures.

0. Introduction générale

Les matériaux composites à renforts fibreux font partie d'une classe de matériaux relativement nouvelle qui offre des propriétés attractives pour les domaines de pointes que sont les industries automobile, navale, aéronautique et aérospatiale. Principalement, le rapport résistance/masse élevé permet l'allègement des structures et par conséquent la réduction de la consommation en hydrocarbures (Berthelot, 1999; Gay, 2005). Il a fallu attendre le début des années 1970 pour voir apparaître les premiers matériaux composites à renforts fibreux utilisés comme pièces structurelles dans le domaine des transports. Depuis ces trente dernières années l'intégration des composites dans le milieu industriel connaît une forte croissance et ce pour l'ensemble de leurs propriétés. C'est un marché en pleine expansion, de l'ordre moyen de 8 % en volume, selon une étude JEC de 2010 (JEC Group, 2010), et qui s'impose de plus en plus dans le secteur industriel notamment le domaine des transports.

La répartition des composites par secteur d'utilisation n'est pas la même. Le Tableau (0-1) résume la répartition en volume des matériaux composites en général dans les différents secteurs d'applications mais également le niveau d'attente en termes de performances, de coûts de procédé et de rendement pièce.

Tableau 0-1 : Poids relatifs des applications composites et attentes performances/coût/cadences, (Nodal Consultants, 2001)

Applications	France	Europe	Monde	Performances attendues	Economie du procédé	Cadences (pièces/jour)
Automobile	36%	36%	25%	Moyennes	Essentielle	+500
Aéronautique	4%	1%	3%	Très hautes	Non prioritaire	1-10
Ferroviaire	2%	2%	1%	Hautes	Importante	10-50
Construction nautique	5%	4%	6%	Moyennes	Appréciée	1-10
Construction civile	20%	33%	30%	Moyennes	Appréciée	50-500
Construction industrielle	8%	10%	10%	Hautes	Appréciée	10-50
Electricité électronique	15%	8%	15%	Hautes	Essentielle	+500
Sports et Loisirs	8%	8%	8%	Très hautes	Importante	+500
Matériel médical	1%	1%	1%	Très hautes	Non prioritaires	50-500
Divers	1%	1%	1%	-	-	-

Aujourd'hui, les technologies de fabrication des composites à base de renforts à fibres continues font principalement appel à des méthodes manuelles, ou automatisées, de dépose de plis préimprégnés de résine. Les pièces sont ensuite solidifiées par polymérisation de la résine dans un autoclave. Ce type de méthodes permet d'obtenir un composite aux propriétés mécaniques dans le plan très intéressantes, mais au coût de fabrication élevé lorsqu'on atteint un grand nombre de pièces. Le développement de méthodes de faible coût pour la fabrication en série de pièces de composites à la géométrie complexe et aux propriétés mécaniques élevées est donc d'un grand intérêt. Par ailleurs afin de palier à la diffusion de COV, des procédés en moule fermé sont préconisés. Les procédés type «RTM», Resin Transfer Moulding, (Bickerton et al. 1997; Boisse 2004; Kalpakjian & Schmid 2013; Potter 1999) allient l'utilisation de renforts secs, mis en forme dans un moule, et de résines, généralement thermodurcissables, injectée au travers du renfort. Ces procédés s'avèrent compétitifs puisqu'ils permettent d'obtenir des produits finaux de moindre coût, avec une production en grande quantité et une automatisation du processus. Dans le cadre des procédés de type «RTM», la maîtrise de la mise en forme du renfort dans le moule est d'une grande importance. En effet, des caractéristiques importantes telles que l'angle de cisaillement ou la compaction du renfort sont déterminées lors de cette phase du processus. Il en découle des données importantes telles que la possibilité d'apparition de défauts ou la perméabilité du renfort déformé. Cet ensemble de paramètres doit être contrôlé, optimisé.

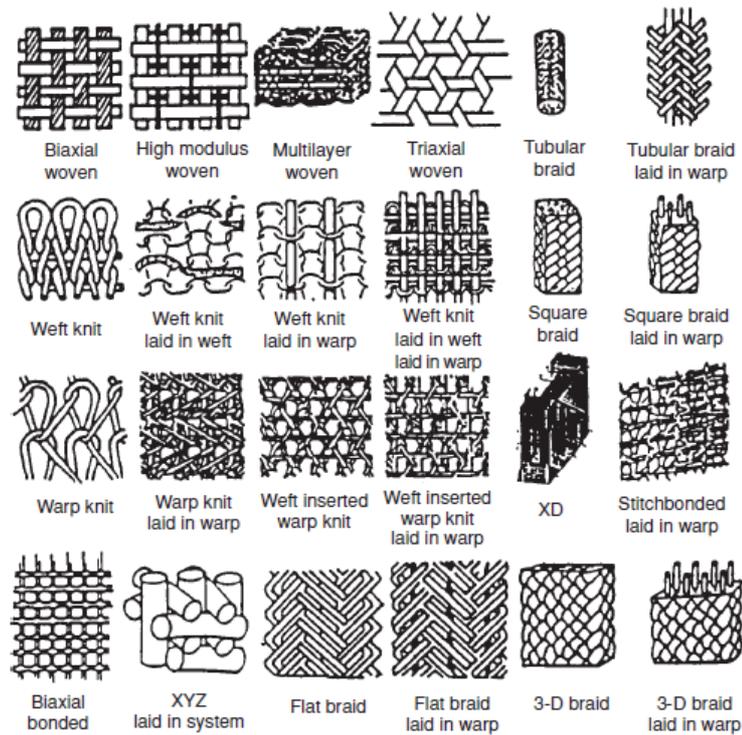


Figure 0-1: Classification des architectures textiles, (Miravete, 1999)

Concernant, cette étape de mise en forme des renforts secs, de nombreuses études concernent principalement les renforts tissés, classiques au sens bidimensionnels mais plus complexes tels que les Interlock ou les NCF (Non-Crimp-Fabrics), (Bel, 2011; Charmetant, 2011; de Bilbao, 2008; De Luycker, 2009; Duong, 2008; Hamila, 2007; Najjar, 2012). Notons qu'à ces études s'ajoutent celles concernant les renforts pré imprégnés et thermoplastiques (Haanappel, 2013; Haanappel et Akkerman, 2013; Wang et al., 2013) pour lesquels cette étape du procédé se déroule à chaud. Ces études couvrent des aspects très larges allant de l'analyse de la déformabilité des renforts secs lors du procédé, à la caractérisation expérimentale du comportement de ces renforts secs, mais également comme alternative aux longues campagnes d'essais, le développement d'outils de simulation numérique, du procédé, basés sur des modèles de comportement plus ou moins détaillés.

Or il existe de nombreux types de renforts à fibres continues. La Figure (0-1) est un exemple de classification, en termes de structures textiles, qui s'appuie sur les motifs associés aux différentes technologies et les répertorie en termes de dimension, d'orientation et d'entrelacement (Risicato, 2012). Le comportement macroscopique des textiles techniques est essentiellement dû à

un effet de structure. Une maille élémentaire de renforts tissés 2D lors de la mise en forme peut être considérée comme une membrane très peu extensible dans les directions des mèches mais très facilement cisailable (effet du treillis). Dans le cas des tricots, la même démarche peut être adoptée sauf qu'elle se distingue, d'une part, par une très grande déformabilité dans les directions colonnes et rangées et, d'autre part, par un comportement en tension différent dans le sens rangée et le sens colonne. Ces propriétés sont propres à l'architecture textile qui diffère dans le cas d'un tricot par rapport à un tissu et, plus spécifiquement, par la structure spécifique de la maille qui confère une réserve de fil différente d'une direction à l'autre. (Hagège, 2004; Ramakrishna, 1997; Savci et al., 2000).

Ces propriétés spécifiques de grandes extensibilités, confèrent aux structures tricotées de bonnes propriétés de drapabilité (Luo and Verpoest, 2002), et spécifiquement lors de cette étape de préformage du procédé RTM. C'est la raison pour laquelle ces travaux sont dédiés à l'analyse des structures tricotées en vue de leur intégration comme renforts de composites.

Ce manuscrit de thèse est subdivisé en trois chapitres principaux.

Le chapitre 1 intitulé « paramétrage d'une structure tricotée » est dédié à la conception au sens large des structures tricotées. Ce chapitre permet d'introduire la terminologie, propre aux textiles techniques et spécifiquement au procédé de tricotage, de la fibre par leur origine jusqu'aux structures tricotées. Les différentes machines de tricotage sont également présentées par leurs paramètres influant sur les caractéristiques des structures tricotées. Ce chapitre se termine par la présentation des mailles élaborées et supports de cette étude expérimentale.

Le second chapitre est dédié au comportement mécanique de structures tricotées. Sur la base des échantillons élaborés et décrits lors du chapitre précédent, l'objectif de ce second chapitre est, d'une part, de répertorier, en comparaison avec les nombreuses études menées sur les renforts tissés, les différents mécanismes de déformation et, d'autre part, de mener des campagnes expérimentales de caractérisation du comportement mécanique. Parmi les mécanismes de déformations cette étude se focalise sur le comportement membranaire mis en jeu principalement lors des étapes de préformage.

Le troisième et dernier chapitre est consacré à l'analyse expérimentale du préformage des échantillons tricotés. L'analyse des déformations lors de cette étape du procédé est corrélée avec le comportement membranaire identifié durant le second chapitre.

1. CHAPITRE I : Paramétrage d'une structure tricotée

1.1 Introduction

Avoir une vue globale de la hiérarchie textile nous aide à comprendre l'origine des variations du comportement mécanique de la structure textile. La Figure (1-1) illustre l'aspect multi-échelle des matériaux textiles utilisés comme renforts. A chaque échelle (fibre, fil et préforme textile) différentes variables entrent en compte et la modification d'une de celles-ci entraîne une variation du comportement mécanique de la structure finale.

L'objectif de notre étude, est de caractériser le comportement mécanique de structures tricotées, cela nécessite d'en analyser les constituants, les procédés d'élaboration (avec les paramètres associés) de la structure tricotée, qui influent sur son comportement. Dans ce premier chapitre, nous détaillerons les paramètres principaux mis en jeu aux différentes échelles (fil, machine à tricoter et structure finie) puis établirons les bases nécessaires à notre étude. Ce premier chapitre permettra également d'introduire la terminologie utilisée pour décrire les matériaux textiles (à partir de la fibre jusqu'à la structure finale). Ainsi dans un premier temps nous présenterons la classification des fibres selon leurs origines ainsi que leurs procédés de fabrication puis nous terminerons par les propriétés physiques et mécaniques des fibres. Avec cette vue globale, nous montrerons les différents paramètres qui influencent le comportement à l'échelle du fil. Dans un second temps nous aborderons la préparation et la tricotabilité d'un fil, de la phase préparatoire des fils afin de faciliter le processus de tricotage, jusqu'à la notion de tricotabilité d'un fil qui détermine la faisabilité d'une structure tricotée selon les paramètres donnés. En suivant l'ordre logique de ce parcours, nous préciserons les termes associés au procédé de tricotage, le principe de formation d'une maille, les types de mailles (cueillies et jetées), les différentes machines, ainsi que les paramètres d'une structure tricotée. Nous concluons ce chapitre par les paramètres concernant le fil utilisé (Acrylique), la machine à tricoter (rectiligne) et la structure tricotée (côte 1 et 1), (cf. NF G00-029 et/ou G07-130), qui permettent la compréhension du comportement mécanique de la structure tricotée étudiée.

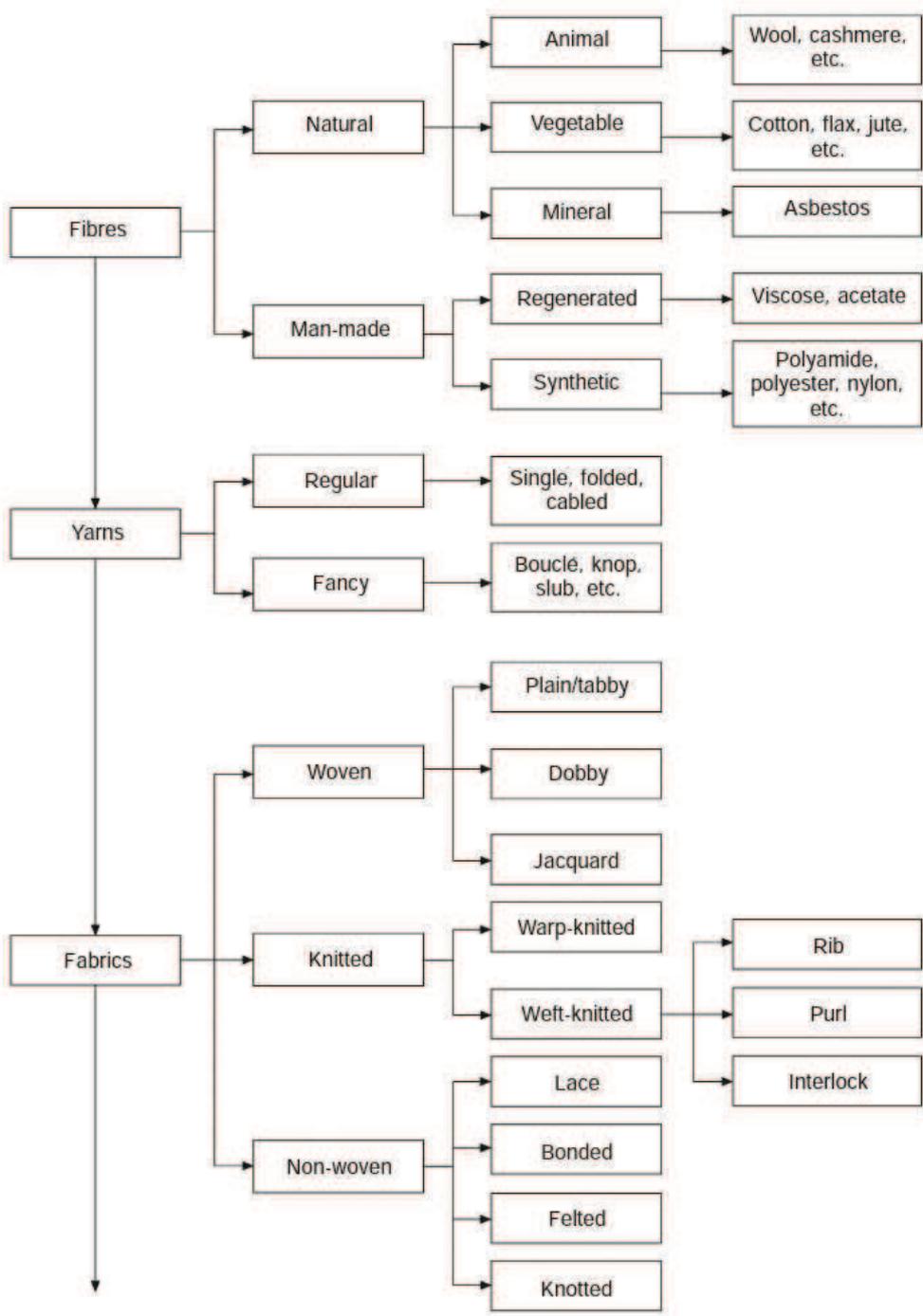


Figure 1-1 : Matériaux textiles, procédés et produits, (Wilson 2001)

1.2 Terminologie textile

Une vue multi-échelles de la structure textile exige une définition des éléments textiles selon leur ordre hiérarchique (la fibre, le fil et la structure textile). Avant d'examiner les différents types de fibres présentes dans les renforts textiles des pièces composites ou dans d'autres produits à base de textiles techniques, on présente les termes de base utilisés pour la technologie de fibre (Caramaro, 2005).

- 1- **Fibre** : un terme général pour désigner une matière de longueur l et de diamètre d . Pour les fibres courtes le ratio l/d est supérieur à 100, Figure 1-21-2).

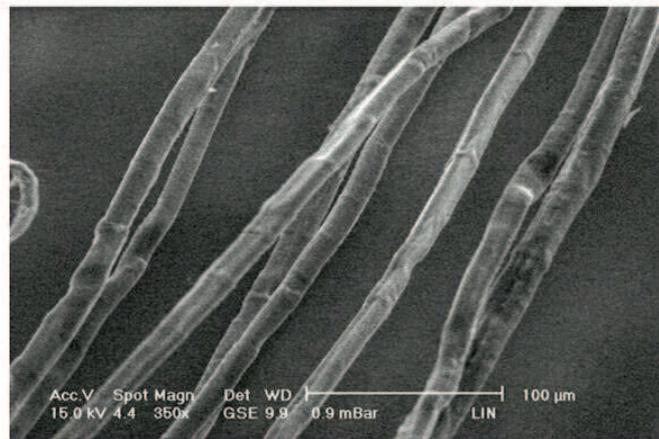


Figure 1-2 : Fibre de Lin (Caramaro 2005)

- 2- **Mono-filament** : c'est un filament unitaire de diamètre plus ou moins important, l'équivalent d'un fil lorsqu'il est utilisé comme tel. Il peut aussi représenter un brin unitaire du fil multi-filament.
- 3- **Filé ou « Filé de fibres »** : un « fil » d'apparence continue, obtenu à partir de fibres discontinues assemblées (retordues) entre elles par un procédé de filature, figure (1-3, b).

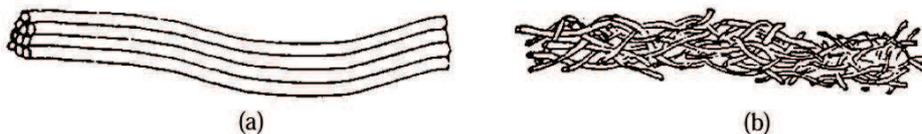
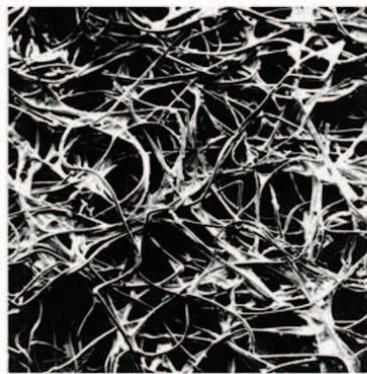


Figure 1-3 : a) Fil multi-filamentaire ; b) Filé de fibres, (Duhovic 2004)

- 4- **Fil** : élément de forme cylindrique infini obtenu généralement par filage en voie fondue ou en voie solvant. Le fil est le plus souvent constitué d'un grand nombre de filaments continus, on le désigne alors comme un multi filament, ou alors il est constitué d'un filament unitaire, on parle alors de mono filament, figure (1-3, a).
- 5- **Architecture textile** : un arrangement de fibres ou fils en (2D) ou (3D), qui permet de réaliser des surfaces ou volumes textiles. Selon la technologie de fabrication, ces architectures textiles peuvent être sous forme :
- Non-tissé avec une répartition aléatoire des fibres ou filaments constitutifs, figure (1-4).



(a) fibres synthétiques liées thermiquement



(b) fibres synthétiques et naturelles liées par aiguilletage

Figure 1-4 : Surfaces textiles de non-tissés, (Caramaro 2006)

- Des tissus, tresses ou tricots avec des degrés d'anisotropie plus ou moins importants suivant la technologie utilisée, figure (1-5).

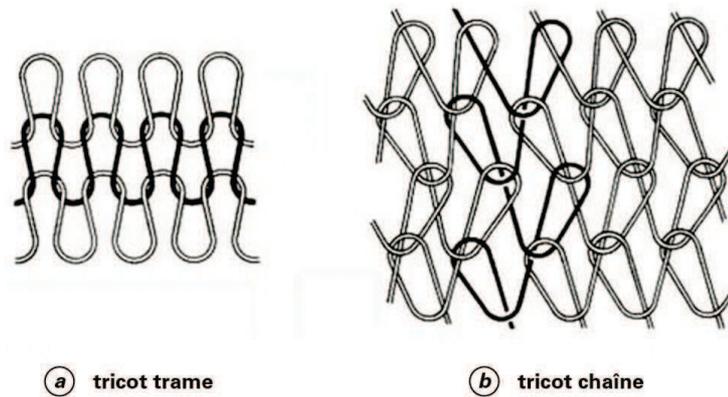


Figure 1-5 : Différents modes de tricotage, (Caramaro 2006)

1.3 Classification des fibres

L'intérêt de mettre la classification des fibres en exergue est de faire connaissance avec les variables élémentaires, qui peuvent influencer le comportement mécanique de la fibre et de la structure textile finale. Donc, suivant leur origine on divise les fibres en deux grandes catégories : naturelles et chimiques. Ces catégories sont communes aussi bien dans les applications traditionnelles que techniques (Wulfhorst et al. 2006). La nécessité d'avoir des fibres avec des propriétés spécifiques pour certaines applications techniques exige des modifications chimiques de ces fibres (Caramaro 2005). Cela donne lieu aux nouvelles catégories suivantes :

1. Fibres naturelles (d'origine animale, végétale ou minérale)
2. Fibres chimiques
 - 2.1. Fibres artificielles (polymères naturels)
 - 2.2. Fibres synthétiques (polymères synthétiques)
3. Fibres spéciales
4. Fibres fonctionnalisées

Le tableau (1-1), regroupe les codes utilisés pour les principales familles de fibres artificielles et synthétiques.

Tableau 1-1 : Codes BISFA (Bureau International de Standardisation des Fibres Artificielles) des principales familles de fibres artificielles et synthétiques, (Caramaro 2005)

Nom des fibres en anglais	Nom des fibres en français	Code BISFA
<i>Acrylic</i>	Acrylique	PAN
<i>Alginate</i>	Alginate	ALG
<i>Aramid</i>	Aramide	AR
<i>Carbon</i>	Carbone	CF
<i>Chlorofibre</i>	Chlorofibre	CLF
<i>Elastane</i>	Élasthane	EL
<i>Fluorofibre</i>	Fluorofibre	PTFE
<i>Glass</i>	Verre	GF
<i>Lyocell</i>	Lyocell	CLY
<i>Metal</i>	Métallique	MTF
<i>Polyamide</i>	Polyamide	PA
<i>Polyester</i>	Polyester	PES
<i>Polyethylene</i>	Polyéthylène	PE
<i>Polypropylene</i>	Polypropylène	PP
<i>Polyimide</i>	Polyimide	PI
<i>Viscose</i>	Viscose	CV
<i>Vinylal</i>	Vinylal (alcool poly-vinyle)	PVAL

1.3.1 Fibres naturelles

Les fibres naturelles, figure (1-6), se divisent en trois catégories principales selon leur origine (végétale, animale ou minérale). Elles se trouvent naturellement sous forme des fibres discontinues, mais on peut aussi obtenir un fil continu ou « filé » à partir d'une opération de filature, (Baley 2005; Caramaro 2005).

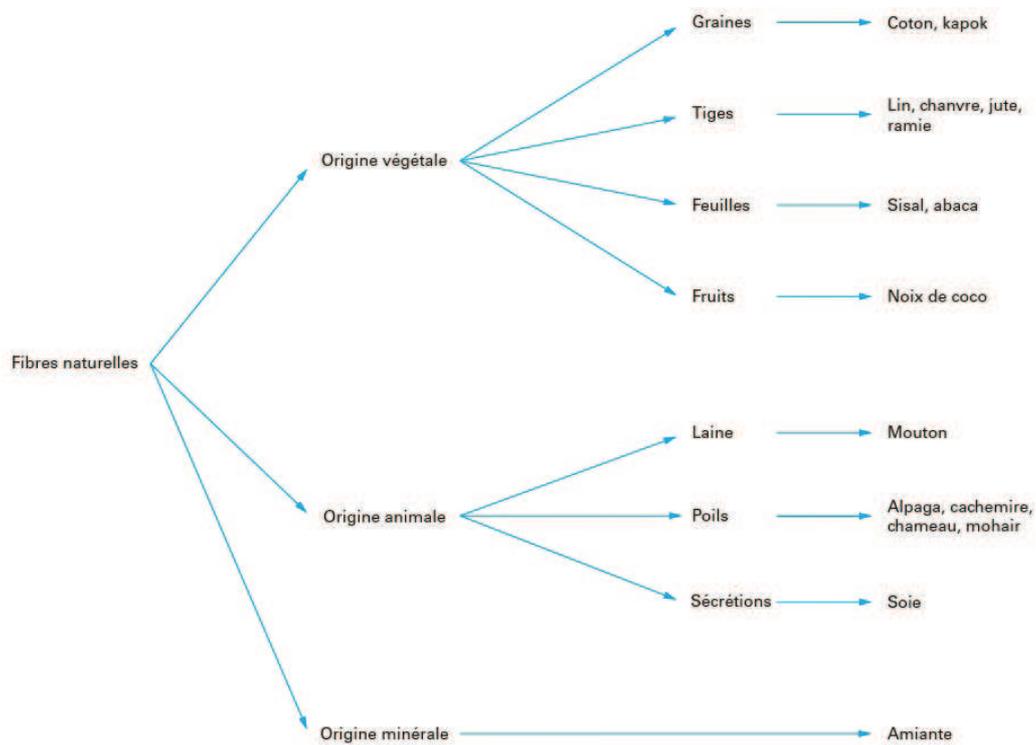


Figure 1-6 : Fibres naturelles, (Baley 2005)

1.3.2 Fibres chimiques

Les fibres chimiques, figure (1-7), peuvent être divisées en trois catégories, dont deux principales (artificielles et synthétiques).

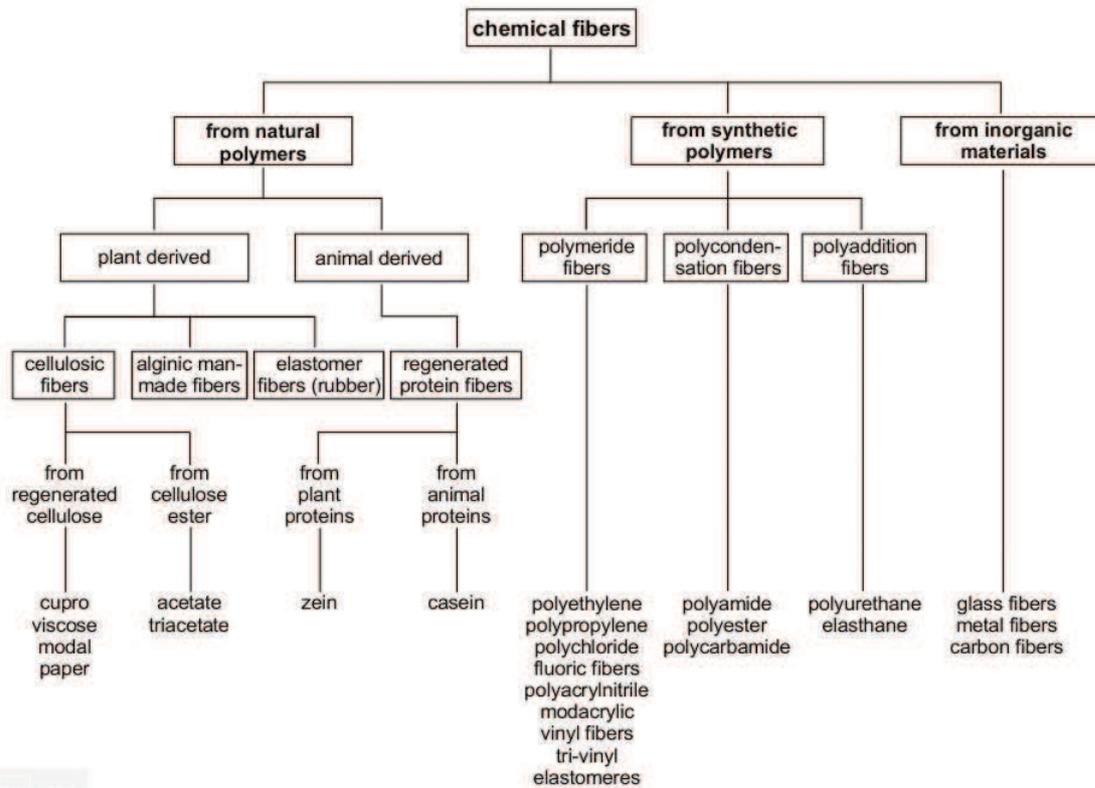


Figure 1-7 : Fibres chimiques, (Wulfhorst et al. 2006)

1.3.2.1 Fibres artificielles (polymères naturels)

Les fibres artificielles sont obtenues à partir de polymères naturels, dont les chaînes macromoléculaires existent déjà dans la nature. Les polymères naturels sont des dérivés d'origine végétale ou animale. Les premiers (d'origine végétale) donnent lieu à deux groupes : les fibres de cellulose régénérée, telles que le Cupro ou les filaments de viscose, et les fibres d'ester de cellulose telles que les fibres d'acétate et triacétate.

1.3.2.2 Fibres synthétiques (polymères synthétiques)

Ces fibres de polymères synthétiques ont des chaînes macromoléculaires obtenues par synthèse chimique à partir de monomères. La production de ces polymères se fait selon trois mécanismes différents de réaction : la polymérisation radicalaire, la polycondensation et la polyaddition.

1.3.3 Fibres spéciales

Cette catégorie comporte trois groupes des fibres, les fibres organiques à hautes performances, les fibres inorganiques et les fils/filés hybrides.

1.3.3.1 Fibres organiques à hautes performances

Cette famille de fils et fibres regroupe en particulier les fibres à hautes performances mécaniques et/ou thermiques. Elles présentent généralement les deux propriétés avec une prédominance pour les propriétés mécaniques par exemple pour les fibres para-aramides (Kevlar, Twaron, Technora).

Les fibres en polyéthylène haute ténacité, telles le Dyneema ou le Spectra ont quant à elles uniquement de très bonnes propriétés mécaniques. Leur point de fusion étant faible (autour de 110-120 °C), elles ne résistent pas à la chaleur.

Dans les fibres à hautes performances thermiques, on trouve les différentes fibres thermostables telles que les fibres phénoliques, mélamines, en polyacrylonitrile oxydé, copolyimide (comme la P84), polyamide-imide (comme le Kermel) ou encore polybenzimidazole (PBI). La plupart possèdent aussi d'excellentes propriétés mécaniques, c'est le cas des fibres para-aramides (Kevlar, Twaron, Technora) mais aussi celui des fibres méta-aramides (Nomex, Conex). Parmi les fibres aux propriétés mécaniques élevées associées à d'excellentes propriétés thermiques, on trouve les fibres en PBO (polybenzobisoxazole) plus connues sous le nom commercial de Zylon.

1.3.3.2 Fibres inorganiques

En plus de leurs bonnes propriétés mécaniques et thermiques, les fibres inorganiques ont aussi dans certains cas des propriétés particulières (diélectriques, conductrices...) qui dépendent de leur nature. Dans cette famille de fibres, on a les fibres de verre, de basalte, les fibres céramiques, les fibres de carbone activées ou non et les fibres métalliques.

1.3.3.3 Fils et filés hybrides

Ces types de fils sont fréquemment utilisés dans les matériaux composites thermoplastiques pour leur efficacité économique. Les fils et filés hybrides sont composés de deux groupes de fibres, figure (1-8), où l'un représente le renfort et l'autre représente la matrice thermoplastique. Cette

association se fait en utilisant de l'air comprimé. La partie renfort dans le fil hybride représente les fibres à haute performance comme le verre, le carbone et l'aramide. La matrice thermoplastique qui a un point de fusion faible sert à fixer les fibres de renfort dans un ordre prédéterminé, pour supporter la charge appliquée sur le renfort, ainsi que pour assurer une bonne adhésion entre les fibres et la matrice. Les avantages d'utilisation de ces matériaux composites thermoplastiques sont la haute ténacité, l'élongation, la productivité élevée, la facilité de recyclage, et la facilité de stockage de préimprégnés (Abounaim et al. 2011; Abounaim et al. 2010; Abounaim et al. 2009).

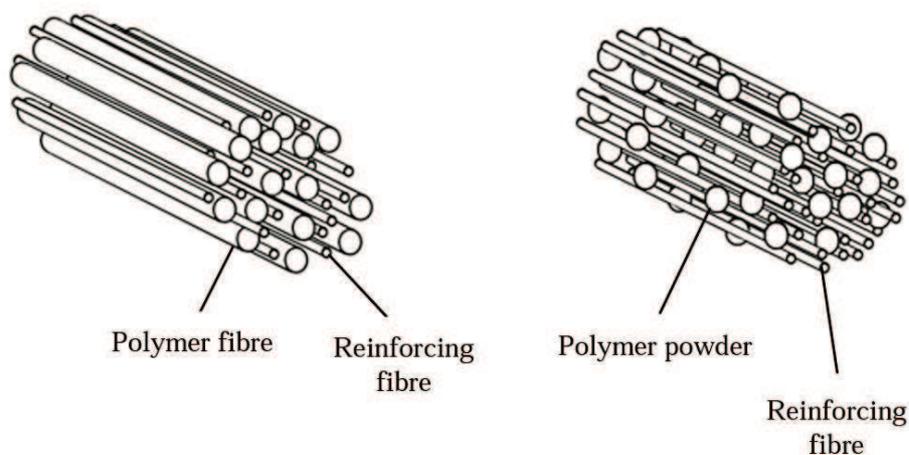


Figure 1-8 : Fils hybrides, (Duhovic 2004)

1.3.4 Fibres fonctionnalisées

Cette catégorie regroupe des fibres traditionnelles, mais elles sont chimiquement modifiées pour avoir des nouvelles propriétés spécifiques comme par exemple les fibres ignifugées, conductrices et bioactives, (Caramaro 2005). Ces fibres peuvent être modifiées par différentes méthodes :

- Modifications du polymère de base.
- Introduction d'additifs dans le polymère de base.
- Traitement de surface des fils ou fibres.

1.4 Procédés de fabrication

Le procédé de fabrication utilisé pour obtenir le fil est une autre variable qui entre en jeu, qui peut influencer le comportement mécanique du fil et de la structure textile finale. La figure (1-9) montre l'influence du procédé de fabrication sur les propriétés finales du fil (McIntyre 2005). Différents procédés de fabrication en fonction des natures de fibres mais également des domaines d'applications sont disponibles (Caramaro 2005; Wulfhorst et al. 2006). De manière générale, nous distinguons deux procédés principaux : le procédé de filage et le procédé dit de filature.

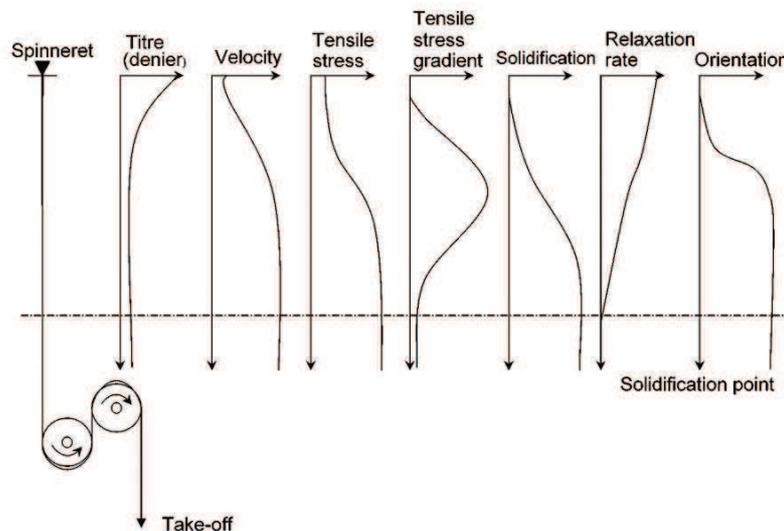


Figure 1-9 : l'influence de procédé de filage (voie sèche) sur les propriétés du fil, (McIntyre 2005)

1.4.1 Le procédé de filage

Le procédé de filage (principalement pour l'obtention d'un fil multi-filament) s'applique au cas des fils d'origine chimique : ce processus consiste à produire des mono filaments à partir d'une matière fondue ou en solution, extrudée à travers une filière constituée d'un certain nombre d'orifices. Ces filaments sont ensuite utilisés pour réaliser une architecture textile, (Hagège 1998).

1.4.1.1 Le procédé d'extrusion par voie fondue

Ce processus, figure (1-10), est appliqué aux polymères ayant un point de fusion bien défini et qui ne subissent pas des réactions secondaires (i.e. réticulation ou réaction de branchement).

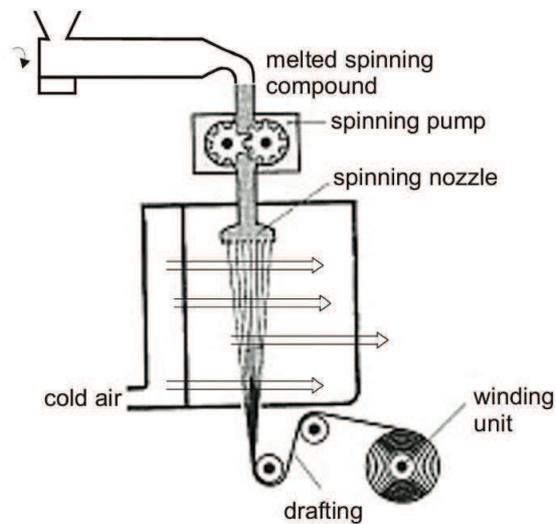


Figure 1-10 : Le procédé d'extrusion par voie fondue, (Wulfhorst et al. 2006)

1.4.1.2 Le procédé en solution ou par voie solvant

Ce processus est divisé en deux types de procédés selon l'étape de régénération du polymère lorsqu'on élimine le solvant :

Voie sèche : une régénération par séchage du solvant (PVC), figure (1-11).

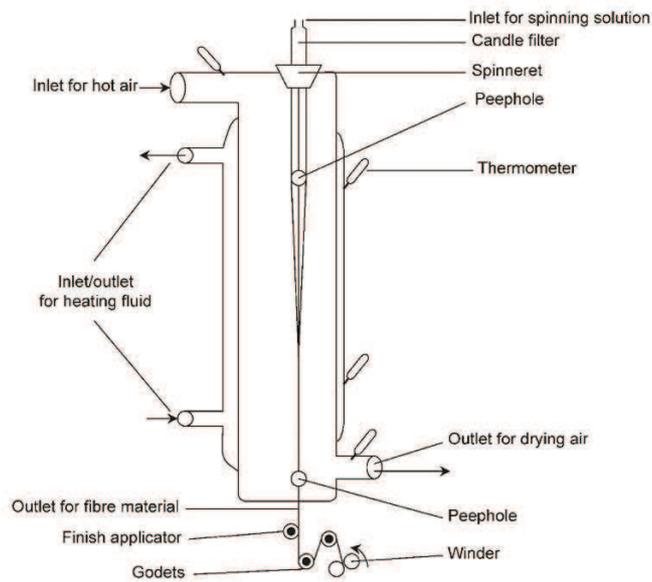


Figure 1-11 : Voie sèche, (McIntyre 2005)

Voie humide : une régénération dans un bain de coagulation (l'acrylique et la viscosse), figure (1-12).

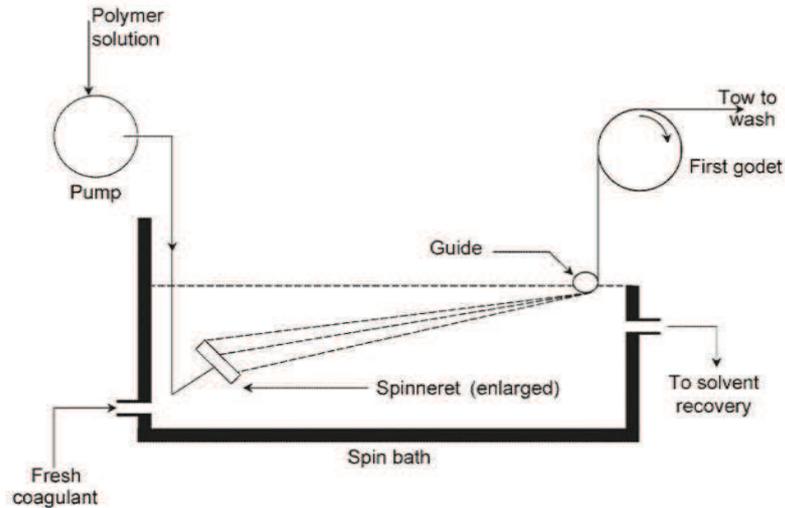


Figure 1-12 : Voie humide, (McIntyre 2005)

1.4.2 Le procédé de filature

Le procédé de filature, figure (1-13), est un procédé dans lequel des filés de fibres sont obtenus à partir de fibres d'origines différentes (naturelles, synthétiques...) qui peuvent ensuite être utilisés pour faire des surfaces textiles. Ce processus comprend différentes étapes telles que :

- **L'opération de cardage** : cette opération permet de démêler et de paralléliser les fibres entre elles.

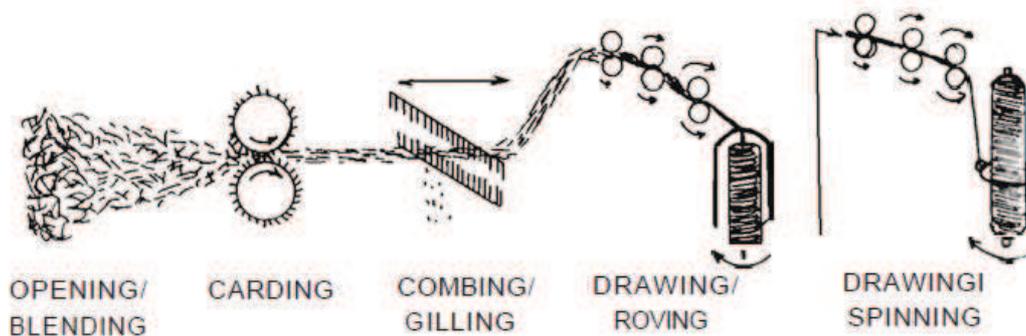


Figure 1-13 : Procédé de filature, (Wulfhorst et al. 2006)

- **Des opérations successives d'étirage du ruban** : ces opérations se font pour affiner progressivement la nappe de fibres qui successivement se transforme d'un voile en ruban puis en mèche. On applique une légère torsion au niveau de la mèche pour apporter de la cohésion entre les fibres et obtenir une mèche « consolidée ».
- **Une dernière opération d'étirage associée à une torsion** plus ou moins importante selon la ténacité recherchée au niveau du fil, où la technologie de filature dépend de la nature des fibres utilisées (open-end, friction, jet d'air...).

1.4.3 Les procédés de transformation des fils et filés

Les fils ou les filés peuvent subir, après les opérations de filature et de filage, des transformations pour leur conférer de nouvelles propriétés, comme par exemple :

- **Le moulinage ou le retordage** : dans ce procédé, on applique une torsion aux fils continus, pour améliorer leur caractéristiques mécaniques, diminuer leur section, et/ou assembler plusieurs fils ou filés.
- **La texturation** : cette opération donne aux fils continus (multi filaments) des propriétés de gonflant et d'élasticité, et modifie l'aspect et le confort des étoffes.
- **Le guipage** : technique dans laquelle le fil d'âme a été recouvert par enroulement hélicoïdal avec un ou plusieurs fils simples, qu'on appelle « fil de couverture ». Cette technique permet de protéger les fils fragiles (carbone, céramique) pendant les opérations de transformation (tissage, tricotage et tressage) où ils subissent des frottements importants ou de protéger le fil d'âme sensible aux UV par exemple (cas des para-aramides).

1.5 Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés physiques et mécaniques constituent les critères comparatifs des différentes fibres (ou fils) pour l'élaboration des structures textiles. Ce sont des paramètres prédominant dans notre étude car ils prennent en compte toutes les caractéristiques précédentes (origine des fibres, procédé de fabrication) et influenceront sur le comportement mécanique de la structure textile.

1.5.1 Les propriétés physiques

1.5.1.1 Diamètre

Pour les mono filaments : la grosseur se caractérise par un diamètre en centièmes de millimètres ou en micromètres.

Pour les fibres et les fils : la grosseur se caractérise par la masse linéique ou « titre »

Masse linéique ou titre

Nous exprimons le plus souvent cette unité de mesure en *Tex*. **1 Tex** représente le poids en grammes de **1000 m** de fil.

Ce titre du fil peut être calculé à partir de son diamètre en utilisant la formule suivante :

$$\text{Titre}(\text{Tex}) = \rho \times S \times 10^5 \quad (1 - 1)$$

Avec $\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right)$: masse volumique du fil ; $S(cm^2)$ section du fil

On peut exprimer aussi le titre de fil par le numéro métrique (**Nm**), qui représente l'inverse du système *Tex*, en appliquant la formule suivante :

$$1Nm = \frac{1000}{1Tex} \quad (1 - 2)$$

1.5.2 Les propriétés mécaniques

1.5.2.1 Propriétés mécaniques en traction

Dans l'essai de traction, nous caractérisons la rigidité et la résistance en déterminant les paramètres suivants :

La contrainte à la rupture (σ) : elle correspond à la force à la rupture **F** divisée par l'aire de la section droite initiale de l'éprouvette (mm^2), et exprimée en MPa ($\frac{N}{mm^2}$).

Le module d'élasticité (Young) E : il correspond à la rigidité de la fibre, et est exprimée en MPa ou GPa. Il est mesuré dans la partie élastique de la courbe (Contrainte – Allongement relatif) où il représente la pente de cette courbe.

Dans les fibres textiles, nous parlons de valeurs spécifiques de la contrainte et du module d'élasticité. La figure (1-14) montre la variation de comportement mécanique des fibres sur traction selon leurs origines. Il est tenu compte de la masse volumique des fibres, et donc, on définit :

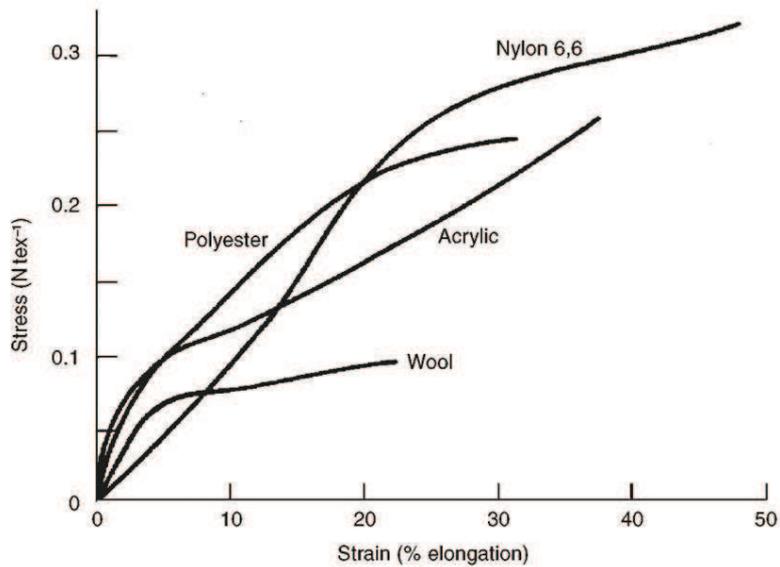


Figure 1-14 : Les propriétés de fibres en traction (contrainte spécifique - déformation), (McIntyre 2005)

Ténacité (résistance spécifique) : exprimée en $N.tex^{-1}$, comme dans la formule (1-3) suivante :

$$\sigma_{sp}(N/tex) = \frac{F(N)}{T(tex)} = \frac{\sigma (GPa)}{\rho (g/cm^3)} \quad (1 - 3)$$

Module d'élasticité spécifique : exprimée en $N.tex^{-1}$, comme dans la formule (1-4) suivante :

$$E_{sp}(N/tex) = \frac{E (GPa)}{\rho (g/cm^3)} \quad (1 - 4)$$

Le tableau (1-2) présente le comportement mécanique en traction de différentes fibres techniques.

Tableau 1-2 : le comportement mécanique en traction de différentes fibres techniques, (Caramaro 2005)

Fibres	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	σ (MPa)	A (1) (%)	E_{sp} (N/tex)	σ_{sp} (N/tex)
Organiques						
PP HT	0,91	6,4	736	15,5	7	0,8
Viscose HT	1,46	19	730	8	13	0,5
PA66 HT	1,14	6	960	20	5,3	0,84
PET HT	1,38	13,8	970	16	10	0,7
PVA HT	1,3	30	1 200	7	23,1	0,9
PE HT	0,97	90	2 700	3,5	92,8	2,78
Para-ara- mide	1,44	60	2 900	3,8	41,7	2,01
Para-ara- mide HM	1,45	120	2 900	1,9	82,8	2
PBO HM	1,56	270	5 800	2,5	172	3,7
Inorganiques						
Acier	7,8	200	2 800	1,8	25,6	0,36
Carbone HM (M40)	1,81	392	2 740	0,7	216,6	1,51
Carbone HT (T300)	1,76	230	3 530	1,5	256,5	2,01
Carbure de silicium	2,55	200	2 900	1,5	78,4	1,14
Silice	2,2	78	3 540		35,5	1,61
Verre E	2,6	73	2 500	3,5	28,1	0,96
Verre R	2,53	86	3 300	3,3	34	1,30

(1) Allongement à la rupture.

1.5.2.2 Autres propriétés mécaniques

L'étude du comportement mécanique d'une fibre comporte l'analyse des autres types de sollicitations simples telles que la compression et le cisaillement, et des sollicitations complexes qui intègrent la flexion, la torsion, la compression et la traction.

Les essais de compression axiale, tableau (1-3), et de cisaillement sur les matériaux composites unidirectionnels, tableau (1-4), montrent la faiblesse de la plupart des fibres organiques à hautes performances mécaniques. Ce comportement est expliqué par la structure anisotrope des fibres et l'interaction faible entre les chaînes qui génère une faible résistance en compression et cisaillement, et conduit à des phénomènes de fibrillation comme dans les fibres de para-aramide, figure (1-15).

Tableau 1-3 : Propriétés mécaniques en compression, (Caramaro 2005)

	Basalte	Verre E	Verre S
Résistance à la traction (MPa)	4 840	3 450	4 710
Module d'Young (GPa)	89	77	89
Allongement à rupture (%)	3,15	4,7	5,6
Masse volumique..... (g/cm ³)	2,8	2,57	2,48

Tableau 1-4 : Modules de cisaillement, (Caramaro 2005)

Nature	Module de cisaillement G (GPa)	Module de traction/ Module de cisaillement (GPa)
Verre		2,0
Acier		2,8
Polyamide 6 (1)	0,33 à 0,48	5,8
Polypropylène	0,75	
Polyester	0,85	
Rayonne	0,84 à 1,2	8,2
Laine	1,3	3,2
Acrylique	1,0 à 1,6	
Para-aramide (2)	1,8	70

(1) Nylon de DuPont.
(2) Kevlar 49 de DuPont.

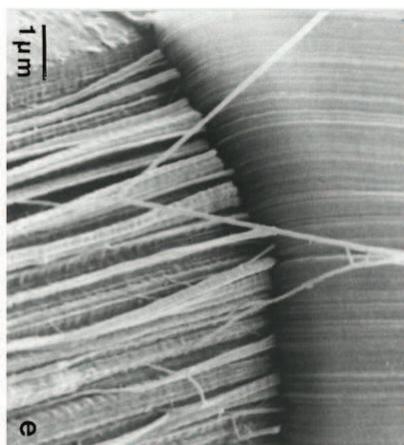


Figure 1-15 : Phénomène de fibrillation pour la fibre para-aramide, (Caramaro 2005)

Les essais de résistance au nœud et à la boucle, tableau (1-5), qui soumettent les fibres à des sollicitations complexes.

Tableau 1-5 : Résistance au nœud et à la boucle, (Caramaro 2005)

Fibres	Résistance à la boucle		Résistance au nœud	
	(N/tex)	(%)	(N/tex)	(%)
Polyéthylène HT	1,1 à 1,7	40 à 65	0,9 à 1,5	35 à 55
Aramide	0,9 à 1,5	40 à 75	0,6 à 0,8	30 à 40
Carbone	0,01	1	0	0
Polyester	0,6 à 0,7	70 à 75	0,4 à 0,5	50 à 60
Polyamide 6	0,6 à 0,7	70 à 75	0,5 à 0,6	60 à 65
Polypropylène	0,6 à 0,7	85 à 95	0,4 à 0,5	60 à 70

1.6 La préparation des filés avant le tricotage

Une fois le fil obtenu à partir des procédés présentés précédemment il est nécessaire afin d'assurer la qualité du procédé du tricotage, d'opérer à certaines préparations indispensables pour tricoter sans difficulté. Ainsi on peut citer l'ensimage / le paraffinage déposé en surface du fil et le bobinage soigné, (Dubied 1967).

Le bobinage a deux buts : c'est d'abord un ultime contrôle de qualité qui doit éliminer les points faibles et les nœuds trop gros, afin de réduire ainsi au maximum les arrêts de la machine à tricoter. Ensuite, le bobinage permet de constituer des bobines dont le déroulement doit être régulier. La tension du fil lors du bobinage détermine la dureté de la bobine et doit être réglée, par expérience, pour chaque type de fil. Une tension trop forte endommage le fil alors qu'une tension trop faible implique des bobines molles qui se déroulent mal. Les bobines prêtes doivent être stockées en atmosphère conditionnée (20° C, 60% RH), pour éviter des variations du degré d'humidité ou de la température du filé. Le paraffinage des matières naturelles, laine, coton et soie se fait généralement lors du bobinage. Ce processus est dans le but d'éliminer le problème de blocage dans le chariot de la machine à tricoter due à l'utilisation des matières naturelles sèches. Une bobine qui a été stockée pendant plus de quatre semaines doit être paraffinée à nouveau. La conicité des bobines varie suivant la nature du filé. La laine, par exemple, exige une bobine très conique alors que la soie requiert une bobine de faible conicité.

1.7 Technologie de tricotage

1.7.1 Introduction

L'industrie textile a développé des compétences pour réaliser des structures textiles complexes en utilisant des technologies avancées telles que le tissage, le tressage et le tricotage. D'un point de vue économique mais également pour l'amélioration des propriétés mécaniques, des structures tricotées textiles ont été utilisées pour les applications aux matériaux composites. La technologie du tricotage est bien adaptée pour la production rapide de composants aux formes complexes grâce à la déformabilité élevée des structures tricotées (Hearle 1994). Par ailleurs, les machines à tricoter actuelles ont été adaptées avec succès afin d'utiliser des fibres à haute performance telles que les fibres de verre, de carbone, d'aramide et de céramique pour réaliser des structures tricotées simples et complexes. Le renfort tricoté est ensuite mis en forme selon la géométrie de la pièce finale et consolidé en matériau composite en utilisant des techniques de moulages liquides appropriées par transfert par injection (RTM) ou par infusion de résine (RFI) de résine.

L'utilisation des renforts (net-shape/near-net-shape) est avantageux dû à la minimisation de perte de matière et la réduction du temps de production (Epstein & Nurmi 1991). Cependant, le développement de techniques du tricotage intégral pour réaliser des renforts n'est pas encore efficace économiquement du fait de leur coût et de leur temps de production. Dans de tels cas, les structures tricotées (2D) peuvent être utilisées pour leur formabilité/ drapabilité très élevée afin d'être formées dans un moule pour une consolidation ultérieure afin d'obtenir la pièce composite finale (Höhfeld et al. 1994).

Malgré la formabilité extraordinaire des renforts tricotés, le point de faiblesse des matériaux composites à renforts tricotés, figure (1-16), demeure dans leur comportement mécanique membranaire en comparaison avec les matériaux composites conventionnels (Chou et al. 1992; Herszberg et al. 1996; Leong et al. 1998; Rudd et al. 1990; Taylor 1990). L'origine de cette faiblesse vient de la nature structurelle très déformable du renfort tricoté générée par la géométrie de maille ce qui limite l'utilisation de la rigidité des fibres. En outre, les dommages infligés aux fibres pendant le processus de tricotage seraient source des dégradations des propriétés mécaniques (Chou et al. 1992).

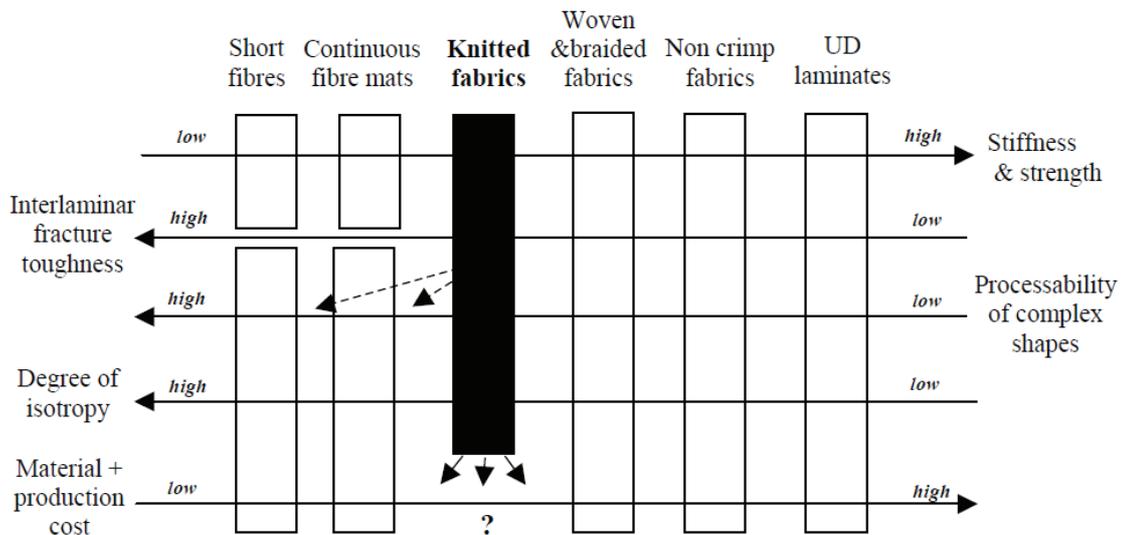


Figure 1-16 : Comparaison de certaines propriétés de matériaux composites aux renforts textiles, (Padaki et al. 2006)

1.7.2 Le procédé du tricotage

Selon les références bibliographiques (Leong et al. 2000; Ray 2012; Spencer 2001; Caramaro 2006), le terme de tricotage se réfère à une technique de production des structures textiles par l'entrelacement curviligne de fils dont l'élément de base est la maille en utilisant des aiguilles. Une série continue de mailles est formée par l'aiguille en attrapant le fil et le tirant à travers une maille précédemment formée pour former une nouvelle maille. Dans une structure tricotée, les rangées courent à travers la largeur du tricot, et les colonnes courent sur la longueur du tricot. Les mailles dans les rangées et les colonnes sont tenues et entrelacées entre elles pour former le panneau du tricot final, figure (1-17).

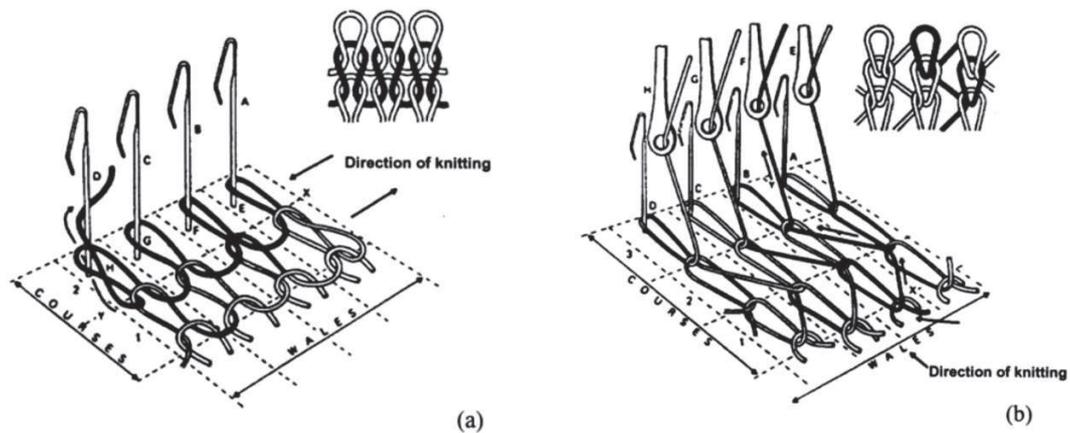


Figure 1-17 : Technologie de tricotage, (Leong et al. 2000)

Une colonne de mailles est produite par une seule aiguille pendant les cycles consécutifs de la machine à tricoter. Le nombre de colonnes par unité de largeur d'un panneau de tricot dépend particulièrement de la taille et de la densité des aiguilles utilisées (jauge de la machine), ainsi que de la structure tricotée, du titre du fil, du type du fil et de la tension du fil appliquée. Par ailleurs, une rangée des mailles est produite par un ensemble d'aiguilles pendant un cycle de la machine à tricoter. Le nombre de rangées par unité de longueur d'un panneau de tricot est contrôlé par l'abattage (Phase de formation de la maille au cours de laquelle l'ancienne maille passe par-dessus la tête de la nouvelle) et l'alimentation du fil. Des tests standardisés existent pour mesurer et quantifier le nombre de mailles dans une unité de longueur de tricot (Australian Standard Methods of Test for Textiles 1981).

Selon la direction dans laquelle les mailles sont formées, le tricotage peut être classé dans l'une des deux catégories suivantes : le tricotage à mailles cueillies et le tricotage à mailles jetées. Le tricotage à mailles cueillies, figure (1-17, a), est caractérisé par la formation de mailles où un seul fil issu d'une bobine forme des boucles (mailles) cueillies par les mailles de la rangée inférieure. Le tricotage à mailles jetées, figure (1-17, b), est caractérisé par la formation de mailles où plusieurs fils disposés sur une ensouple, comme pour les fils de chaîne d'un tissu, alimentent chacun une aiguille et sont entrelacés avec leur voisin de droite ou de gauche. Plus précisément, le tricotage à maille jetée est effectué en entrelaçant chaque fil dans les colonnes des mailles adjacentes au cours de ce processus. En règle générale, les structures des mailles cueillies sont moins stables et, par

conséquent, elles s'étirent et se déforment plus facilement que les structures des mailles jetées. L'avantage évident des mailles jetées sur les mailles cueillies relève du taux de production qui est significativement plus élevé puisque les fils sont tricotés simultanément. La facilité avec laquelle les structures de mailles cueillies démaillent, et le coût associé à l'ensouple d'ourdissage sont également à prendre en compte dans le choix entre la maille jetée et la maille cueillie.

Dans le tricotage, les mailles chargées et allongées, figure (1-18), représentent les voies principales pour modifier les structures tricotées afin d'obtenir des propriétés macroscopiques spécifiques dans la structure. En général, les boucles dites « charge » rendent la structure tricotée plus large, plus épaisse et légèrement moins extensible. Les boucles dites « flotté », à l'inverse, augmentent la proportion de fils droits dans la structure, ce que nous pouvons considérer comme un point important dans plusieurs applications des matériaux composites.

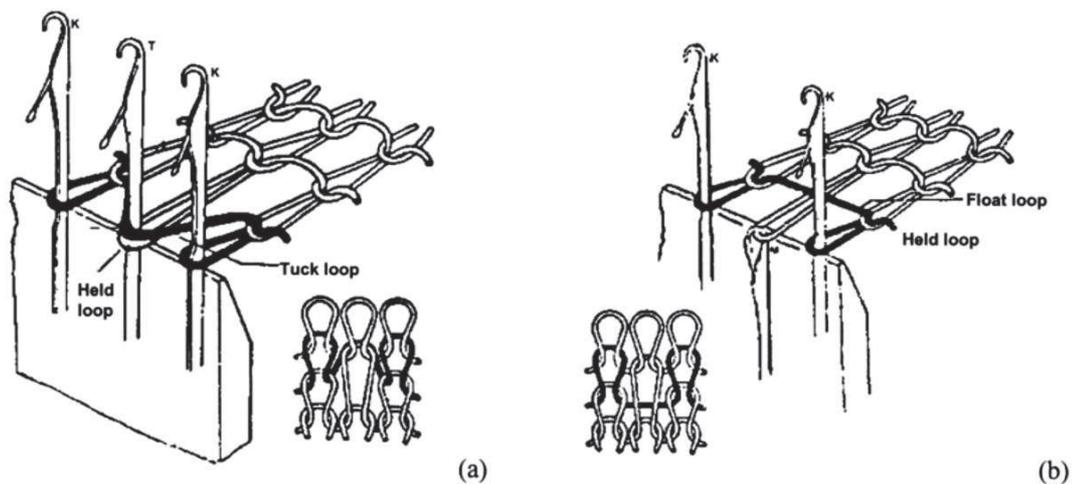


Figure 1-18 : Boucles de type : a) Charge ; b) Flotté, (Leong et al. 2000)

1.7.3 Les paramètres principaux pendant le procédé de tricotage

De nombreuses recherches ont été réalisées afin d'examiner l'influence des différents paramètres entre le fil et les éléments de tricotage pendant le procédé de tricotage, (Knapp & Munden 1966). Les paramètres principaux dans le procédé de tricotage sont le frottement, la résistance, la rigidité de flexion, les propriétés élastiques du fil, la vitesse des éléments de tricotage,

la profondeur d'abattage donc la longueur de fil absorbée ainsi que la tension du fil dans la zone de tricotage, (Lau & Dias 1994). Selon la loi de Bernoulli du frottement, figure (1-19), la formation de boucle sous les conditions dynamique augmente la tension de fil dans la zone de tricotage devant la came d'abattage et la diminue derrière elle.

$$T_i = T_{run-in} \cdot e^{\mu\theta} \quad (1 - 5)$$

T_i : la tension du fil à n'importe quel point dans la zone de tricotage (N).

T_{run-in} : la tension d'entrée du fil (N).

μ : le coefficient moyen du frottement entre les éléments du tricotage.

Θ : l'angle de contact entre le fil et l'aiguille/ rainure de la fonture (rad).

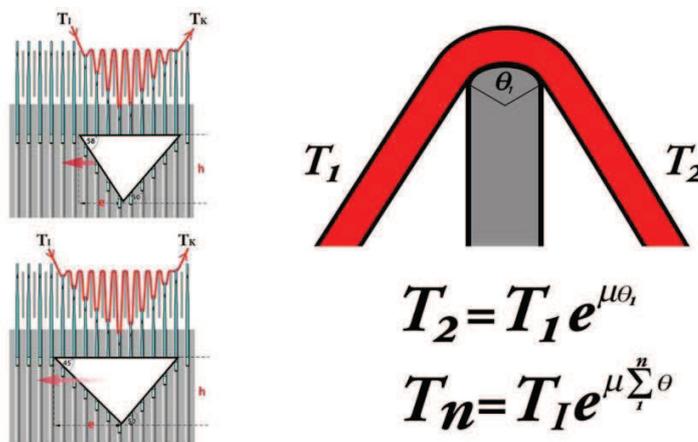


Figure 1-19 : Tension du fil dans la zone de tricotage, (Innovation Centre 2009)

Dans la zone de tricotage l'importance du phénomène de « robbing back » est liée à la mécanique de la formation d'une boucle de type « maille cueillie », figure (1-20). Lors de la réception du le fil, l'aiguille commence à descendre afin de former la boucle, où elle tire initialement le fil de la bobine. Lorsque l'aiguille s'approche du point du tricotage, la tension du fil devient très élevée provoquant des difficultés pour l'aiguille à tirer le fil issu de la bobine, la réserve de fil, pour constituer la boucle, provient de la boucle réalisée par l'aiguille précédente. Une recherche a été réalisé par (Abou-Iiana 2000) montre que la position de tension maximale dans la zone de tricotage se déplace vers l'entrée du fil dans la zone en augmentant la tension d'entrée T_{run-in} , alors qu'elle s'approche du point de tricotage en diminuant la tension d'entrée.

Les paramètres du fil et les éléments de tricotage, qui entrent en jeu pendant le tricotage, rendent ce processus assez complexe. Lors de production d'une structure tricotée en utilisant des fils à haute performance mécanique telles que Carbone, Aramide et Polyester, les paramètres comme le frottement et la rigidité de flexion du fil sont très importants pour déterminer la tricotabilité de cette structure. Cependant, un des problèmes principaux est que certains de ces fils à usage technique sont presque inextensibles, ce qui provoque une hausse soudaine de tension associée avec une rupture d'un fil ou un mono-filament, (Liu et al. 2008; Savci et al. 2001; Lau & Dias 1994).

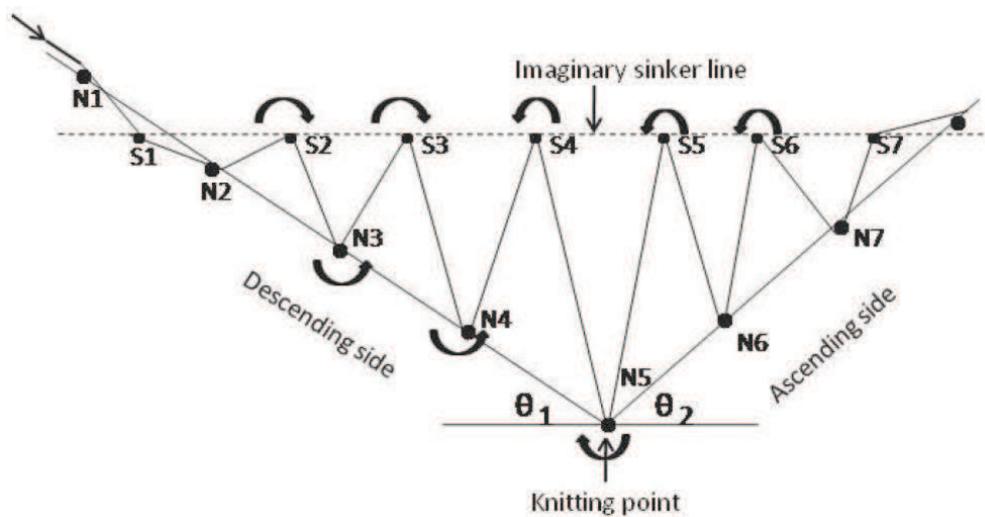


Figure 1-20 : Le phénomène de "robbing back", (Ray 2012)

1.7.4 Machines à tricoter

Les paramètres de la structure tricotée dépendent principalement du type de machine à tricotée utilisée. Il est donc nécessaire d'avoir une vue globale de la classification de ces machines pour comprendre la variation des paramètres de la structure étudiée. Généralement, les machines à tricoter se divisent en deux grandes catégories, selon le type de technologie de tricotage (maille cueillie et jetée), (Gohl & Vilensky 1991; Ray 2012; Spencer 2001).

1.7.4.1 Maille cueillie

Machines rectilignes

Dans notre étude, nous avons réalisé nos éprouvettes sur une machine à tricoter de type rectiligne. De manière générale les machines rectilignes, figure (1-21), sont caractérisées par la disposition de leurs aiguilles sur une fonture linéaire, figure (1-22). Ces aiguilles sont parallèles entre elles sur chaque fonture et disposées à intervalle régulier. Cet intervalle permet de définir la jauge (nombre d'aiguilles par pouce, soit sur **25,4 mm** pour la jauge anglo-saxonne). La jauge conditionne la taille du fil (gamme de titrage à utiliser) et l'aspect du tricot final (maille plus ou moins fine). La plupart de ces machines ont deux fontures opposées. Le mouvement des aiguilles pendant le tricotage est commandé par des cames dans le chariot qui agissent sur le talon des aiguilles en se déplaçant d'avant en arrière au long de la fonture, figure (1-23). Cette action implique à chacune des aiguilles de monter et descendre, pour faciliter la formation de la maille sur la longueur de la fonture. C'est de cette action que le terme de «tricotage à mailles cueillies» est dérivé. Le système d'alimentation du fil est situé au-dessus de la machine. La figure (1-24) montre que le fil est alimenté au niveau des aiguilles par l'intermédiaire d'un guide-fil. Celui-ci glisse sur une barre au-dessus de la fonture. Une machine comporte plusieurs guide-fils pour permettre des alimentations différentes en fil. Le panneau de tricot passe entre les deux fontures sous l'effet du rouloir. Celui-ci exerce un tirage sur le tricot et est indispensable pour éviter que le tricot ne remonte entre les fontures et ne bourre la machine lors de l'ascension des aiguilles pendant la formation de la maille. Il est à noter que les machines rectilignes ont des taux de production faibles par ce mouvement avant-arrière des fils à travers la fonture. Il en résulte des retards légers à chaque changement de direction qui peuvent devenir important sur une longue période. Les machines rectilignes ont des jauges allant de 3 à 15 et leurs tricots sont donc normalement de grandes mailles avec des densités faibles de mailles.



Figure 1-21 : Une machine rectiligne, (Stoll 2012)

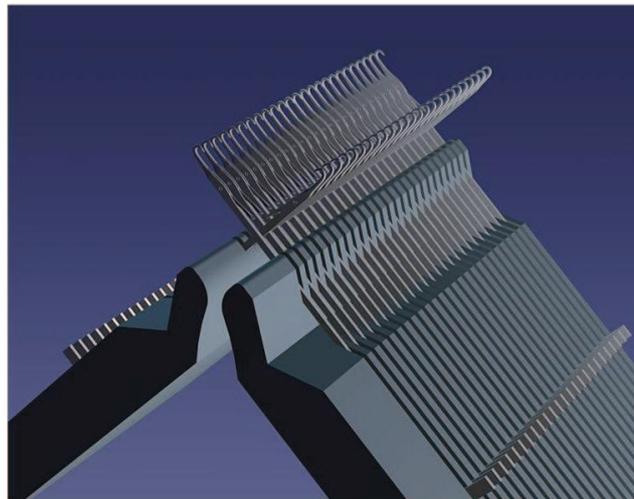


Figure 1-22 : La disposition des aiguilles sur la fonture, (Innovation Centre 2009)

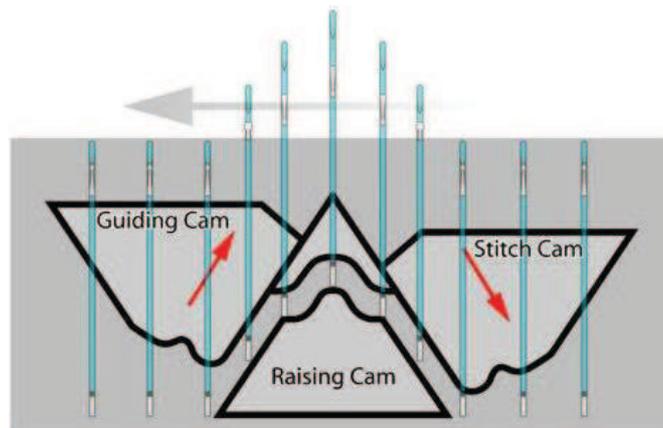


Figure 1-23 : La mécanique des cames, (Innovation Centre 2009)

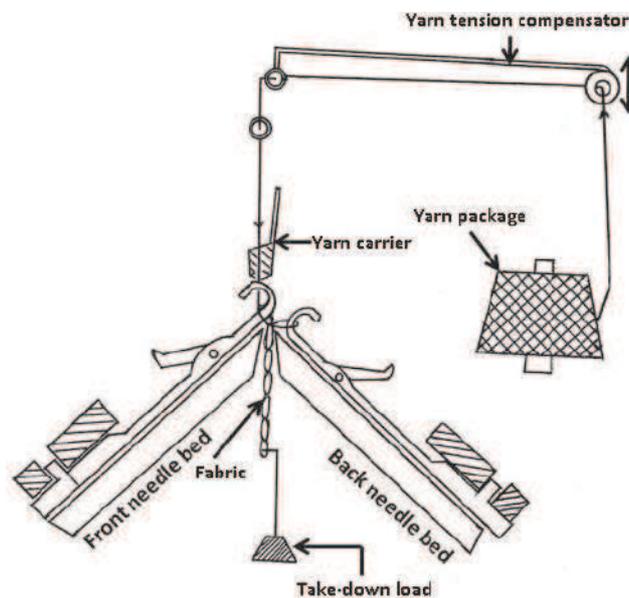


Figure 1-24 : Coupe transversale d'une machine à tricoter rectiligne, (Ray 2012)

Machines circulaires

Les métiers circulaires, figure (1-25), peuvent être à simple ou double fonture, et leurs aiguilles, comme leur nom l'indique, sont disposées dans une fonture circulaire (i.e. disposition des aiguilles circulaires).



Figure 1-25 : Un métier circulaire, (Hunter 2009)

Les machines circulaires à simple-fonture ont leurs aiguilles disposées verticalement le long du périmètre de la fonture circulaire. Cette disposition est appelé aiguilles de cylindre, figure (1-26, a). Les machines circulaires à double fonture ont une disposition supplémentaire d'aiguilles, appelées aiguilles de plateau, figure (1-26, b), montées horizontalement sur la circonférence d'un plateau qui se trouve au-dessus et perpendiculairement à la fonture cylindrique. Les positions relatives des aiguilles de plateau sont intercalées entre une paire d'aiguilles de cylindre, et vice versa. Dans les deux types de machines, les aiguilles sont normalement tournées devant des fournisseurs de fils fixes pour effectuer le tricotage. Comme pour les machines rectilignes, le mouvement des aiguilles est commandé par des cames.

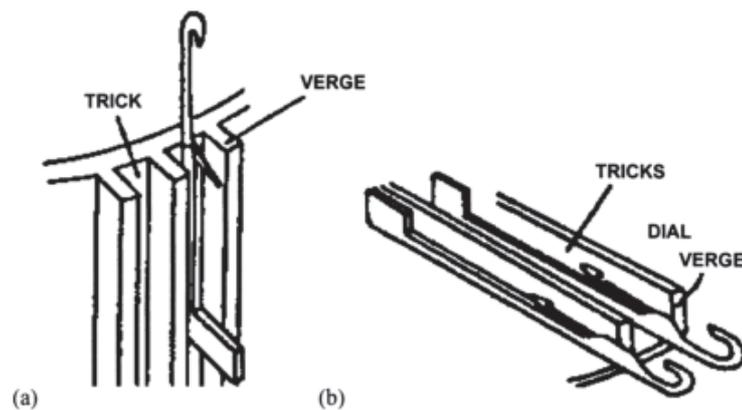


Figure 1-26 : Machine circulaire : a) aiguilles de cylindre ; b) aiguilles de plateau, (Leong et al. 2000)

Comme avec une machine circulaire le fil est tricoté de manière continue, les taux de production sont ainsi beaucoup plus élevés par rapport aux machines rectilignes. Ce tricotage continu signifie aussi que les tricots fabriqués sur des machines circulaires sont tubulaires et ne contiennent pas de coutures. Les machines circulaires ont des jauges allant de **5** à **40**, et donc leurs tricots sont normalement constitués de petites mailles avec des densités relativement élevées.

1.7.4.2 Maille Jetée

Machines Chaînes

Les machines Chaînes, figure (1-27), n'ont en général qu'une seule fonture d'aiguilles et jusqu'à quatre barres à passettes à une aiguille. La fonture est rectiligne, et occupe la largeur de la machine. Les barres à passettes se déplacent par rapport aux aiguilles pour inter-relier les fils avec les mailles adjacentes pendant le tricotage. Etant des machines de jauges généralement fines, la tolérance entre les aiguilles et les guides de fil est très faible, et des machines sont donc couramment utilisées avec des fils multi-filaments. Avec la finesse et la régularité de diamètre de la fibre, le tricotage est plus rapide et se déroule sans problèmes majeurs. Il est à noter que les caractéristiques souvent peu extensibles de ces structures de tricot, et donc leur stabilité relative font qu'elles se substituent aux structures tissées.



Figure 1-27 : Une machine chaîne, (Karl Mayer 2010)

Machines Rachel

Des machines Rachel peuvent avoir un ou deux fontures rectilignes, figure (1-28) qui occupent la largeur de la machine. Selon la structure tricotée, jusqu'à 78 barres à passettes peuvent être utilisés, bien que le nombre normal se situe entre 4 et 10. En raison du plus grand nombre de barres à passettes il est possible de tricoter une immense variété de structures sur ces machines. Néanmoins, la formation de maille basique de Rachel est la même que pour les structures issues des Machines Chaînes. Hormis la chaînette qui ne peut pas être tricotées seules sur plusieurs rangées avec un métier Chaîne du fait du mécanisme de maintien du tricot.



Figure 1-28 : Une machine Rachel, (Hunter 2008)

Comme les machines Rachel, figure (1-29), ont généralement plus de guides équipés que les machines Chaînes, ce sont des machines de grosse jauge. La grande tolérance entre les aiguilles et les guide-fils signifie que les fils produits par filature peuvent être tricotés. Il est à noter que Rachel est devenue le nom générique pour décrire les tricots sur un métier à mailles jetées avec deux barres d'aiguilles.



Figure 1-29 : *Machine Rachel*, (Hunter 2008)

En outre, les tissus Rachel ont généralement tendance à être caractérisés par leurs structures ajourées qui sont généralement tricotées à partir de filés, plutôt que de fils multi-filaments.

1.7.5 Les structures tricotées de base à maille cueillie

Les éprouvettes testées dans notre étude sont de type (côte 1 et 1), ce qui est une structure tricotée de base à maille cueillie. Pour cela nous donnons une vue globale de la formation d'une boucle, des termes utilisés et des structures de base à maille cueillie, puis nous concentrons l'analyse dimensionnelle sur notre structure (côte 1 et 1).

Jersey, Côte, Interlock et Maille retournée sont les structures de base à maille cueillie, à partir desquelles sont dérivées toutes les autres structures à maille cueillie. Les représentations graphiques et schématiques des quatre structures de base à maille cueillie sont données dans les figures (1-30) et (1-31) (Ray 2012; Spencer 2001). Il est à noter que la structure « Jersey » est réalisée sur une seule fonture tandis que les autres structures « Côte, Interlock et Maille retournée » sont réalisées sur deux fontures simultanément en modifiant l'arrangement des aiguilles pour chaque structure.

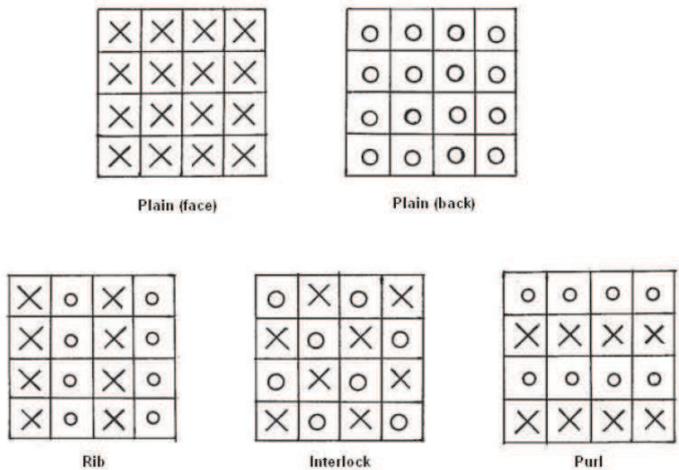


Figure 1-30 : Notation graphique des structures de base à maille cueillie, (Ray 2012)

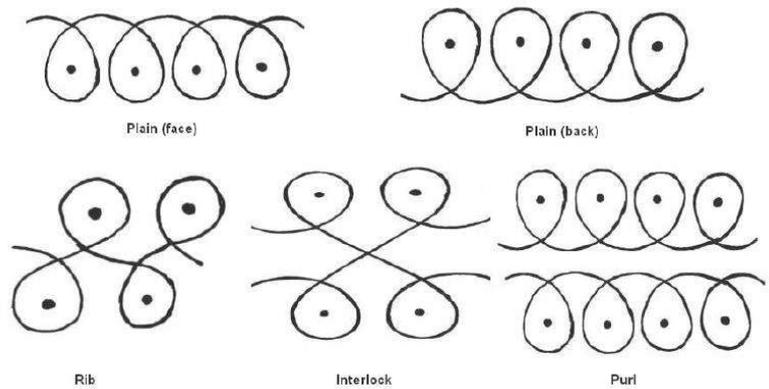


Figure 1-31 : Notation schématique des structures de base à maille cueillie, (Ray 2012)

1.7.5.1 Formation d'une maille

La formation d'une maille, figure (1-32), se résume à trois étapes :

- 1- L'aiguille fait une ascension qui oblige la maille précédente à ouvrir le clapet pour qu'elle sorte du crochet et glisse sur le clapet afin d'être installée sur le corps d'aiguille. Le crochet reçoit donc le nouveau fil.
- 2- L'aiguille fait un recul qui oblige la maille précédente à fermer le clapet sur le nouveau fil.
- 3- Le nouveau fil est retiré de la maille précédente qui tombe sur la nouvelle maille.

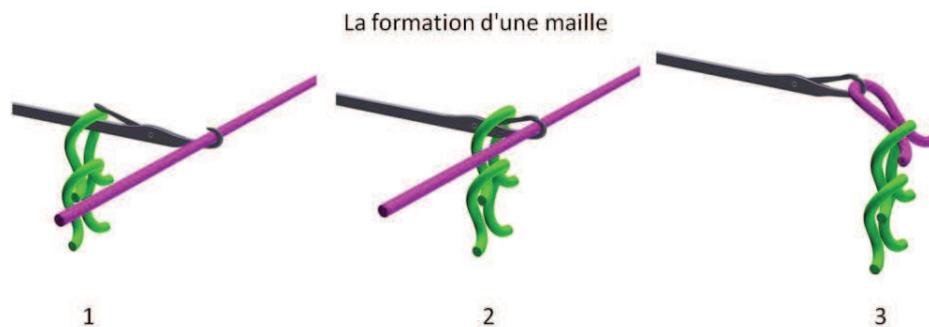


Figure 1-32 : Formation d'une maille, (Innovation Centre 2009)

1.7.5.2 Éléments de jonction dans la maille cueillie

La structure tricotée, figure (1-33), se compose de séries de colonnes et rangées où la maille (ou la boucle) représente l'unité de construction principale qui se compose d'une tête, deux jambes et deux pieds. Les pieds d'une maille forment avec la tête d'une autre maille les zones de contact, et on a donc 4 zones de contact, 2 sur la tête et 2 sur les pieds de chaque maille.

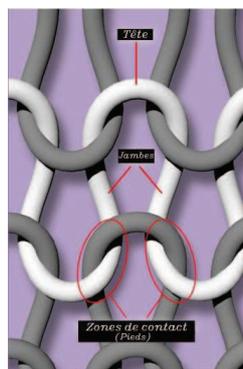


Figure 1-33 : Zones de contact dans une boucle, (Innovation Centre 2009)

1.7.5.3 L'avant et l'envers d'une boucle

Pour une maille la position de ses jambes et ses pieds par rapport aux zones de contact détermine son avant et son envers technique. L'avant technique d'une maille étant définie lorsque ses pieds sont derrière et ses jambes devant, et on dit l'envers technique pour l'inverse, la figure (1-34).

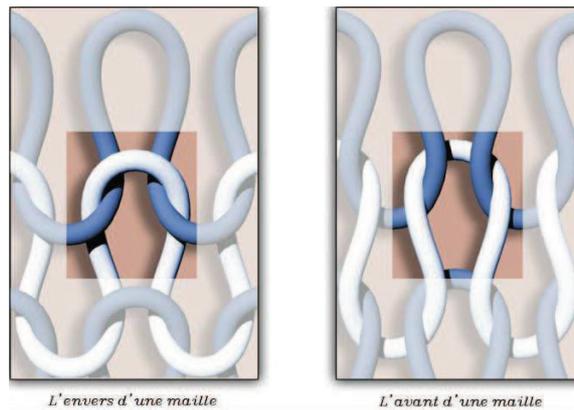


Figure 1-34 : a) Maille d'envers, b) Maille d'endroit (Innovation Centre 2009)

1.7.5.4 Structures de base à maille cueillie

Ce qui suit est une explication de la différence entre les structures tricotées de base à maille cueillie d'un point de vue structurel.

1.7.5.4.1 Jersey

Le tricot jersey, figure (1-35), peut être fabriqué soit sur la fonture avant ou sur la fonture arrière. Nous pouvons aussi utiliser les deux fontures en alternant une rangée de jersey avant suivie par une rangée de jersey arrière : nous obtenons alors un jersey tubulaire (le jersey produit sur la fonture avant est relié à celui de la fonture arrière sur les bords, et le tricot se présente alors sous la forme d'un tube). La structure réalisée est asymétrique : les deux faces sont différentes.

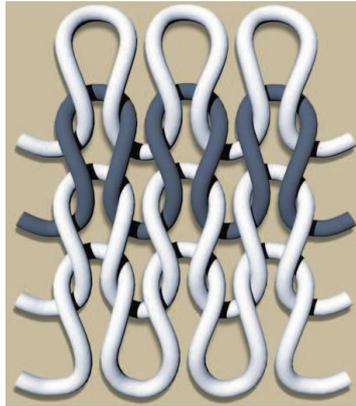


Figure 1-35 : Jersey, (Innovation Centre 2009)

1.7.5.4.2 Côte (1 et 1)

Le tricot côte, figure (1-36), est fabriqué en plaçant les aiguilles en «calage côte ». Les mailles d'une même rangée se forment alternativement sur une aiguille de la fonture avant puis sur une aiguille de la fonture arrière. La structure réalisée est symétrique : les deux faces sont identiques.

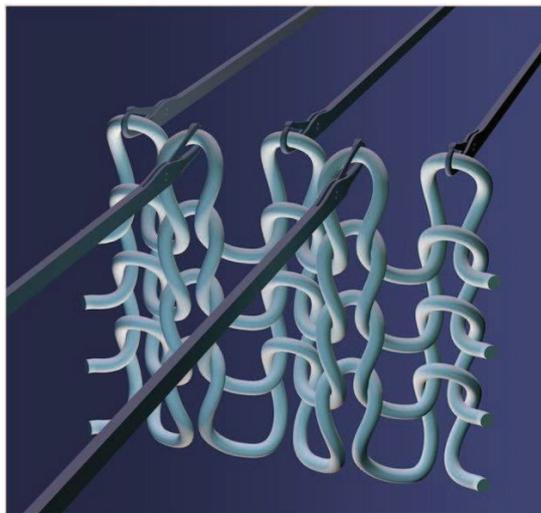


Figure 1-36 : Côte(1 et 1), (Innovation Centre 2009)

1.7.5.4.3 Mailles retournées

Le tricot à mailles retournées, figure (1-37), peut être fabriqué en tricotant sur toutes les aiguilles d'une fonture (soit 1 rangée de jersey), puis en reportant toutes les mailles formées sur les aiguilles vides de la fonture opposée sur laquelle on effectue la rangée de jersey suivante à son tour

reportée sur la fonture de départ et ainsi de suite. Les têtes et les pieds des mailles apparaissent alors en relief, contrairement au jersey classique (sans report) décrit plus haut.

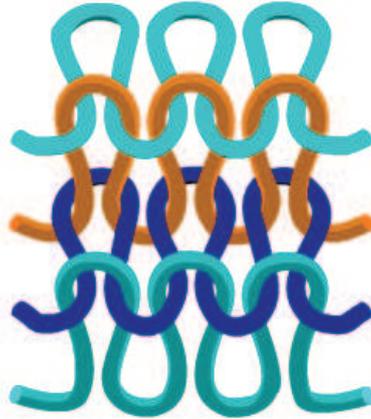


Figure 1-37 : Mailles retournées, (Innovation Centre 2009)

1.7.5.4.4 Interlock

Le tricot interlock, figure (1-38), peut être fabriqué en plaçant les aiguilles face à face. On tricote une aiguille sur deux, avec les aiguilles paires d'une fonture et les aiguilles impaires de l'autre fonture sur une première rangée. Pour la rangée suivante, on inverse la sélection d'aiguilles et on travaille avec les aiguilles complémentaires. Ces deux rangées s'imbriquent l'une dans l'autre. On réitère les deux rangées autant de fois que nécessaire. Il faut veiller à ne pas faire travailler en même temps les aiguilles face à face pour qu'elles n'entrent pas en collision. Cela se fait grâce à la sélection. Dans ce cas, la structure réalisée est symétrique : les deux faces sont identiques.

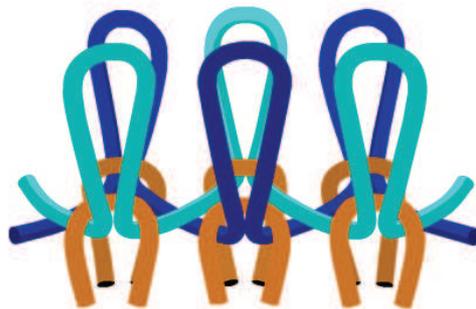


Figure 1-38 : Interlock, (Innovation Centre 2009)

En conclusion, on peut remarquer que l'utilisation des différentes combinaisons de structures de base associées en modifiant les arrangements des aiguilles, permet d'utiliser la machine rectiligne pour fabriquer une variété infinie de structures avec une gamme étonnante d'apparences, de propriétés et de performances.

1.8 Analyse paramétrique des structures tricotées à maille cueillie

La caractérisation mécanique d'une structure tricotée à maille cueillie de type (côte 1 et 1) est l'objet de notre étude. Cette étude mécanique des structures tricotées exige une analyse géométrique et dimensionnelle approfondie afin d'avoir une compréhension globale des origines de leur réponse mécanique variée. L'objectif de ce paragraphe est donc de souligner l'aspect géométrique et dimensionnel des structures tricotées.

Les différences géométriques entre les structures tricotées de base à maille cueillie impliquent principalement un effet d'accordéon dû aux propriétés des boucles. Par sa forme 3D, une boucle n'est pas équilibrée dans la direction des colonnes ou rangées. Par conséquent, les structures tricotées de type « jersey » ont une tendance à s'enrouler vers l'avant dans la direction des rangées. Par contre, l'effet du curling est visible sur l'envers dans la direction de colonnes, figure (1-39). Cet effet est plus important dans la direction de colonnes, et moins important avec les structures équilibrées. L'effet de curling ne concerne pas seulement les structures tricotées de type « jersey », mais peut également s'appliquer aux structures de type « côte », « interlock » et « maille retournée ». Les structures tricotées équilibrées ou non-équilibrées de type « côte » sont plates à l'échelle macroscopique, et chaque groupe de colonnes de boucles s'enroule dans la direction des colonnes. Cela donne donc un effet de plissage en accordéon dans la direction des colonnes, et par conséquent, ce type de structures est plus épais que le type « jersey ». Pour les structures de type « maille retournée », l'effet de curling suit le même mécanisme dans la direction des colonnes. Dans le cas des structures équilibrées de type « Interlock », l'effet de curling dû à un groupe de colonnes dans la direction des colonnes est équilibré par le groupe des colonnes sur le plan arrière, et donc cette structure est plate. D'un point de vue géométrique, ces structures sont similaires aux structures tricotées de type « jersey » lorsque leurs avants et envers sont assemblés.

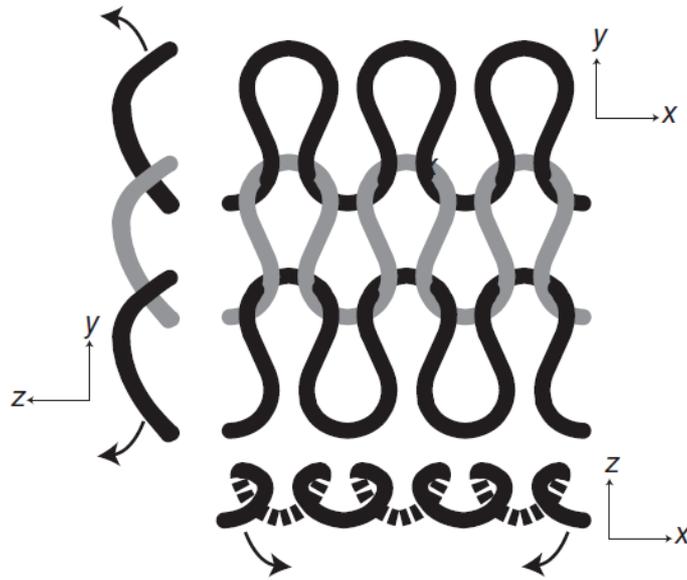


Figure 1-39 : L'effet de curling d'une structure tricotée, (Bueno 2008)

Une autre propriété des structures tricotées à maille cueillie réside dans leur capacité à démailler, c'est-à-dire que les boucles peuvent chuter de la fin de la structure vers son début. En outre, les structures tricotées de type « Jersey » peuvent être démaillées du début à la fin de la structure. Cela n'est pas possible avec les structures de type « côte ou interlock », puisque les boucles de l'avant et de l'envers sont mutuellement bloquées. Si une colonne est adjacente à une autre colonne du même type de boucles (avant ou envers), cette colonne peut être démaillée du début à la fin. Cela peut se produire pour toutes les structures tricotées de type « Côte ou Interlock », sauf (côte 1 et 1) et Interlock (1*1).

En plus de ces caractéristiques structurelles pour différents types des structures tricotées à maille cueillie, il y a d'autres paramètres qui décrivent une structure tricotée comme la longueur et les propriétés de fil absorbé (LFA).

(Doyle 1953) a mentionné que la forme 3D des boucles dépend de la longueur du fil pour chaque boucle. Normalement, les structures tissées sont caractérisées par le nombre de fils par unité de longueur dans les sens de chaîne et de trame. Mais dans le cas des structures tricotées c'est le nombre des colonnes et rangées qui est utilisé en fonction de l'état de la structure, (Munden 1959). Afin de caractériser géométriquement une structure tricotée à maille cueillie, il faut étudier LFA et l'état de structure. Généralement, LFA est un paramètre indépendant de l'état de la structure, et il

peut donc être considéré comme une constante reliée à la structure étudiée, par contre le nombre des colonnes et rangées par unité de longueur est un paramètre à maîtriser.

Afin de caractériser des structures tricotées à maille cueillie d'un point de vue dimensionnel ou mécanique, (Munden 1959) a proposé de considérer la structure tricotée dans un état de relaxation. Après déformation puis relaxation, la structure reprend presque les mêmes dimensions, et on a donc le même nombre de colonnes et de rangées par unité de longueur. Cependant, les tests d'hystérésis effectués sur une structure tricotée avant et après déformation sans relaxation montrent que les courbes (Force-Allongement) sont totalement différentes, et que le comportement mécanique est complètement différent.

Comme décrit ci-dessus, une structure tricotée réalisée est donc le résultat d'un état d'équilibre entre les forces de frottement entre-fils et la rigidité de flexion du fil. Cependant, pendant le tricotage, le processus de finition, ou l'utilisation, la structure tricotée subit des sollicitations de traction dans la direction des colonnes et des rangées. Ces contraintes allongent et aplatissent les boucles, en conséquence, des méthodes efficaces sont requises pour assouplir la structure tricotée effectivement. Les méthodes de relaxation provoquent une rétraction de la structure dans la direction des colonnes et des rangées afin de réaliser la configuration structurelle avec un minimum d'énergie. Le principe de la relaxation conduit donc à réagir contre le frottement entre-maillages généré par les contraintes. Du plus, (Postle & Munden 1967a; Postle & Munden 1967b) et (Knapton et al. 1968b) ont établi des procédés de relaxation différents, dans des environnements sec et humide, avec ou sans vibrations mécaniques externes. Lorsque la procédure de relaxation est importante, la rétraction est supérieure. La rétraction est principalement due au comportement mécanique du fil en termes de la rigidité de flexion dans le domaine élastique, et le frottement entre fils. Une rétraction est réalisée lorsque le frottement entre fils et les forces de flexion sont en équilibre, (Bueno et al. 2004).

Afin d'illustrer ce point, deux structures tricotées sont réalisées avec les mêmes paramètres du tricotage ; la première structure a été effectuée en utilisant un fil souple, et la deuxième a été tricotée en utilisant un fil plus rigide. La rigidité de flexion pour les deux fils est B_f et B_r respectivement, avec $B_f < B_r$. Après relaxation, il y a deux possibilités relatives au frottement entre fils, notés respectivement F_f et F_r . Lorsque $F_r < F_f$, la structure réalisée en utilisant le fil le plus flexible maintient son allongement dans la direction des colonnes et maintient également sa forme aplatie.

Pour la structure réalisée en utilisant le fil rigide, cette structure montre une rétraction dans la direction des colonnes et une extension dans le sens de l'épaisseur. Par conséquent, après une relaxation complète, le fil souple donne une structure tricotée plus mince et plus lisse que le fil plus rigide, (Bueno 2008).

En outre, la forme 3D d'une boucle d'une structure tricotée dans un état de relaxation complet dépend de la tension du système de tirage, (Bueno 2008). Lorsque le fil est plus souple et la force de frottement inter-fil est plus élevée, la structure tricotée est plus sensible à la tension du tirage. Lorsque $F_f < F_r$, la relaxation peut être identique pour les deux structures, et donc, les deux structures ont les mêmes épaisseur et rugosité. La rétraction peut être aussi plus ou moins significative pour la structure réalisée en utilisant le fil souple. Dans ce cas, les différences entre les structures sont moins significatives que dans le cas précédent, et donc, la tension du tirage est moins influente.

Cet effet explique les différences dans la géométrie entre des structures tricotées avec des tensions différentes de tirage, (Knapton et al. 1968a; Knapton et al. 1968b), ou entre des structures tricotées réalisées en utilisant la technique de platine mobile, figure (1-40), ou la technique de tirage conventionnelle (Kurbak & Alpyildiz 2009; Kurbak 2009; Kurbak 1982). Les résultats montrent que la géométrie de la boucle n'est pas la même pour les deux systèmes. Avec le système du tirage, les boucles sont étirées pendant le tricotage. Avec la technique de platine, les boucles sont pressées, mais elles ne sont pas sollicitées dans la direction des colonnes. Plus le fil est rigide, et plus élevé est le coefficient de frottement entre fils, ce qui influence sur la traction lors du procédé sur la structure tricotée. En outre, la valeur de tension du tricotage est plus influente sur la géométrie de la boucle finale et il est plus difficile d'obtenir l'état de relaxation complet.

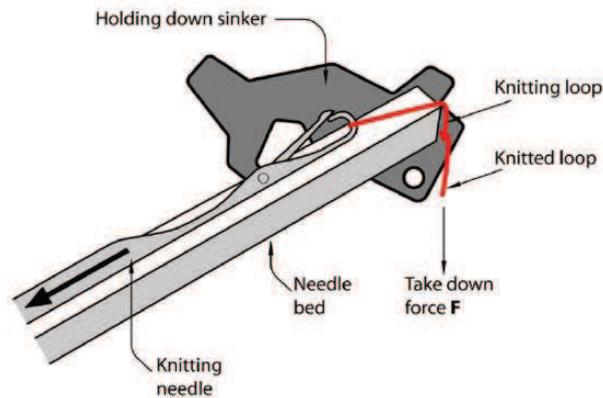


Figure 1-40 : Technologie de platine, (Innovation Centre 2009)

Les lois de Munden (Munden 1959) clarifient la relation entre la géométrie et la longueur de boucle pour la structure tricotée de type « Jersey ». Il a montré pour des structures tricotées dans l'état de relaxation que le nombre des colonnes W et des rangées C sont inversement proportionnels à LFA L :

$$C = \frac{K_c}{L} \quad (1 - 6)$$

$$W = \frac{K_w}{L} \quad (1 - 7)$$

Avec

K_c, K_w : constantes

C : le nombre des rangées par unité de longueur (cm)

W : le nombre des colonnes par unité de longueur (cm)

L : la longueur de boucle

K_c, K_w ont été démontrés dépendant des caractéristiques du fil, y compris la fibre (matériau, finesse, forme de la section transversale), le titre du fil, et la structure de fil du au procédé de tricotage (WJ & R 1970; Bueno et al. 2004; Knapton et al. 1968a; Munden 1959).

Un autre paramètre important pour la forme 3D d'une boucle est la compacité d'une structure. Ce paramètre peut être caractérisé par le facteur de couverture, qui représente le rapport entre l'aire de la projection d'un fil dans la boucle et l'aire de la projection de la boucle sur une surface plane

de la structure tricotée. Afin d'exprimer le facteur de couverture, deux hypothèses sont proposées : la longueur du fil projeté dans une boucle est égal à longueur réelle du fil, et les boucles ne sont pas entrelacées, et donc :

$$F = \frac{L \cdot d}{1/C \cdot 1/W} \quad (1 - 8)$$

Par conséquent, avec les équations (1-6) et (1-7)

$$F = \frac{d \cdot K_c \cdot K_w}{L} \quad (1 - 9)$$

Avec

d : le diamètre du fil (cm)

Le diamètre du fil peut être exprimé par rapport la racine carrée du titre du fil, et donc, nous obtenons ces équations :

$$K = \frac{\sqrt{t_y}}{L} \quad (1 - 10)$$

$$K' = \frac{d}{L} \quad (1 - 11)$$

Avec

t_y : le titre du fil (tex).

F , K ou K' peuvent être comparé pour le même type de boucle et le même fil pour des boucles aux longueurs différentes. En fait, le diamètre du fil est très compressif, et donc, il dépend de la compacité de la structure, figure (1-41). Le diamètre efficace du fil, autrement dit, le diamètre du fil dans une structure, qui est dans un état de relaxation complète, peut donc être pris en compte.

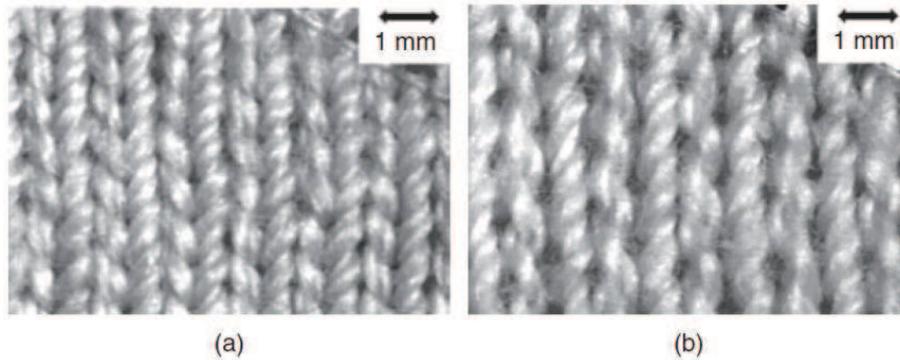


Figure 1-41 : Deux facteurs de couverture pour une structure de type jersey : a) $K=15$; b) $K=10$, (Bueno 2008)

Si la structure tricotée est réalisée en utilisant plusieurs fils dans la même zone, le facteur total de couverture est la somme des facteurs de couverture de chaque fil.

En conclusion, la longueur de boucle est donc un paramètre essentiel pour une configuration. La morphologie du fil (compacité de la structure) est moins importante. De même, les propriétés physiques du fil ont une influence mineure (frottement et flexion), (Munden 1985). Le type de boucle est fondamental pour la géométrie de la structure. Pour la structure tricotée de type « Jersey », une relation a été établie entre C , W , et la longueur de boucle pour certaines structures tricotées à maille cueillie.

Pour des structures tricotées équilibrées ou non-équilibrées, plusieurs chercheurs (ITF-Maille 1976; Postle et al. 1988a; Knapton et al. 1968b) ont montré que les équations de Munden sont utilisables pour des structures tricotées dans un état de relaxation complète. Pour ces structures, la longueur de boucle n'est pas la même pour toutes les boucles, et le nombre des colonnes par unité de longueur peut être difficile à déterminer. La longueur de boucle et W sont donc donnés comme suit :

$$L = \frac{L_u}{m + n} \quad (1 - 12)$$

$$W = n_u \cdot (m + n) \quad (1 - 13)$$

Avec

L_u : la longueur de fil absorbé par unité de répétition de la structure tricotée (cm),

m : le nombre des boucles de colonne sur l'avant dans l'unité de répétition,

n : le nombre des boucles de colonne sur l'envers dans l'unité de répétition,

n_u : le nombre des unités de répétition par unité de longueur (unité/cm)

Certaines structures tricotées complexes de type « côte » ont été étudiées, initialement par Knapton, y compris des boucles de type « charge » (côte perlée) et « flotté ». Les équations de Munden peuvent être utilisées pour la côte perlée, (Knapton et al. 1968b). Pour les structures « piqué Rodier et piqué Wevenit », Knapton a proposé des équations simples où certains paramètres doivent être décrits attentivement. Premièrement, le rapport de « run-in » de la structure doit être défini :

$$r = \frac{L_r}{L_j} \quad (1 - 14)$$

Où :

L_j : la longueur moyenne de boucle dans la structure de type Jersey.

L_r : la longueur moyenne de boucle dans la structure de type Côte.

Deuxièmement, la longueur de l'unité de répétition est définie par la formule :

$$L_u = 2.L_j + 6.L_r \quad (1 - 15)$$

En plus, les nombres de colonne et de rangée par centimètre, respectivement W_u et C_u , doivent être mesurés. C_u est le nombre des cellules unitaires dans la direction de rangée par centimètre, où une unité a besoin de quatre passages du chariot de machine pour les structures « French et Swiss piqué », et W_u est le nombre des cellules unitaires dans la direction de colonne, où une unité a quatre aiguilles (deux aiguilles pour chaque fonture). Donc, pour le rapport de « run-in », (Knapton 1974), les relations entre C_u , W_u et L_u sont similaires aux équations (1-6) and (1-7), (Knapton 1969). Pour ce type des structures, le facteur de couverture est défini comme :

$$\hat{K} = \frac{\sqrt{t_y}}{L_u} . n_{tu} \quad (1 - 16)$$

Avec

n_{tu} : le nombre des aiguilles qui forment les boucles dans l'unité de répétitions, L_u/n_{tu} est la longueur moyenne de boucle.

Pour les structures tricotées de type “Interlock” équilibrées, le nombre des rangées par unité de longueur est proportionnel à I/L ; mais il semble être plus complexe pour le nombre de colonnes par centimètre. En effet, la relation entre W et I/L dépend du fil. Cette relation peut être proportionnelle pour la laine (ITF-Maille 1976; Postle et al. 1988a), ou linéaire pour l’acrylique et le coton (ITF-Maille 1976). Pour des structures tricotées de type «Interlock » complexes comme « Milano », ce cas est presque similaire de la structure de type « Piqué » parce que les équations de Munden peuvent être utilisées pour le rapport de « run-in » donné, mais avec la longueur de boucle de cellule unitaire suivante :

$$L_u = 4.L_j + 4.L_r \quad (1 - 17)$$

Certaines valeurs des K_c , K_w sont données pour différentes structures dans les tableaux (1-6) et (1-7). Pour des structures de base, l’épaisseur de structure peut être évaluée de façon qualitative pour une large gamme de facteurs de couverture en utilisant l’hypothèse suivante : le rapport entre l’épaisseur t et le diamètre effectif de fil dépend essentiellement de type de la boucle, (Knapton et al. 1975; Postle et al. 1988a).

Les équations de Munden pour les structures tricotées de type « jersey » et leur généralisation pour les autres structures tricotée à maille cueillie permettent de calculer le grammage de la structure M d’une manière très simple :

$$M = \frac{K_c \cdot K_w \cdot t_y}{10 \cdot L} \quad (1 - 18)$$

Pour des structures tricotées de type “Interlock » régulières, si K_c , K_w sont donnés pour le nombre des colonnes et rangées d’un seule côté, il faut multiplier la valeur de M obtenu en utilisant l’équation (1-18) par (2). La figure (1-42) montre l’évolution approximative du grammage de la structure relatif au titre de fil et à la longueur de boucle donnée.

Tableau 1-6: Valeurs des K_c et K_w pour certaines structures tricotées à maille cueillie après la relaxation complète (les valeurs correspondent au nombre des colonnes et rangées par cm). Ces valeurs sont expérimentales et numériques. Le rapport entre l'épaisseur de la structure tricotée et le diamètre du fil t/d , (JJF & W 1971; Postle et al. 1988b; ITF-Maille 1976; Knapton et al. 1968b; Postle et al. 1988a).

Structure tricotée	K_w	K_c	t/d
Jersey	4,0 - 4,1	5,3 - 5,7	2,6
(côte 1 et 1)	6,1 - 6,8	4,5 - 5,2	4,4
Côte (2*2)	7,4 - 8,2	4,8 - 5,8	6,5
Côte (3*3)	8,9 - 11,4	4,9 - 5,8	9,4
Côte (4*4)	10,9 - 17,0	5,0 - 5,6	
Côte (5*5)	34,0	5,0	
Côte (1*2)	5,4	4,7	4,4
Côte (1*3)	4,9	4,8	4,4
Côte (1*4)	4,7	4,9	4,4
Côte (1*5)	4,5	4,9	4,4
Côte (1*6)	4,4	4,9	
Côte (2*3)	7,0	4,9	7,5
Côte (2*4)	6,4	4,9	8,4
Côte (2*5)	6,1	4,9	9,4
Côte (2*6)	5,8	5,0	
Côte (3*4)	10,3	4,9	10,9
Côte (3*5)	9,7	5,0	12,4
Côte (3*6)	9,2	5,0	
Interlock (1*1)	4,2 - 5,2 (laine)	4,4 - 5,4	4,1

Tableau 1-7: Les valeurs de K_c et K_w pour certaines structures tricotées complexes à maille cueillie après la relaxation complète et pour différents rapports de run-in, (Knapton 1974).

Structures tricotées	K_w	K_c
French piqué	15,5-16,5	23-28
Swiss piqué	16-17	21-23
Punto-di-Roma	16-17	21-24

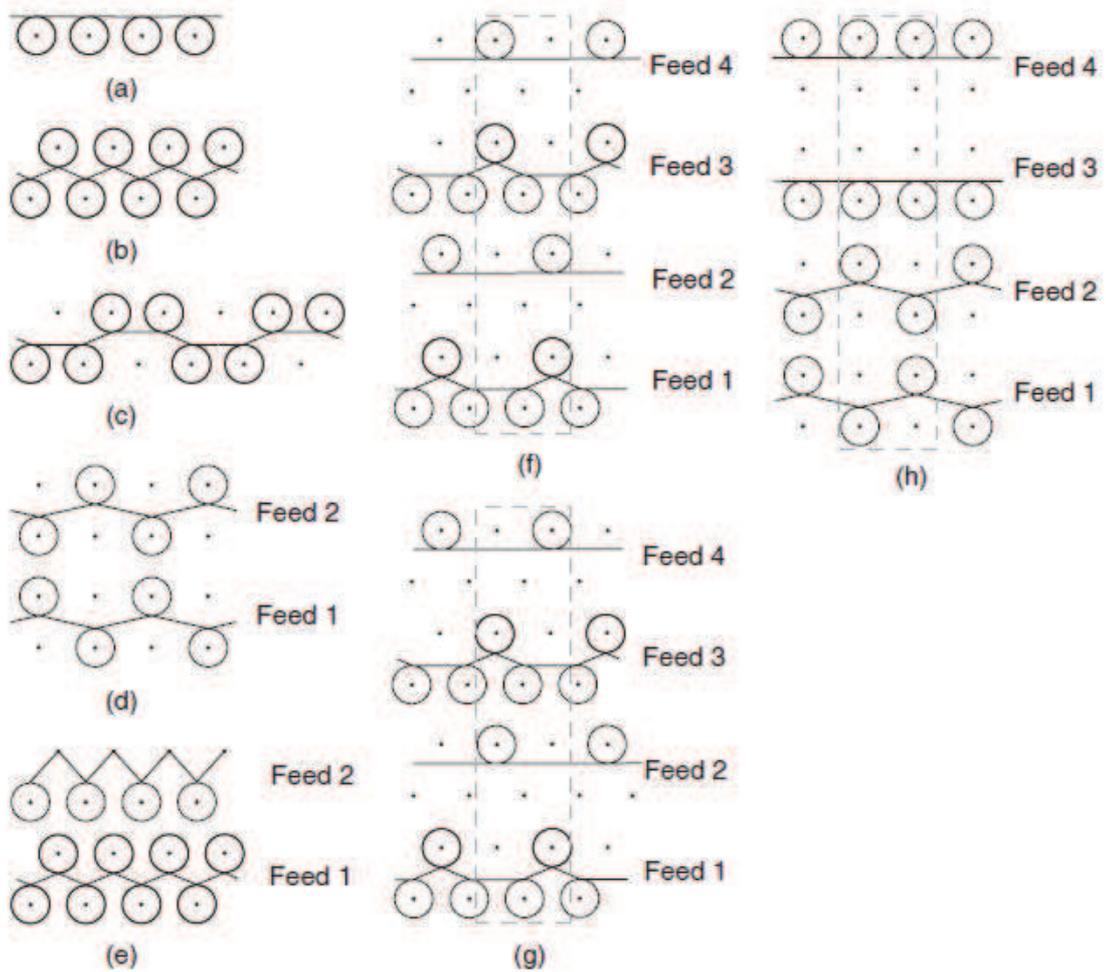


Figure 1-42: représentation schématique des structure tricotées de base à maille cueillie (a) Jersey, (b) côte 1 et 1), (c) côte (2*2), (d) Interlock (1*1), (e) Côte perlée, (f) piqué Suisse, (g) piqué Français et (h) Milano, (Bueno 2008)

1.9 Conclusions du chapitre I

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude bibliographique afin d'aborder les éléments principaux qui influencent le comportement mécanique des structures tricotées à maille cueillie. En suivant l'ordre hiérarchique, la structure tricotée peut être décomposée en fibre, fil et contexture. Au niveau de fibre et de fil, les paramètres qui entrent en jeu sont l'origine (naturelle, synthétique, artificielle), le procédé de fabrication (filage, filature) et le procédé de transformation (retordage, moulinage, guipage, texturation). Par conséquent, la variation d'un de ces paramètres peut être traduite en changement dans les propriétés physiques et mécaniques du fil.

Les propriétés qui nous servent dans notre étude sont : le titre du fil [tex] et la torsion du fil [tour/m] pour les propriétés physiques, alors que le module d'élasticité spécifique [N/tex], la ténacité spécifique [N/tex] et l'allongement à rupture [%]. Au niveau de contexture, la phase de transformation du fil en contexture par la machine à tricoter est le paramètre dominant. Autrement dit, le type de technologie du tricotage (maille cueillie, maille jetée), le type de la machine (rectiligne, circulaire, Rachel, Chaîne), l'arrangement des aiguille (Jersey, (côte 1 et 1), Côte anglaise, Interlock, Milano), la taille des aiguilles, la jauge de la machine, les réglages de came d'abattage, la tension de fil, et la tension de système attracteur sont les paramètres principaux qui influencent une structure tricotée. Par conséquent, la variation d'un de ces paramètres peut modifier les propriétés dimensionnelles et géométriques d'une structure tricotée comme la hauteur (h) et le largeur (b) d'une maille, le fil absorbé par une maille (L_f), l'épaisseur de la structure tricotée (e), la géométrie de la maille, la masse surfacique de la structure tricoté, et la densité surfacique représentée par le nombre des colonnes et rangées par unité de longueur.

Dans notre étude, nous avons élaboré une structure tricotée à maille cueillie de type (côte 1 et 1), le tableau (1-9), à la base de fil acrylique, le tableau (1-8), qui a été réalisé sur une machine rectiligne de jauge (7 et 13). En variant les paramètres mentionnés ci-dessus, nous pouvons analyser leur influence sur le comportement mécanique de la structure tricotée.

Tableau 1-8: Les paramètres du fil utilisé dans notre étude expérimentale

	Fil bleu	Fil gris-blanc
Type	Acrylique	Acrylique
Titre de fil (tex)	174	173
Torsion (T/m) (S)	150	152
E_{sp} (N/tex)	1,37	1,37
σ_{sp} (cN/tex) _{max}	9,5	10,22
Allongement à la rupture (%)	22,9	23,6

Tableau 1-9: Les paramètres de la structure tricotée utilisée dans notre étude expérimentale

	(côte 1 et 1) [bleu]	(côte 1 et 1) [gris-blanc]
Nombre des colonnes par 10 cm	64	74
Nombre des rangées par 10 cm	45	46
Masse surfacique $m_{stricot}$ (g/m ²)	520,5	604,1
Épaisseur (e) mm	3,3	3,4
Hauteur de maille (h) mm	2,22	2,17
Largueur (b) mm	1,56	1,35
longueur du fil absorbé par une maille (L_f) mm	10,6	10,3
Jauge de la machine	7	13

2. CHAPITRE II : Comportement mécanique membranaire d'une structure tricotée

2.1 Introduction

Dans ce deuxième chapitre, nous nous intéressons par une analyse expérimentale à la réponse mécanique d'un renfort tricoté de type (côte 1 et 1) à des sollicitations membranaires, afin de faire le lien avec la mise en forme de ce type de renfort dans le troisième chapitre.

A cet effet, une analyse bibliographique est utilisée pour mettre en évidence les études du comportement mécanique conduites sur des renforts secs (tissus & tricots) dans le plan et les méthodes de mesures adoptées.

Cette étude bibliographique est suivie d'une série d'études expérimentales sur machine de traction uni axiale effectuées sur des éprouvettes tricotées à base de fil acrylique et avec une structure de type (côte 1 et 1). Des méthodes optiques sont utilisées pour accéder à des informations sur les déformations de la structure lors des essais de traction réalisés.

2.2 Comportement mécanique membranaire dans un renfort sec

On distingue deux comportements mécaniques membranaires dans un renfort sec : le comportement en traction dans les sens chaîne et trame pour une structure tissée où dans les sens colonne et rangée pour une structure tricotée, et le comportement en cisaillement. Pour déterminer ces comportements il faut faire des campagnes d'essais mécaniques sur des éprouvettes en respectant les normes en vigueur pour chaque type d'essai pour autant que de telles normes existent. L'intérêt d'étudier le comportement des renforts secs est de déterminer les paramètres qui l'influencent lors de phase de préformage du renfort textile pendant les procédés de fabrication des matériaux composites, notamment le procédé d'RTM (Resin Transfer Moulding) (Bickerton et al. 1997; Boisse 2004; Kalpakjian & Schmid 2013; Potter 1999), figure (2-1). Les mécanismes de déformation générés dans le renfort sec lors de la mise en forme sont complexes tels que des déformations biaxiales, des déformations de cisaillement dans le plan ainsi que des déformations de flexion hors-plan et de compaction transverse (Badel et al. 2007). L'importance d'étudier le comportement membranaire du renfort textile vient de réalité que le comportement en tension dans la direction des renforts a longtemps été le seul considéré lors des modélisations du comportement en raison de sa prépondérance relativement aux autres rigidités (Boisse et al. 2001; Gasser et al.

2000), où la forte rigidité longitudinale des fibres est une caractéristique primordiale des matériaux fibreux, renforts des composites. Le cisaillement dans le plan (Long 2007) est le mécanisme clé de la déformation des tissus, notamment ceux à fibre de forte rigidité, pour l'obtention des formes 3D. Notons que la rigidité en flexion du tissu est généralement négligée par rapport aux rigidités dans les autres directions du fait des très faibles sections des filaments constituant les mèches (le diamètre des filaments est approximativement de 6 μm). Ceci est d'autant plus vérifié pour les tissus de faible épaisseur (Bel 2011; de Bilbao et al. 2010). L'influence de la prise en compte de la compaction des renforts secs lors de l'étape de préformage est un sujet bien moins présent dans la littérature (Nguyen 2011).

Plusieurs études sont effectuées sur le comportement membranaire des renforts tissés (Buet-Gautier & Boisse 2001; Cao et al. 2008; Harrison et al. 2004; Charmetant et al. 2010; Dridi 2010; Dumont et al. 2003; Gu 2007; Kawabata et al. 1973; Lomov et al. 2008; Mohammed et al. 2000; A.G. Prodromou & Chen 1997; Willems et al. 2008; Badel et al. 2007; Boisse et al. 2001). Alors que, peu d'études sur le comportement membranaire des renforts tricotés (Balea 2011; de Araújo et al. 2003; Duhovic 2004; Luo & Verpoest 2002). Pour cette raison, ce chapitre est dédié à la caractérisation du comportement membranaire des renforts tricotés qui influence les propriétés mécaniques des matériaux composites (Leong et al. 1999).

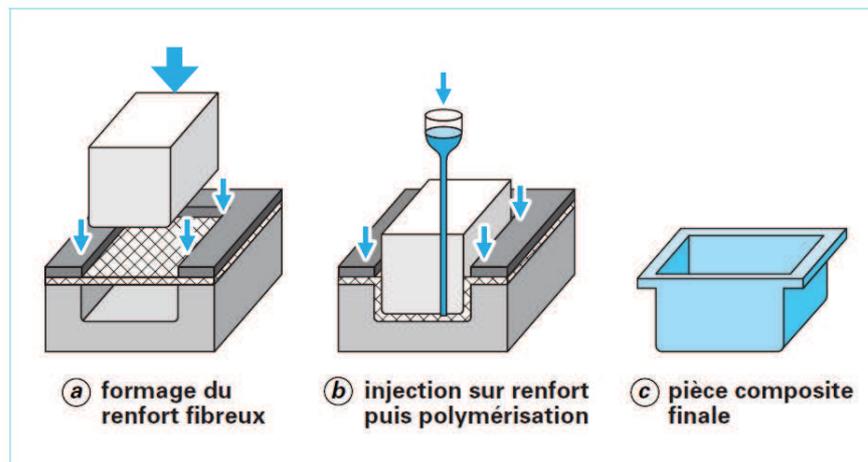


Figure 2-1: Les principales étapes du procédé RTM, (Boisse 2004)

2.2.1 Comportement en traction

2.2.1.1 Introduction

L'essai de traction sur un renfort sec sert à quantifier ses caractéristiques en traction, et donc l'évolution de sa rigidité. Cette mesure se fait par la mise sous tension d'une éprouvette (tissu ou tricot) en la sollicitant en traction. Les propriétés mécaniques (force – allongement) du renfort sec varient selon l'orientation des mèches dans le tissu ou pour un tricot selon l'orientation des colonnes et des rangées relativement à l'effort de traction. Afin de réaliser la mesure force-allongement, on distingue deux types d'essais : traction uniaxiale et traction biaxiale.

2.2.1.2 Traction uniaxiale

Les propriétés en traction sont l'une des caractéristiques prédominantes qui influencent la performance mécanique des structures textiles pendant leur utilisation dans les applications techniques. L'étude du comportement mécanique en traction est complexe car les structures textiles sont très fines relativement à leurs dimensions dans le plan. D'une manière hiérarchique, La structure textile (macro échelle) est construite par des fibres (micro échelle) et fils (mésos échelle), et donc toute légère déformation de la structure textile provoquera une série de déformations complexes aux autres échelles.

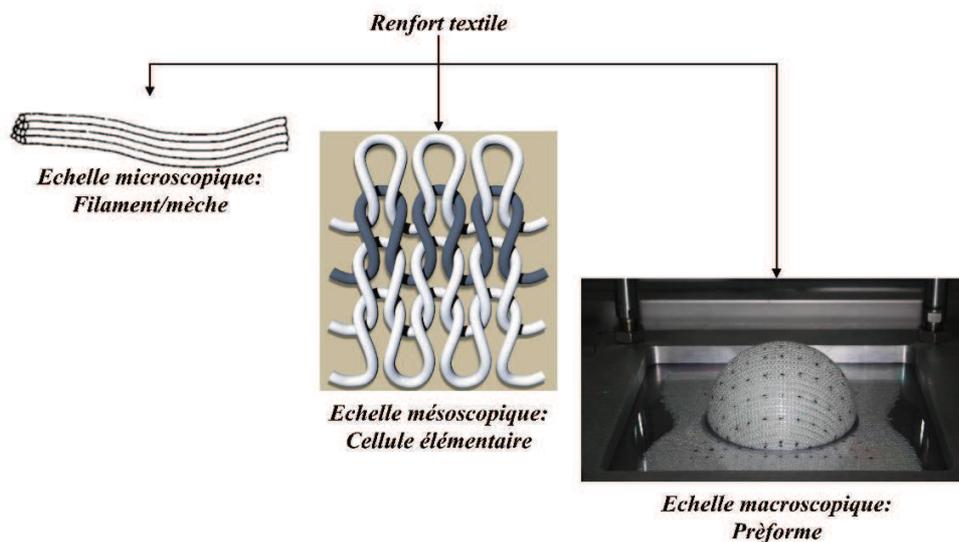


Figure 2-2: Aspect multi échelle de la structure tricotée

Les travaux réalisés sur les renforts tricotés montrent que l'allure générale des courbes de traction uniaxiale est identique indépendamment de la nature de la fibre, la contexture, ou la direction de sollicitation appliquée (Balea 2011; de Araújo et al. 2003). Cette allure est fortement non linéaire et influencée par plusieurs paramètres. Afin d'avoir une bonne compréhension de ces paramètres, et notamment sur le comportement des boucles pendant un essai de traction uniaxiale, l'analyse d'une courbe de traction uniaxiale d'une structure tricotée montre qu'elle peut-être divisée en deux phases principales. Une phase structurale et une phase dite de milieu continu, figure (2-3), où la transition entre les deux phases se fait par un point critique nommé point de blocage, (de Araújo et al. 2003).

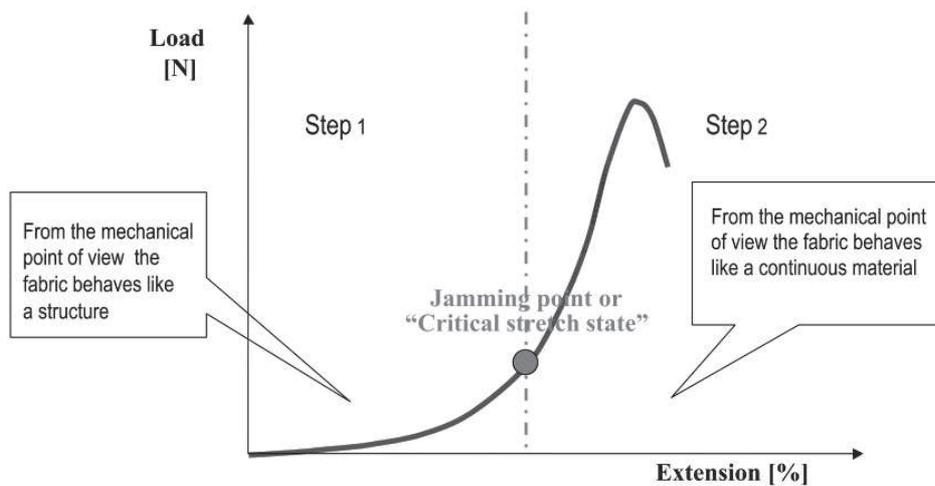


Figure 2-3 : Courbe de traction uniaxiale d'une structure tricotée, (de Araújo et al. 2003)

La courbe de traction uniaxiale, figure (2-3), montre que le processus de déformation peut être divisé en deux phases : dans la première phase, la déformation de la structure tricotée est essentiellement due au changement de la configuration des boucles. Les fils glissent avec frottement aux zones de contacts, alors que le diamètre du fil diminue par la compression locale. Ce processus continue jusqu'au blocage, ce qui est un état hypothétique de la déformation. D'un point de vue mécanique, dans cette phase initiale de déformation, le tricot se comporte comme une structure plus qu'un milieu continu. La définition de module Young de la structure se heurte à certains obstacles théoriques. Puisque la déformation est non linéaire, la loi de Hooke ne peut pas être vérifiée. Et donc, il n'est pas possible de considérer un module de Young. Cependant, le terme

de rigidité ou « rigidité de traction » peut être utilisé pour décrire et comparer le comportement mécanique de différentes structures tricotées. La rigidité est liée à la rigidité de flexion du fil utilisé (G_0), et alors que la longueur de boucle augmente (par conséquent, le rayon de courbure du fil (R) augmente également), le moment de flexion ou le couple (B) diminue et vice versa. Afin de maintenir la rigidité de flexion du fil constante, une formule approximative pour le cas d'une section transversale circulaire du fil, (de Araújo et al. 2003).

$$G_0 = B \times R = \frac{\pi d^4 E}{64} \quad (2 - 1)$$

Avec :

d : le diamètre du fil.

E : module de Young du fil

La deuxième phase est caractérisée par la déformation du fil dans la structure lorsque la charge se transfère directement au fil. Lorsque l'effort augmente, la section transversale de la structure tricotée devient plus compacte. Même si l'effet structurel de la structure tricotée est encore présent, cela peut être ignoré car il est moins important dans le processus de déformation, (de Araújo et al. 2003).

(Balea 2011) a proposé une interprétation du comportement générale d'un tricot sec à maille cueillie sur traction uniaxiale, où elle a divisé la courbe de traction uniaxiale en 5 phases afin d'avoir un regard approfondi sur le comportement complet de la structure tricotée de début de la traction jusqu'à rupture, figure (2-4). Les deux premières phases correspondent à la phase structurelle, la troisième phase correspond à la phase transitoire (point de blocage ou de la déformation critique), et les deux dernières phases à un comportement de milieu continu, ci-dessous, nous parcourons ces phases en détail :

1. Phase (1) : Au début de l'essai, les boucles glissent les unes par rapport aux autres et le début de la courbe correspond au frottement entre les fils des boucles adjacentes.

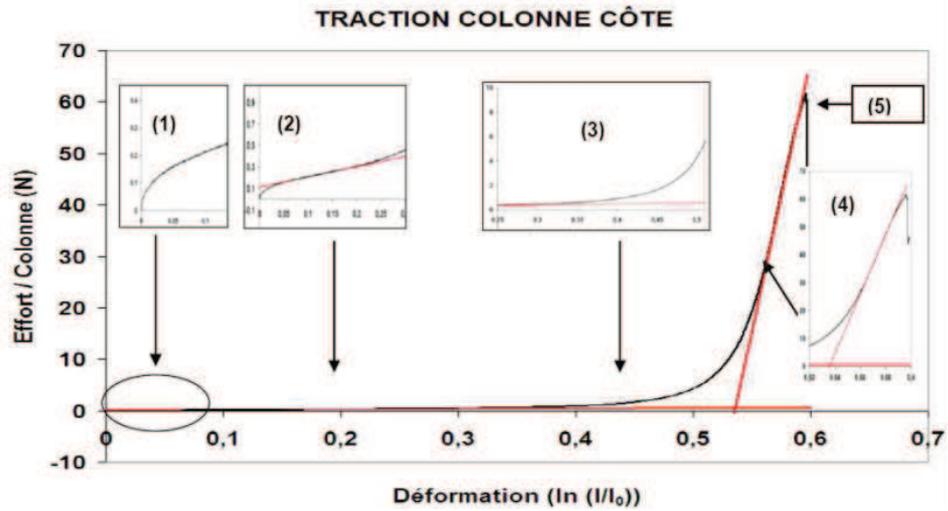


Figure 2-4 : Comportement général d'un tricot sec sur traction uniaxiale, (Balea 2011)

2. Phase (2) : La deuxième partie de la courbe représente une linéarité de pente faible qui correspond à une grande déformation sous de faibles charges. Cette phase reflète le comportement structural du tricot où la déformation est due à un changement dans la configuration de boucle. La boucle s'allonge dans la direction de sollicitation et rétrécit dans la direction transverse. Les boucles glissent entre elles avec frottement au niveau des zones de contact. La boucle est essentiellement soumise à des efforts de flexion du fil. Selon la direction de chargement appliquée, nous distinguons la traction colonne, lorsque les têtes et pieds des boucles se courbent au niveau des zones de contact tandis que les jambes se tendent. En traction rangée, les têtes et pieds des boucles se tendent, les boucles glissent entre elles et la zone de contact entre les boucles adjacentes se déplace des pieds vers les jambes des boucles, figure (2-5).

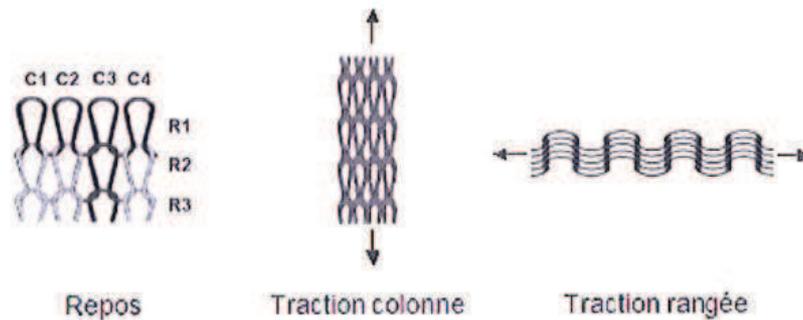


Figure 2-5 : Traction dans la direction colonne et rangée, (Balea 2011)

3. Phase (3) : La troisième phase de courbe de traction uni axiale correspond à la phase transitoire entre la déformation structurelle et la déformation dite de milieu continu lorsque la charge se transfère aux fils, figure (2-6). Le début de cette phase dépend de la direction de traction, en traction colonne, lorsque les pieds de la boucle entrent en contact, et en traction rangée, lorsque les pieds de boucle d'une rangée entrent en contact avec la tête de la boucle de la rangée suivante. Dans les deux cas la structure tricotée continue de se comporter comme une structure et elle s'agrandit dans la direction de sollicitation. Les boucles glissent entre elles et la forme de la section du fil se modifie et s'aplatit avec une réorganisation des fibres dans le fil sous l'effet de compression locale, ce que se traduit par une augmentation de la rigidité macroscopique de la structure tricotée.

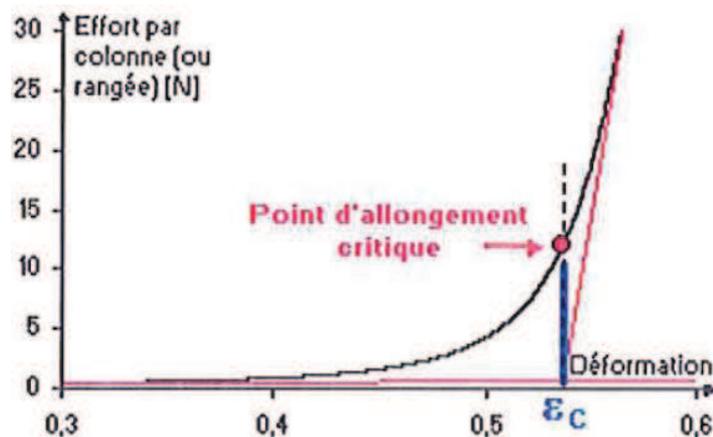


Figure 2-6 : La phase transitoire : point de la déformation critique, (Balea 2011)

4. Phase (4) : Cette partie de la courbe de traction représente une phase linéaire avec une augmentation rapide de la charge sous faible accroissement de déformation. La boucle est complètement bloquée et les efforts sont transférés aux fils qui sont alors sollicités en traction au niveau des jambes des boucles, et en cisaillement au niveau des zones de contact entre les boucles adjacentes. Cette phase représente le début de la déformation physique de matériau, figure (2-7).

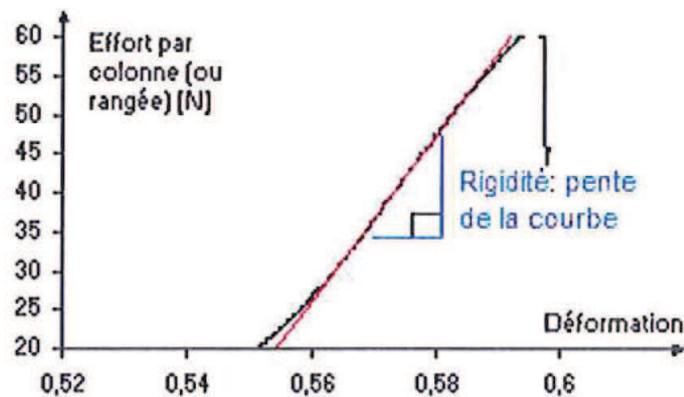


Figure 2-7 : La phase (4): une déformation physique du matériau, (Balea 2011)

5. Phase (5) : Dans la dernière phase nous remarquons la perte de linéarité due à l'endommagement successif des fils. Cette phase amène à la rupture finale qui a lieu par cisaillement aux zones de contact des boucles adjacentes et provoque le démaillage de la structure tricotée, figure (2-8).

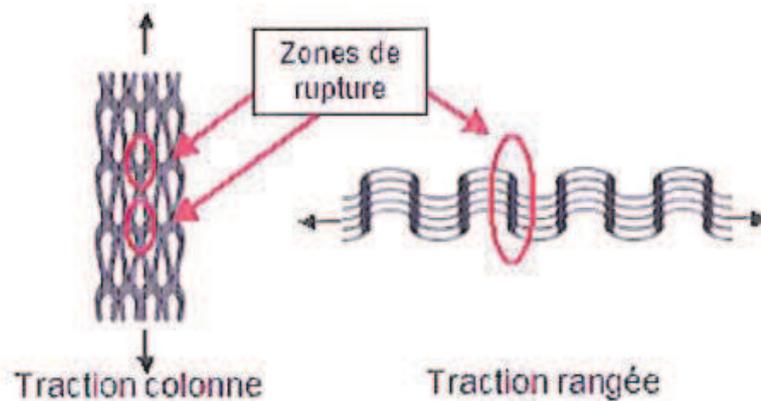


Figure 2-8 : Zones de rupture d'une structure tricotée simple, (Balea 2011)

Le comportement général de la structure tricotée nous aide à déduire que, figure (2-9) :

1. Afin d'augmenter la rigidité des structures tricotées, et ainsi leur capacité à résister la déformation due à la charge appliquée, nous avons besoin des techniques de pré-tension ou de l'insertion des fils droits dans la structure tricotée dans des différentes orientations.
2. Afin d'augmenter la résilience des structures tricotées, et ainsi leur capacité à absorber l'énergie, nous avons besoin de boucles relaxées et extensibles.

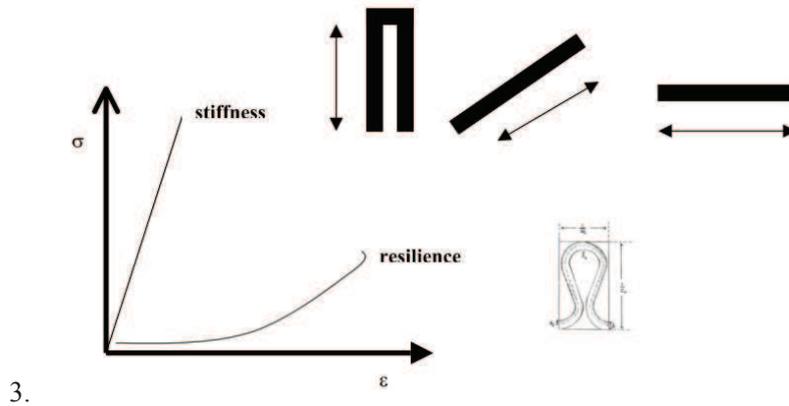


Figure 2-9 : Conception une structure tricotée pour des propriétés particulières, (de Araújo et al. 2003)

L'essai de traction uni-axial est effectué en utilisant une machine de traction en respectant la norme. Cet essai permet d'analyser des courbes de comportement mécanique des structures textiles (tissées, tricotées).

La figure (2-10) montre une comparaison du comportement en traction uni axiale pour des renforts tissés et tricotés (colonne et rangée), (Balea 2011). On peut y voir la variation du comportement mécanique selon le type du renfort et la direction de la force appliquée. Pour le renfort tissé, on remarque la réponse directe de la structure tissée dès le début de l'essai où la charge est reprise directement par des mèches. Par contre, on remarque une réponse plus tardive de la structure tricotée, dont le comportement mécanique peut être décomposé en deux phases principales : la première qui correspond à la déformation structurelle caractérisée par une déformation importante sous faible charge, la deuxième qui correspond à la reprise de la charge par les fils. Pour cette structure tricotée, on remarque bien la variation de la déformabilité selon la direction de la sollicitation appliquée (rangée ou colonne).

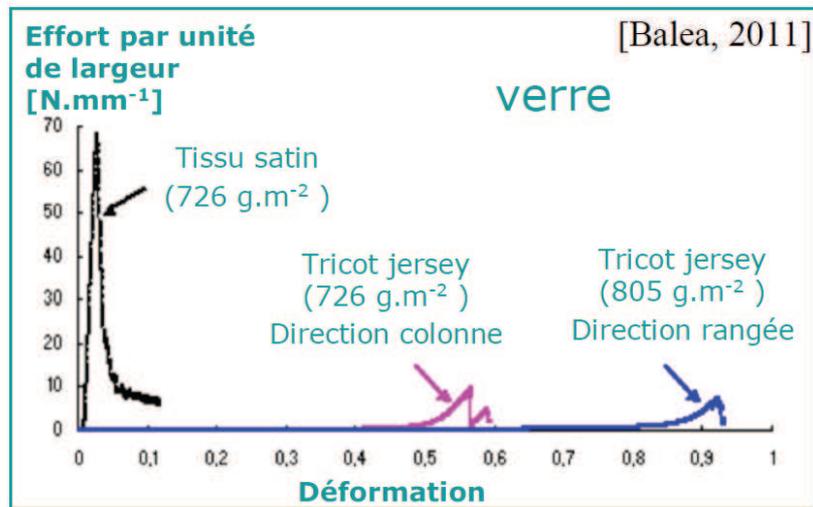


Figure 2-10 : Traction uniaxiale (tissu VS tricot), (Balea 2011)

2.2.1.3 Traction Bi axiale

Les tests de traction bi axiale sont utilisés pour caractériser l'influence en traction d'une direction sur l'autre dans les structures entrelacées en traction (i.e. chaîne/trame pour une structure tissée et colonne/rangée pour une structure tricotée). Les fils étant ondulés par ces entrelacements, le comportement bi axial, membranaire, traduit également, par le rapport de déformation imposé dans chacune des deux directions l'écrasement dû à ces ondulations. En raison de ces mécanismes de déformation, le comportement en traction dans une direction de fil est affecté par la charge imposée dans l'autre sens du fil. Le test bi axial, introduit par (Kawabata et al. 1973), et développé et appliqué par, entre autres (Buet-Gautier & Boisse 2001; Lomov et al. 2005), impose un effort de traction dans les deux directions principales de la structure textile. La variation de charge bi axiale est réalisée en faisant varier le rapport de la force ou le rapport de déplacement dans les deux directions. Ce comportement bi axial est étudié principalement pour les structures tissées, où les fils sont droits, par contre pour les structures tricotées il y a moins de travaux dans la littérature (Luo et Verpoest, 2002; Postle, 2002).

Ce test est réalisé sur des machines spécifiques permettant de faire des essais de traction sur des structures tissées, figure (2-11), et tricotées, figure (2-13), dans les deux directions simultanément. Le dispositif utilisé est composé de deux ensembles d'actionneurs qui peuvent fournir indépendamment des déplacements avec des vitesses différentes selon les deux directions de chargement (Buet-Gautier & Boisse 2001; Hivet & Boisse 2008; Launay et al. 2008; Cao et al. 2008). Les mesures de déformations sont faites soit par des méthodes optiques, soit par des systèmes mécaniques.

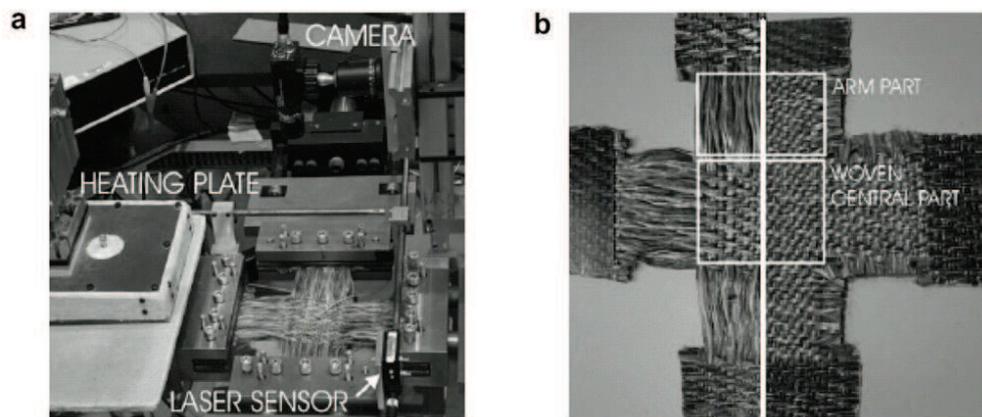


Figure 2-11 : a) Machine de traction biaxiale; b) Eprouvette, (Lomov et al. 2008)

La figure (2-12) présente les résultats d'un essai de traction biaxiale sur un tissu équilibré, le sergé 2x2 de carbone avec différents rapports de bi-axialité k , (Buet-Gautier & Boisse 2001) :

$$k = \frac{\varepsilon_{Chaine}}{\varepsilon_{Trame}} \quad (2 - 2)$$

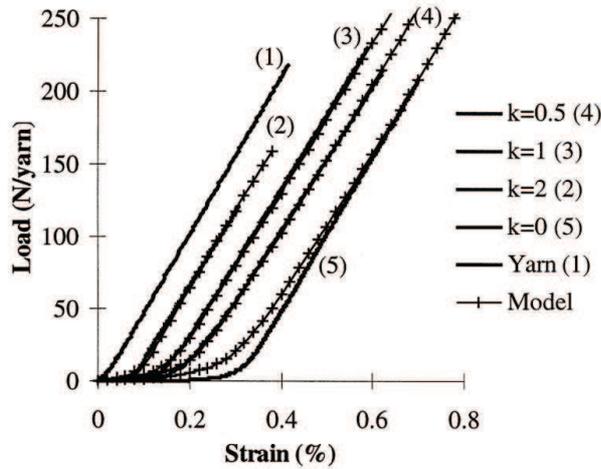


Figure 2-12 : Courbes de traction biaxiale d'une structure tissée, (Buet-Gautier & Boisse 2001)

Ces résultats expérimentaux montrent le comportement non linéaire d'une structure tissée, bien que celui des mèches seules soit linéaire. On remarque que les non linéarités sont observées aux faibles efforts, et que le comportement devient linéaire aux efforts plus importants. La partie linéaire du comportement est caractérisé par une rigidité proche de celle des mèches seules en traction (courbe 1).

Des chercheurs ont réalisé un test de traction biaxiale sur des structures tricotées, (Luo & Verpoest 2002), en utilisant le dispositif de la figure (2-13), où la structure tricotée est soumise au taux de déplacement λ constant colonne/rangée :

$$\lambda = \frac{\dot{d}_w}{\dot{d}_c} \quad (2 - 3)$$

Avec \dot{d}_w, \dot{d}_c les taux de déplacement dans la direction des colonnes et rangées respectivement.

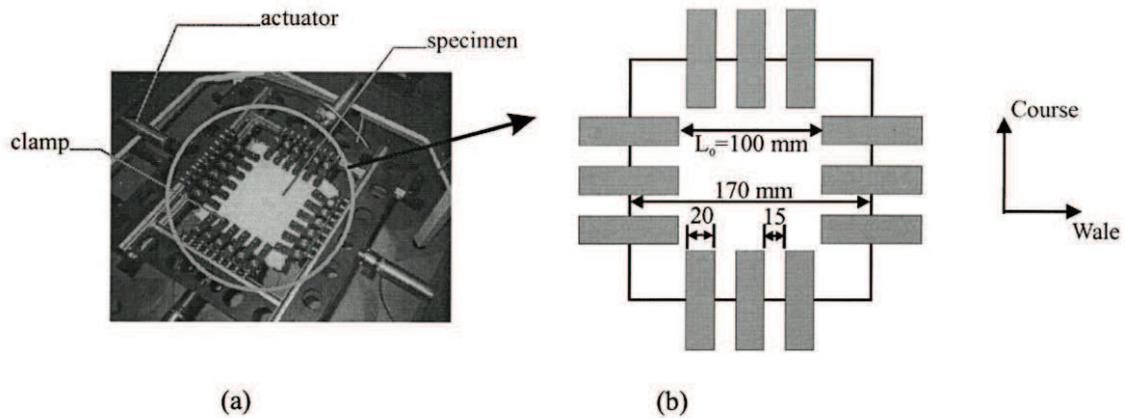


Figure 2-13 : a) Machine de traction biaxiale ; b) Eprouvette, (Luo & Verpoest 2002)

Ces résultats d'essais en traction biaxiale d'une éprouvette initialement carrée de côtés L_0 sont présentés par des courbes (force membranaire – déformation logarithmique), où la force membranaire et la déformation logarithmique sont déduites des forces et déplacements mesurés en utilisant les expressions suivantes :

$$f_c = \frac{F_c}{L_0 + d_w} \quad f_w = \frac{F_w}{L_0 + d_c} \quad (2 - 4)$$

$$\epsilon_c = \ln \frac{L_0 + d_c}{L_0} \quad \epsilon_w = \ln \frac{L_0 + d_w}{L_0} \quad (2 - 5)$$

Avec f est la force membranaire, ϵ est la déformation linéique logarithmique, L_0 est la dimension initiale de l'échantillon carrée (voir figure (2-13)). Les indices c et w désignent la direction de rangées et de colonnes respectivement.

Une courbe typique est présentée dans la figure (2-14). Cette courbe peut être divisée en deux parties : glissement et blocage. La phase de glissement correspond à la restauration de l'alignement de fils bouclés qui glissent les uns sur les autres. Pendant cette phase, la force membranaire est faible, et elle provient du frottement et la flexion des fils entre eux. Dans la phase de blocage, les fils sont bloqués progressivement aux points de croisement, et la force augmente rapidement en fonction de la déformation. Dans cette phase, la force membranaire provient principalement de la

flexion excessive de fils au moment du blocage et de la résistance de fils à la traction. Par conséquent, la rigidité de la structure tricotée représentée par la pente de la courbe augmente progressivement jusqu'à rupture. Pendant l'essai, il n'est pas possible d'atteindre la déformation sous charge maximale dû à la rupture prématurée autour des pinces. Afin d'estimer cette déformation, une formule a été proposée par (Luo & Verpoest 2002) pour ajuster la courbe jusqu'à rupture :

$$f_i = \psi_1 + \frac{\psi_2 \epsilon_i}{1 - \psi_3 \epsilon_i} \quad (i = c, w) \quad (2 - 6)$$

Avec ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 des paramètres d'ajustement. La figure (2-14) montre que la courbe est parfaitement ajustée, avec une rigidité de la structure tricotée augmentant en fonction de la déformation. Par conséquent, la formule ci-dessus décrit le comportement biaxial de la structure tricotée de manière appropriée. En outre, lorsque ϵ approche de $1/\psi_3$, f approche de l'infini. Et donc, on peut utiliser $1/\psi_3$ comme une bonne estimation de la déformation sous charge maximale. Cet ajustement est effectué dans les deux directions.

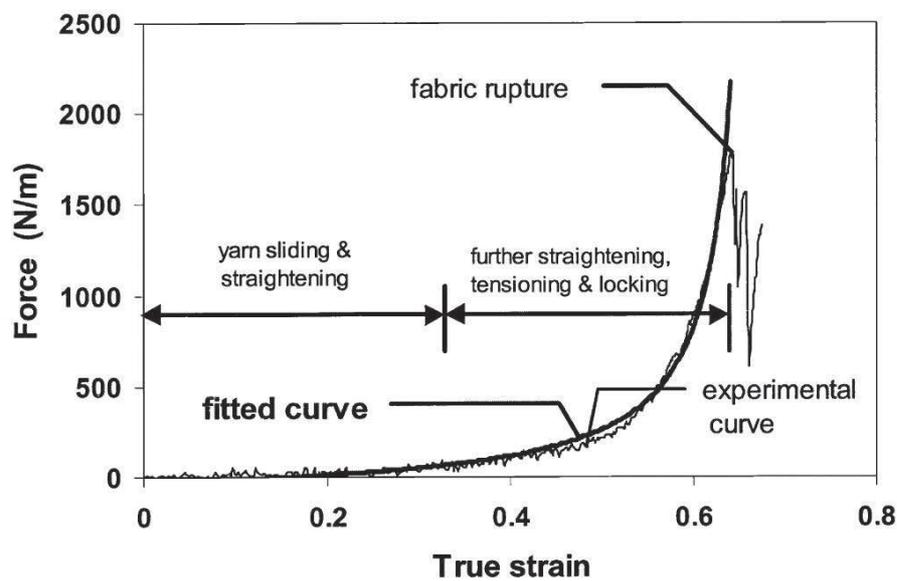


Figure 2-14- Courbe de traction biaxiale (Force membranaire - Déformation logarithmique), (Luo & Verpoest 2002)

Les valeurs de $1/\psi_3$ aux différents taux de déplacement pour deux structures tricotées (côte 1 et 1) et Milano sont résumées dans le tableau (2-1). Ces valeurs servent à tracer les limites de la déformation dans la figure (2-14).

Tableau 2-1- Les valeurs de $1/\psi_3$ aux différents taux de déplacement pour deux structures tricotées (côte 1 et 1) et Milano, (Luo & Verpoest 2002)

Displacement ratio	Rib		Milano	
	Course	Wale	Course	Wale
Infinity	0	0.640 (0.046)	0	0.516 (0.029)
10	0.084 (0.007)	0.630 (0.040)	-	-
5	0.153 (0.013)	0.613 (0.035)	-	-
2	0.324 (0.011)	0.571 (0.014)	0.219 (0.013)	0.398 (0.010)
1	0.524 (0.036)	0.528 (0.037)	0.324 (0.013)	0.322 (0.013)
0.5	0.712 (0.024)	0.408 (0.023)	0.413 (0.013)	0.227 (0.008)
0	1.244 (0.035)	0	0.537 (0.025)	0

On remarque que la structure tricotée (côte 1 et 1) est plus déformable que Milano. La déformation bi axiale des deux structures tricotées est anisotrope, notamment pour la côte, qui est plus déformable dans la direction de rangée. Cela est dû à la particularité de la structure tricotée (côte 1 et 1). Des tests de traction bi axiale supplémentaires ont été effectués sur une structure tissée (glass 4-harness satin) et la courbe de la déformation sous charge maximale est tracée dans la figure (2-15). On remarque que la structure tissée montre une déformabilité faible sous tension bi axiale, par contre, les structures tricotées montrent une déformabilité beaucoup plus importante dans les mêmes conditions.

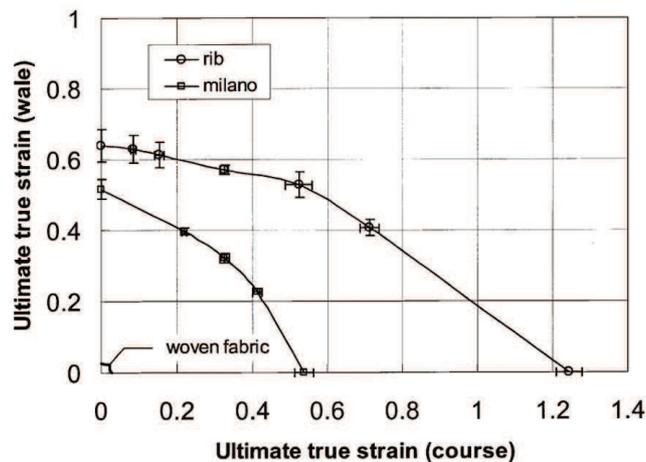


Figure 2-15- Courbes de la déformation sous charge maximale, (Luo & Verpoest 2002)

2.2.2 Comportement en cisaillement plan

2.2.2.1 Introduction

L'évaluation de la déformabilité de textile se base principalement sur les caractéristiques membranaires comme la résistance de cisaillement et la tension bi axiale. Il n'y a pas de méthodes de test normalisées, malgré les efforts effectués afin de comprendre et comparer les procédures de test de cisaillement, (Dumont et al. 2003; Harrison et al. 2004; Peng et al. 2004; Cao et al. 2008). La caractérisation du comportement en cisaillement reçoit le plus d'attention car c'est un mode de déformation dominant lors de la mise en forme des renforts secs (Boisse et al. 2011; Long 2007). La résistance de cisaillement initiale est très faible, tant que le frottement aux zones de contact entre les fils est dominant. Aux angles de cisaillement plus importants, les fils au niveau d'une maille élémentaire sont bloqués et une force de compression s'accroît, conduisant à une forte augmentation de la résistance, des plis, au sens de déformations hors-plan du tissu, peuvent alors se créer, (Amirbayat 1980; Boisse et al. 2011). Deux méthodes de test de cisaillement sont couramment utilisées : un test de traction dit de « bias-test » (c'est à dire un essai de traction uni axiale dans les directions des mèches positionnées à $\pm 45^\circ$ par rapport à la direction de traction), et un test dédié au cisaillement, noté «Picture Frame» qui nécessite l'utilisation d'un cadre de cisaillement.

2.2.2.2 Méthodes utilisées

Tests « Bias Extension »

Cette méthode est couramment utilisée pour caractériser le comportement en cisaillement du renfort tissé pour sa simplicité de mise en œuvre, (Johnson 1995; A. G. Prodromou & Chen 1997). Pendant cet essai, les fils de chaîne et de trame de l'éprouvette sont orientés à 45° par rapport à la direction de la force de traction. L'échantillon est fixé par l'un des extrémités et attiré par l'autre. L'éprouvette est découpée tel que le rapport λ =longueur/largeur soit supérieur ou égal 2, (Potter 2002; Wang et al. 1998).

Pour interpréter le comportement en cisaillement selon cette méthode, on adopte les deux hypothèses suivantes :

- La déformation est homogène par partie,
- Pas d'élongation des fils pendant la déformation.

Trois zones apparaissent dans l'éprouvette déformée présentées dans la figure (2-16, b) ; un cisaillement pur a eu lieu dans les zones **B** et **C**. L'angle de cisaillement dans la zone **B** est la moitié de celui dans la zone **C**. Par contre, la zone **A** reste indéformable durant le test, (McGuinness & ÓBrádaigh 1997; Zhu et al. 2007b).

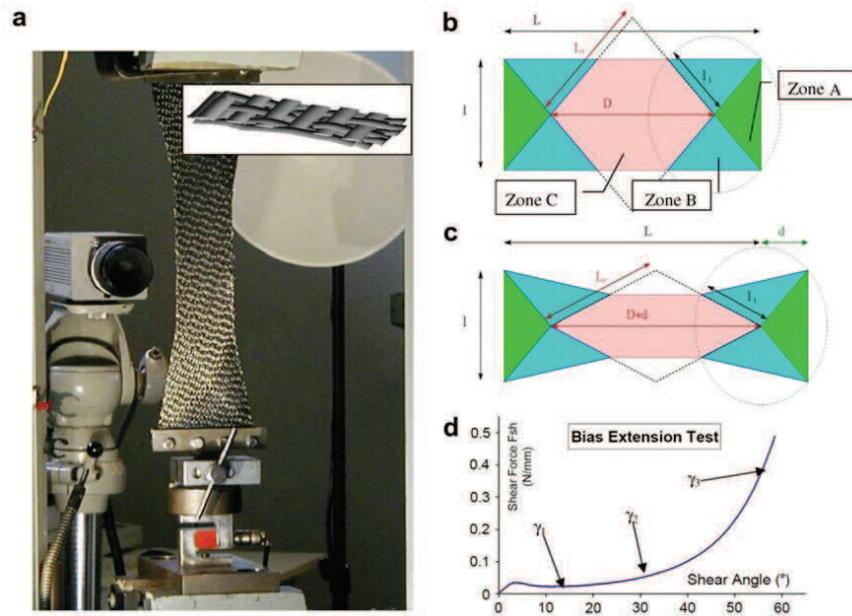


Figure 2-16: Test de bias : (a) le dispositif, (b) éprouvette rectangulaire initiale avec des fils orientés à ± 45 , (c) l'éprouvette déformée, (d) la courbe de charge de cisaillement. Les angles calculés à partir de l'analyse mésoscopique, (Lomov et al. 2008)

En se basant sur la géométrie déformée de l'éprouvette, l'angle de cisaillement est défini comme suit :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D + d}{\sqrt{2D}}\right) \quad (2 - 7)$$

Avec **D** et **d** sont respectivement la longueur de diagonale de la zone **C** et le déplacement de mors mobile de la machine de traction.

Vu l'absence d'une norme qui exige un seul mode opératoire et une seule dimension d'éprouvette à tester, il était nécessaire de faire standardiser la réponse de cisaillement en bias extension test pour un même matériau de différentes dimensions. Quelques chercheurs ont proposé des méthodes d'adimensionnement, tel que (Johnson 1995) qui a préconisé de calculer une déformation et une contrainte juste au niveau de la zone centrale de l'éprouvette tout en négligeant

les zones demi cisailées. Une autre méthode a été développée par (De Luycker 2009) en se basant sur une approche énergétique et en introduisant la notion de couple surfacique unitaire de cisaillement. Il propose d'utiliser la notion de couple de cisaillement, présenté par l'expression (2-8), au lieu de la force de cisaillement pour adimensionner l'essai de bias-test.

$$C_s(\varphi) = \frac{1}{2S_1} (F_b \sqrt{D^2 - d^2 - 2dD} - S_2 C_s \left(\frac{\varphi}{2}\right)) \quad (2 - 8)$$

Avec $C_s(\varphi)$ et $C_s(\varphi/2)$ respectivement les couples surfaciques de cisaillement dans la zone cisailée et demi cisailé alors que F_b est la force appliquée sur l'éprouvette. S_1 et S_2 sont respectivement les surfaces des zones A et B .

Plusieurs investigations expérimentales sont réalisées pour étudier le comportement en cisaillement du tissu en bias extension test. La majorité des études est faite sur des renforts tissés et montrent que pendant un essai de cisaillement les mèches pivotent les unes par rapport aux autres avec une faible résistance due au frottement entre elles. Progressivement les espaces se combrent et une compression transverse des mèches vient s'ajouter à ce frottement. Ces espaces ne se ferment pas simultanément ce qui traduit une résistance progressive s'achève par un phénomène de blocage en cisaillement et une apparition des plis. Ce phénomène est mis en évidence par la technique de la corrélation d'image à l'échelle mésoscopique présenté par la figure (2-17).

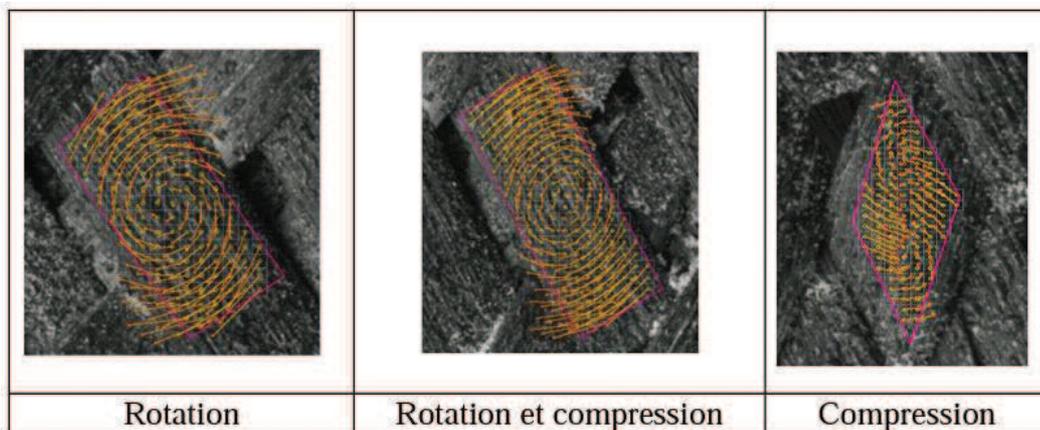


Figure 2-17: Mécanisme de cisaillement d'un interlock de carbone, (Dridi 2010)

En utilisant la technique de mesure des champs de déformation, dans le travail de (Cao et al. 2008), on trouve un décalage entre les valeurs optiques des angles de cisaillement et les valeurs

théoriques dans la zone centrale de l'éprouvette du tissu de verre pour différentes valeurs de λ . Ce résultat est vérifié aussi dans le travail de (Lomov et al. 2008) sur les tissus interlock de carbone.

Tests « Picture Frame »

Le picture frame est un cadre métallique articulé dans les coins. Entre ses quatre barres, une éprouvette en croix est fixée. Le dispositif est monté sur une machine de traction. La force de traction permet de pivoter les articulations, ce qui introduit la variation angulaire entre les fils du tissu ainsi une cinématique de cisaillement pur est imposée par le cadre, figure (2-18). L'angle de cisaillement a la même expression que dans le cas de bias extension test, présenté par l'équation (2-7).

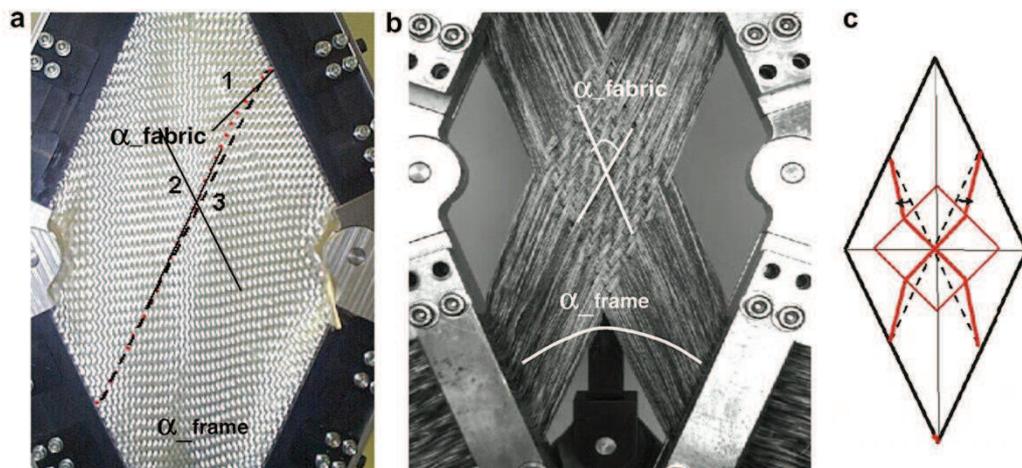


Figure 2-18: Deux types d'éprouvettes sur « Picture Frame »: (a) large échantillon, (b) petit échantillon, (c) dispositif de la position des fils dans le cas (b), (Lomov et al. 2008)

Le problème rencontré pendant ce test est l'alignement du tissu. Autrement dit pour assurer des essais répétitifs, il faut que les fils soient perpendiculaires aux barres du cadre (Milani et al. 2007; Peng et al. 2004) (Peng et al. 2004; Milani et al. 2007). L'absence de l'alignement des fils par rapport aux directions du cadre entraînera des déformations longitudinales dans les mèches (Chang et al. 2004; Lebrun et al. 2003), et un couplage de tension associée au cisaillement. Les pré-tensions initiales (sous les bords du cadres) doivent, par ailleurs être contrôlées (Launay et al. 2008). Pour

cela différents conceptions et dimensions des cadres ont été proposé dans la figure (2-19) par différents chercheurs pour résoudre ce problème (Zhu et al. 2007a; Cao et al. 2008).

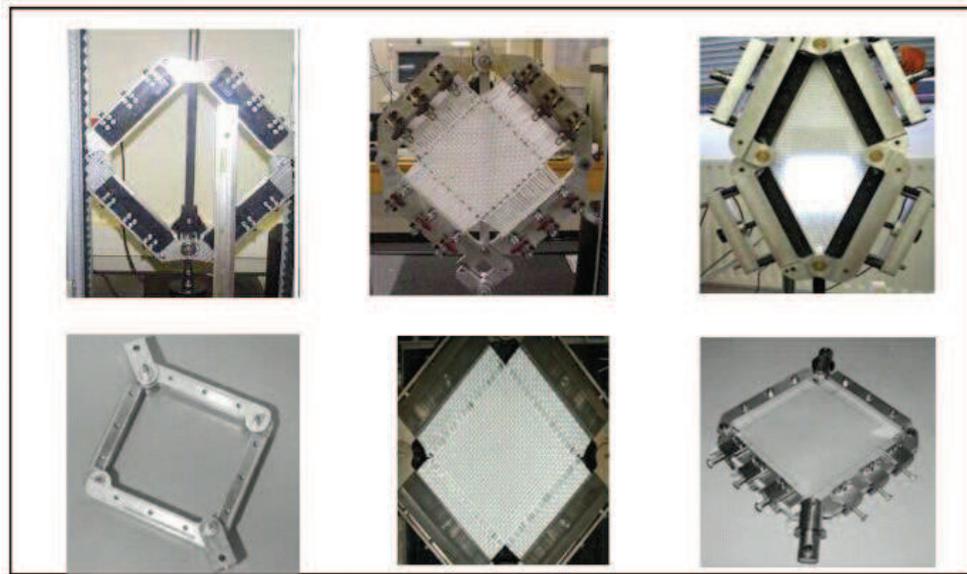


Figure 2-19: Exemple des dispositifs de « picture frame », (Dridi 2010)

Une formule générale d'adimensionnement , (2-9), a été proposée par (Peng et al. 2004), montre que la puissance intérieur par unité de volume de l'éprouvette est identique sur différents cadres pour le même angle de cisaillement, figure (2-20).

$$\frac{F}{f} = \frac{L_{Tissu}^2}{L_{cadre}} \frac{l_{cadre}}{l_{Tissu}^2} \quad (2 - 9)$$

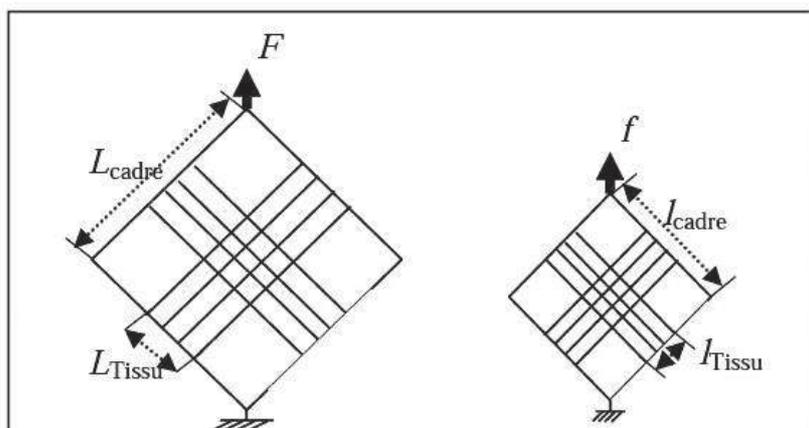


Figure 2-20: Deux différents cadres, (Dridi 2010)

L'effort de cisaillement « F_{sh} » tangent au côté du cadre unitaire a été présenté dans une autre formule proposé par (Chang et al. 2004; Harrison et al. 2004), la figure (2-20).

$$F_{sh} = \frac{F}{2 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2 - 10)$$

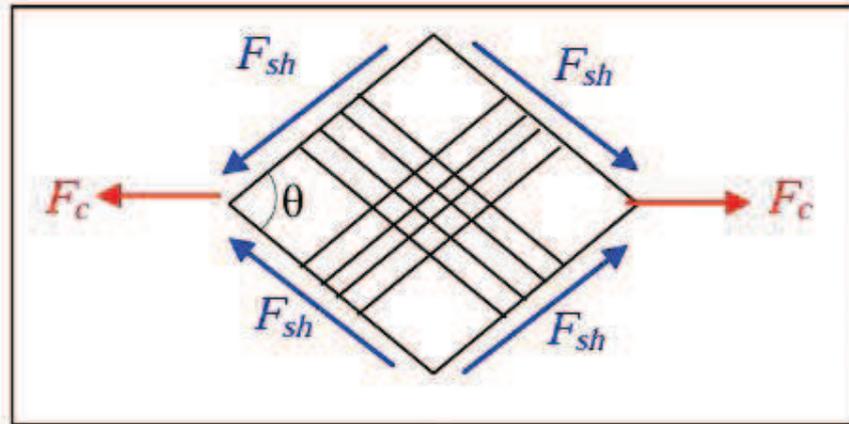


Figure 2-21: Définition de F_{sh} , (Dridi 2010)

(De Luycker 2009) a calculé l'effort de cisaillement « F_{sh} » en utilisant la notion de couple de cisaillement surfacique, formule (2-11).

$$F_{sh} = \frac{C_s}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2 - 11)$$

Avec C_s est le couple surfacique de cisaillement, formule (2-12) :

$$C_s = F_c \frac{L_{cadre}}{L_{tissu}^2} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2 - 12)$$

Avec L_{cadre} est l'arrêt de cadre et L_{tissu} est la dimension du tissu.

Le comportement en cisaillement du matériau tissé a été l'axe de plusieurs études d'un point de vue numérique (Peng & Cao 2002; Cao et al. 2008; McGuinness & ÓBrádaigh 1997; Mohammed et al. 2000) à l'aide de certaines lois de comportement, et d'autres expérimentales en

utilisant la technique de mesure de champ aux échelles macro et méso. La correspondance entre le comportement macroscopique et mésoscopique vient des observations multi échelles qui permettent de tracer une courbe de synthèse. La courbe de comportement en cisaillement illustrée par la figure (2-22) présentée par (Dumont et al. 2003) reflète la cinématique réelle mesurée à la surface de l'éprouvette. Cette courbe est composée de trois phases ; la première au début de l'essai, où les mèches perpendiculaires tournent les unes par rapport aux autres, puis la seconde phase où le contact intervient et l'effort commence à augmenter enfin lorsque le tissu est « verrouillé » et les mèches se compriment latéralement.

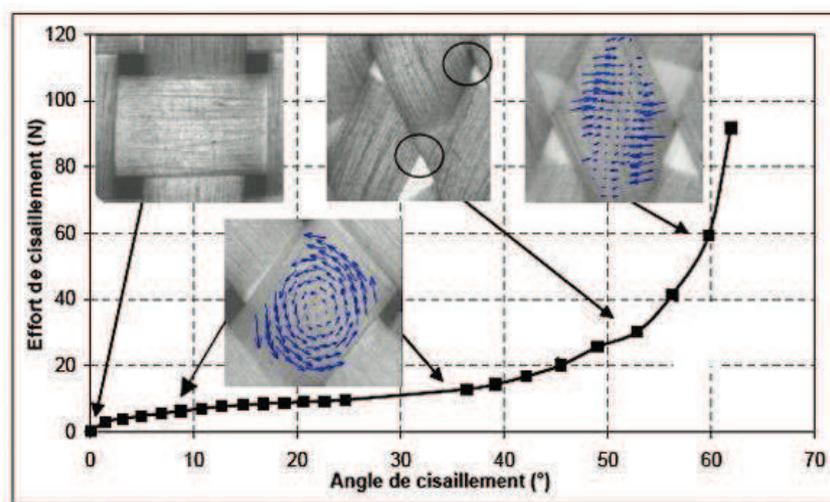


Figure 2-22: Courbe de comportement en cisaillement d'un renfort tissé de fibre de verre, avec des prise de vue mésoscopique, (Dumont 2003)

L'étude réalisée par (Dumont 2003; Dumont et al. 2003) a montré que le champ de déformation dans l'éprouvette renforcé avec des talons sous les bords du cadre est beaucoup plus homogène. L'angle calculé grâce à une mesure de champ local est proportionnel à celui obtenu par la cinématique globale du cadre jusqu'à un angle de 60°, où on remarque une divergence jusqu'à la fin de l'essai (65°). La valeur d'angle de cisaillement mesurée reste toujours inférieure à la solution théorique donnée par l'équation (2-7). D'autre part, on remarque que l'application de prétention sur le tissu au démarrage de l'essai peut retarder l'apparition des plis.

La déformation de la structure textile à l'échelle macroscopique lors de la mise en forme est principalement associée à des déformations de cisaillement plan. Un test dit de « picture frame » impose un cisaillement pur sur la structure textile afin de déterminer sa réponse à ce mode de déformation. Peu de travaux portent sur ce type d'études dans la littérature pour les structures tricotées. (Duhovic 2004) a réalisé un test dit de « picture frame » sur une structure tricotée, où l'éprouvette est coupée de manière que la force appliquée fasse un angle de 45° avec la direction des colonnes et des rangées, figure (2-23, a), mais également lorsque la force appliquée est parallèle à la direction des colonnes et rangées figure (2-23, b). Dans l'orientation (a) une apparition immédiate d'ondulation dans la structure tricotée est constatée, l'éprouvette ne pouvant s'accommoder une valeur quelconque de cisaillement, par contre dans ce test les autres mécanismes de déformation tels que le glissement entre-fil et la flexion du fil ne sont pas pris en compte. Dans l'orientation (b) les plis se forment plus tardivement.

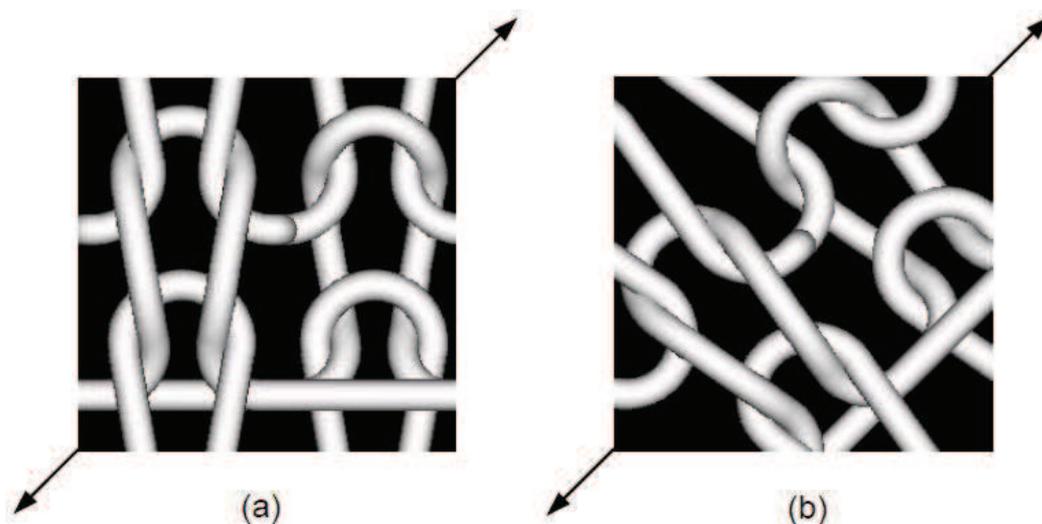


Figure 2-23: L'orientation de la structure tricotée a) Force appliquée à 45° avec la colonne et la rangée, b) Force appliquée est parallèle à la colonne et la rangée, (Duhovic 2004)

La différence dans le comportement entre les deux configurations de la structure tricotée (a) et (b) est illustrée dans la figure (2-24).

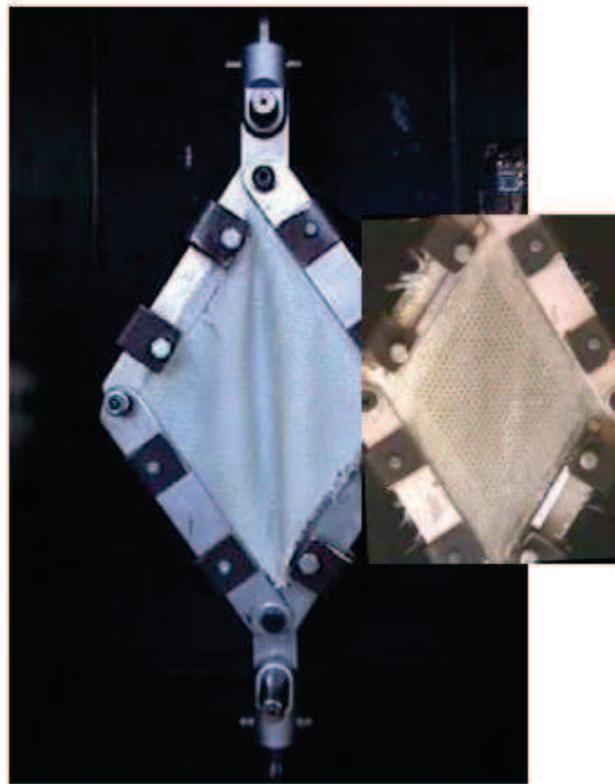


Figure 2-24: Comparaison entre les orientations de renfort (a) et (b), (Duhovic 2004)

2.3 Objectifs et contraintes de l'étude

Le travail réalisé dans cette thèse vise à fournir des données permettant à terme de modéliser le comportement d'une structure tricotée dans un procédé de mise en forme.

Il est clair que l'objectif est de dépasser la zone de comportement dite « structurelle » pour atteindre la zone dite « milieu continu » à l'issue de la mise en forme, en gardant toutefois une marge par rapport à la rupture. Lors des essais de mise en forme, décrits de façon détaillée dans le troisième chapitre, le comportement de la structure n'est à l'évidence pas « uniaxiale ». Les données nécessaires sur le milieu tricoté ne peuvent donc se limiter aux seules courbes qui illustrent les résultats d'essais uni-axiaux. L'idéal pourrait être de pouvoir effectuer des essais bi-axiaux. Mais encore faut-il pouvoir disposer d'un tel équipement.

Quelle que soit la machine d'essais utilisée, il apparaît de toute façon nécessaire de ne pas limiter l'analyse des essais à la simple traduction des efforts et des déplacements de mors mesurés en termes de déformation dans la direction de l'effort et de contrainte normale dans la direction de

l'effort (ou toute autre information réduite car la notion de contrainte est difficilement accessible dans une telle structure hétérogène). Il est nécessaire d'aller plus en profondeur dans l'analyse du comportement de l'éprouvette et ce à différents niveaux :

- D'une part, la question de l'homogénéité de l'état de déformation doit être posée et faire l'objet d'investigations avant toute interprétation des résultats. Cet aspect est très rarement abordé dans la littérature.
- D'autre part, des informations plus complètes sur les états de déformation au sein de l'éprouvette doivent être recherchées, en particulier les allongements relatifs dans la direction perpendiculaire à la direction de traction dans un essai uni-axial et les glissements éventuels. Cet aspect est également très rarement abordé dans la littérature, alors qu'il est a priori nécessaire si l'on veut pouvoir aborder la modélisation de procédés tels que la mise en forme dans les meilleures conditions.

Bien évidemment, l'obtention expérimentale des informations utiles pour la modélisation d'un procédé de mise en forme nécessite des moyens en termes de machines d'essais et de moyens métrologiques associés. Les idées ici retenues, compte tenu des moyens disponibles au début de l'étude, sont les suivantes :

- Choix d'un type de fil et d'un type de structure tricotée, en l'occurrence utilisation de fil acrylique et d'une structure (côte 1 et 1) dont les propriétés figurent dans les tableaux (1-8) et (1-9) en fin de premier chapitre
- Utilisation d'une machine d'essais de traction uni axiale du laboratoire adaptée aux milieux textiles et en particulier aux structures tricotées
- Mise en place d'essais sur des éprouvettes avec des inclinaisons diverses des colonnes et rangées par rapport à l'axe de traction de la machine d'essais, par analogie avec ce qui est utilisé pour des études sur les matériaux composites
- En l'absence de normes, mise en place d'une réflexion sur les dimensions de l'éprouvette d'essais
- Utilisation de moyens de mesures conventionnels (effort et déplacement relatif des mors de la machine de traction) couplés aux informations fournies par une méthode optique de détermination d'informations plus locales sur les déformations (allongements relatifs

et glissements) dans une zone centrale des éprouvettes, avec localement une analyse du caractère plus ou moins homogène de ces déformations.

Les paragraphes (2-4) et (2-5) qui suivent détaillent les moyens d'essais utilisés et mis en œuvre pour obtenir les résultats détaillés et analysés dans le paragraphe (2-6).

2.4 Caractérisation membranaire d'une structure tricotée (côte 1 et 1)

2.4.1 Fils utilisés

2.4.1.1 Choix de fils

Dans notre étude expérimentale, nous avons utilisé un fil d'acrylique afin de réaliser nos éprouvettes. Ce fil existe en deux versions, dénotées « bleu » et « gris-blanc » dont les caractéristiques figurent dans le tableau (2-4). Ces fils ont fait l'objet de caractérisations à la traction, jusqu'à rupture, figure (2-25), en respectant les normes en vigueur (NF EN ISO 2062 2010). Dix échantillons de deux fils utilisés dans nos éprouvettes, ont été testés et montrent un comportement relativement similaire.

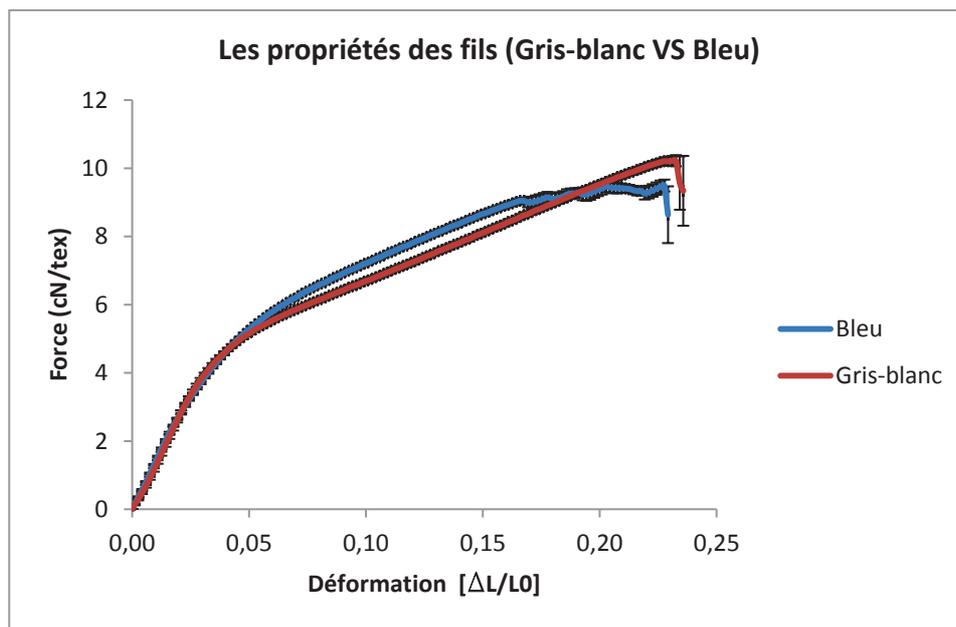


Figure 2-25: Courbes de traction uni axiale des fils utilisés

Tableau 2-2: Les caractéristiques de fils utilisés

	Fil bleu	Fil gris-blanc
Type	Acrylique	Acrylique
Titre de fil (tex)	174	173
Torsion (T/m) (S)	150	152
E_{sp} (N/tex)	1,37	1,37
σ_{sp} (cN/tex) max	9,5	10,22
Allongement à la rupture (%)	22,9	23,6

2.4.2 Structure tricotée

2.4.2.1 Mise en œuvre de la structure tricotée

Les structures tricotées sont réalisées au sein d'atelier de bonneterie à l'école nationale supérieure des arts et industries textiles (ENSAIT) sur deux machines à tricoter (Shima seiki, jauge 7) et (Stoll, jauge 13). Le diagramme technique de la contexture est donné dans la figure (2-26).

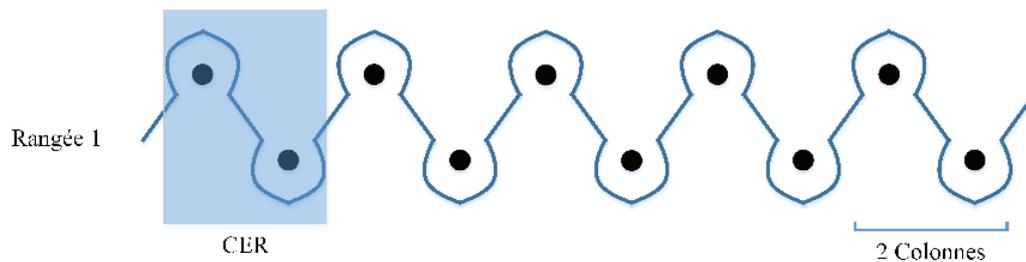


Figure 2-26: Diagramme technique du tricot (côte 1 et 1)

Comme schématisé sur la figure (2-26), les fontures sont disposées de manière à ce que les aiguilles soient positionnées en quinconce. Toutes les aiguilles des deux fontures sont utilisées pour fabriquer la côte.

2.4.2.2 Paramètres de la structure tricotée

Les caractéristiques dimensionnelles de la structure étudiée, tableau (2-3), sont calculées expérimentalement. Les structures tricotées sont caractérisées par leur épaisseur (e), leur masse surfacique ms_{tricot} et par les caractéristiques géométriques d'une maille (boucle), en considérant toutes les mailles identiques dans la structure tricotée. La hauteur h et la largeur b de la maille, la figure (2-27), correspondent à la mesure de la projection de la maille dans le plan de la structure tricotée. Elles sont respectivement déterminées à partir de la longueur de la structure tricotée

divisée par le nombre de rangées de mailles et de largeur de la structure tricotée divisée par le nombre de colonnes. La longueur de fil absorbée par une maille L_f est déterminée selon la norme (NF EN 14970 2006) en divisant la longueur de fil démaillé d'une rangée sur le nombre des colonnes dans cette rangée. L'épaisseur d'une structure tricotée e est mesurée selon la norme (NF EN ISO 5084 1996). La masse surfacique de la structure tricotée ms_{tricot} est calculée selon la norme (ISO 3801 1977) consistant à mesurer la longueur, la largeur et la masse de l'éprouvette. Il est à noter que les valeurs indiquées sont les moyennes des valeurs mesurées.

Pour une contexture donnée, les caractéristiques géométriques des mailles des structures tricotées réalisées sur deux machines à tricoter de différentes jauges sont proches. Par contre, la densité surfacique pour la structure réalisée sur la machine (jauge 13) est plus élevée de celle-ci réalisée sur une machine (jauge 7).

Tableau 2-3: Caractéristiques dimensionnelles de la structure tricotée étudiée

	(côte 1 et 1) [bleu]	(côte 1 et 1) [gris-blanc]
Nombre des colonnes par 10 cm sur les l'avant et l'arrière	64	74
Nombre des rangées par 10 cm	45	46
Masse surfacique ms_{tricot} (g/m ²)	520,5	604,1
Epaisseur (e) mm	3,3	3,4
Hauteur de maille (h) mm	2,22	2,17
Largueur (b) mm	1,56	1,35
longueur du fil absorbé par une maille (L_f) mm	10,6	10,3
Jauge de la machine	7	13

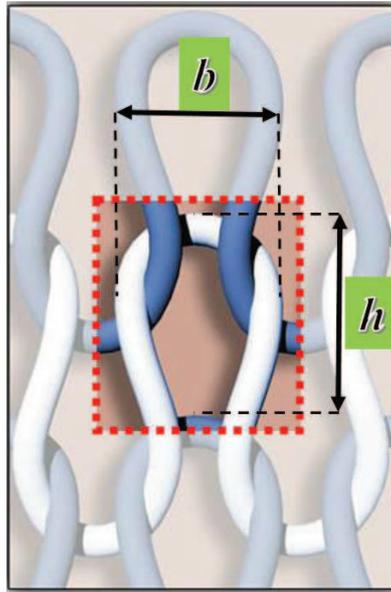


Figure 2-27: Caractéristiques géométriques d'une maille

2.4.3 Les éprouvettes

2.4.3.1 Introduction

Il n'existe pas de normes qui concernent les essais de traction uni axiale sur les structures tricotées. C'est pourquoi, plusieurs chercheurs ont utilisé dans leur travaux de recherche la norme (NF ISO 4606 1996) qui concerne les essais de traction uni axiale sur les structures tissés en fibres de verre. Dans notre étude, nous avons conçu notre propre protocole des essais, afin de montrer la particularité d'une structure tricotée par rapport les autres structures textiles.

2.4.3.2 Analyse schématique de l'éprouvette étudiée

Afin d'étudier le comportement mécanique des structures tricotées dans différentes orientations (0° , 30° , 45° , 60° , 90°), nous devons concevoir des éprouvettes qui reflètent leur comportement. En préambule nous définissons le terme d'orientation d'une structure tricotée par l'angle formé entre l'axe de la colonne et la direction de chargement en traction uni axiale appliquée, figure (2-28).

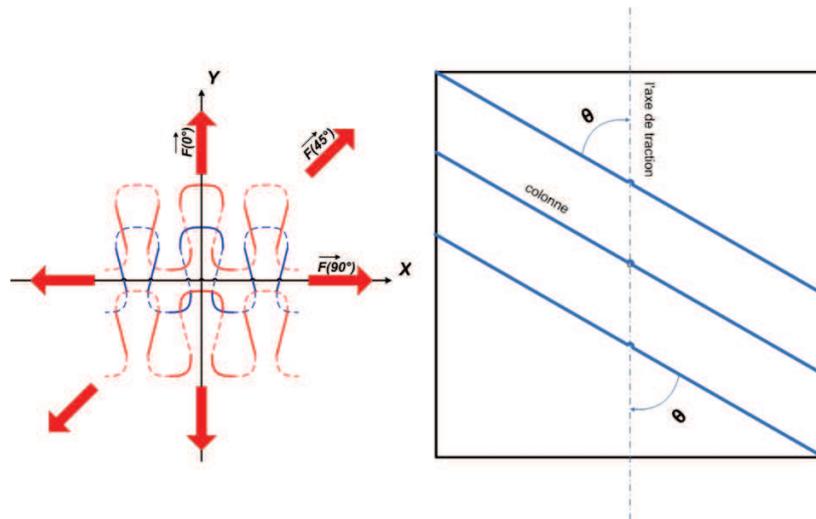


Figure 2-28: Orientation d'une structure tricotée

Ce qui distingue les structures tricotées à maille cueillie des autres structures textiles est l'extensibilité élevée, l'orientation des colonnes de boucles par rapport l'axe de traction et la présence ou non de ce qu'on définit par le surjet. Le surjet consiste en l'ajout d'un fil pour éviter le démaillage de la structure tricotée sur les bords. Nous déterminons les dimensions des éprouvettes sur la base de ces différents paramètres, afin d'avoir une zone centrale (quadrillage composé de neuf points) pour mesurer les déformations locales loin des effets de bords, pour cela nous avons augmenté la largeur de l'éprouvette de 50 mm comme dans le cas des structures tissées jusqu'à 100 mm, figure (2-29).



Figure 2-29 : Quadrillage sur l'éprouvette étudié

Pour certaines orientations comme par exemple (90°), une éprouvette de grande longueur (200 mm) n'atteint pas la limite de rupture lors d'un test de traction uni axiale due à l'extensibilité élevée de la structure tricotée qui dépasse parfois les limites dimensionnelle de banc de traction. En outre, afin de choisir une longueur propre de l'éprouvette étudiée nous devons vérifier l'influence des paramètres de longueur et d'orientation des colonnes de boucles sur nos éprouvettes. En effet en fonction de ces paramètres le nombre de colonnes/rangées de boucles prises entre les mors et/ou libres varie. Pour cette étude on se limitera aux orientations (30° , 45° , 60°). Pour cette raison, nous avons fait une étude schématique pour montrer l'influence de ces paramètres en fixant une largeur d'éprouvette à **100 mm**.

L'étude schématique détaillée ci-dessous pour les éprouvettes aux orientations (30° , 45° , 60°) sert à déterminer, en fonction des orientations considérées et des tailles d'éprouvettes, des zones de traction uni axiale principales, et des zones du couplage (tension et cisaillement) qui représentent l'intersection entre les zones principales. Cette étude sert également à déterminer le nombre des colonnes et rangées de boucle assujetties à de la traction dans les zones principales prise dans les mors bloquées, et également le nombre des colonnes et rangées dans les zones principales libres. Cette analyse schématique nous aide à préparer les éprouvettes aux dimensions optimisées pour notre étude expérimentale.

Dans une première approche, pour les différentes dimensions de l'éprouvette, l'étude schématique représente les boucles (par leurs colonnes et rangées), qui selon les orientations considérées, seront assujetties au chargement ou non. Pour ce faire nous proposons trois rapports de longueur sur largeur de l'éprouvette ($L/W = 0.5, 1, 1.5$), et nous avons observé l'influence des orientations (30° , 45° , 60°) pour chacun de ces rapport de dimensions d'éprouvettes :

1^{er} cas : Rapport entre la longueur et le largeur est égal à 1,5. ($L/W=1,5$)

Pour ce rapport, nous représentons figure (2-30), un schéma de l'éprouvette pour trois angles différents (30° , 45° , 60°), sur laquelle sont tracées des lignes de séparation des colonnes et rangées de boucles afin de distinguer les zones similaires qui partagent le même comportement. Pour une orientation à (30°), nous remarquons une zone en bleu qui regroupe les colonnes de boucles prises sous les mors (en noir dans le schéma), une zone en jaune qui regroupe les rangées de boucles libres (i.e. non prises sous les mors), et des zones qualifiées de secondaires relativement à ces deux situations. Pour une orientation à (45°), nous remarquons la disparition de zone bleue présente dans

l'orientation à (30°), la présence d'une zone verte qui regroupe les colonnes de boucles libres, la diminution de largeur de la zone jaune relativement à l'orientation (30°). Pour une orientation à (60°), nous remarquons l'augmentation de la largeur de la zone verte relativement à l'orientation à (45°), la présence d'une zone rouge qui regroupe les rangées de boucles prises sous les mors.

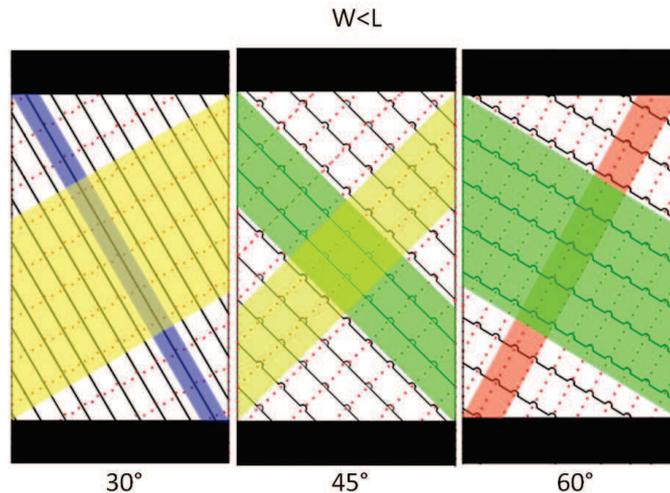


Figure 2-30 : Un schéma de l'éprouvette aux différentes angles ($L/W=1,5$)

2^{ème} cas : Rapport entre la longueur et le largeur est égal à 1. ($L/W=1$)

Nous représentons figure (2-31), le schéma de l'éprouvette ($L/W=1$) pour différentes orientations (30°, 45°, 60°). Pour une orientation (30°), une zone en bleu qui regroupe les colonnes de boucles prises sous les mors, une zone jaune qui regroupe les rangées de boucles libres, et des zones secondaires. Pour une orientation à (45°), nous remarquons la disparition des zones notifiées dans l'orientation à (30°), l'apparition d'une colonne (en bleu) et d'une rangée (rouge) de boucles qui divisent l'éprouvette en quatre zones dites secondaires. Pour une orientation à (60°), nous remarquons l'apparition d'une zone principale verte qui regroupe les colonnes de boucles libres, et d'une zone rouge qui regroupe les rangées de boucles prises sous les mors.

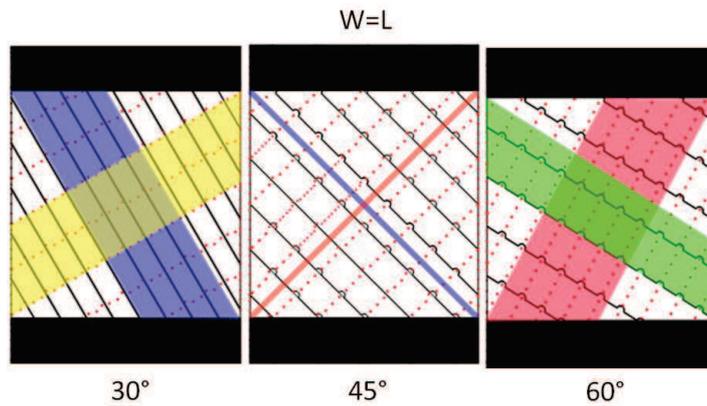


Figure 2-31 : Un schéma de l'éprouvette aux différentes angles ($L/W=1$)

3^{ème} cas : Rapport entre la longueur et la largeur est égal à 0,5. ($L/W=0,5$)

Nous représentons figure (2-32), le schéma de l'éprouvette ($L/W=0,5$) pour différentes orientations (30° , 45° , 60°). Pour une orientation à (30°), nous remarquons une zone en bleu qui regroupe les colonnes de boucles prises sous les mors, et une zone rouge qui regroupe les rangées de boucles prises sous les mors, et des zones secondaires. Pour une orientation à (45°), nous remarquons l'aspect symétrique entre les zones bleues et rouges, et les zones secondaires. Pour une orientation (60°), nous remarquons la diminution de la largeur de la zone bleue des colonnes prises sous les mors, et l'augmentation de la largeur de la zone rouge des rangées prises sous les mors, et des zones secondaires.

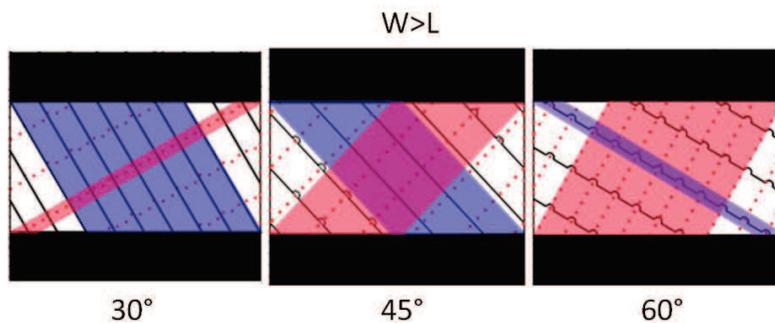


Figure 2-32 : Un schéma de l'éprouvette aux différentes angles ($L/W=0,5$)

La deuxième approche schématique est l'influence de longueur sur l'éprouvette sur les tailles des zones principales et secondaires. Afin de montrer l'influence de ce paramètre pour les trois orientations (30° , 45° , 60°), nous avons observé l'influence des rapports ($L/W= 0.5, 1, 1.5$) à chaque orientation (30° , 45° , 60°).

1^{er} cas : L'orientation des colonnes de boucles est égale à (30°) :

A cette orientation (30°), et pour un rapport ($L/W=0,5$), figure (2-33), nous remarquons une zone principale bleue des colonnes de boucles complètes et bloquées par les mors, une zone principale rouge des rangées de boucles complètes et bloquées par les mâchoires de banc de traction uni axiale, et des zones secondaires incomplètes. Pour un rapport ($L/W=1$), nous remarquons la diminution de la largeur de la zone bleue et la disparition de la zone rouge notifiées au rapport ($L/W = 0,5$), et l'apparition d'une zone principale jaune qui regroupe les rangées de boucles libres et complètes, et des zones secondaires incomplètes. Pour un rapport ($L/W=1.5$), nous remarquons la diminution du largeur de la zone bleue et l'augmentation du largeur de la zone jaune notifiée au rapport ($L/W=1$), et des zones secondaires incomplètes.

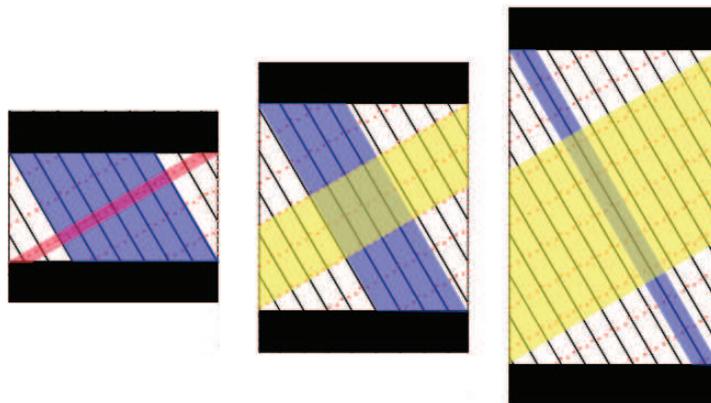


Figure 2-33 : L'orientation des colonnes de boucles à (30°) aux différentes rapports ($L/W=0.5, 1, 1.5$)

2^{ème} cas : L'orientation des colonnes de boucles est égale à (45°) :

A cette orientation (45°), et pour un rapport ($L/W=0,5$), figure (2-34), nous remarquons une zone principale bleue qui regroupe les colonnes de boucles complètes et bloquées par les mors, une zone principale rouge qui regroupe les rangées de boucles complètes et bloquées par les mors. Pour un rapport ($L/W=1$), nous remarquons la disparition des zones principales notifiées dans le rapport

($L/W=0.5$), l'apparition de colonnes et de rangées de boucles de séparation qui divisent l'éprouvette en quatre zones secondaires. Pour un rapport ($L/W=1.5$), nous remarquons l'apparition d'une zone principale verte qui regroupe les colonnes de boucles complètes et libres, d'une zone principale jaune qui regroupe les rangées de boucles complètes et libres, et des zones secondaires incomplètes. À cette orientation les deux zones principales forment un aspect symétrique où leur taux de variation dimensionnelle est symétrique.

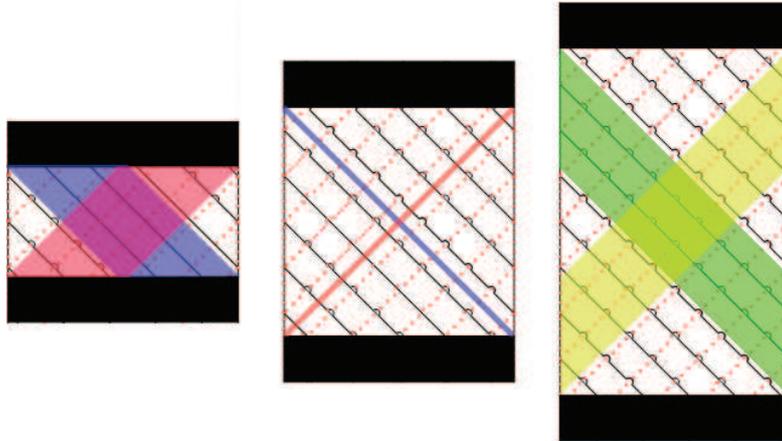


Figure 2-34 : L'orientation des colonnes de boucles à (45°) aux différents rapports ($L/W=0.5, 1, 1.5$)

3^{ème} cas : L'orientation des colonnes de boucles est égale à (60°) :

A cette orientation (60°), et pour un rapport ($L/W=0.5$), figure (2-35), nous remarquons une zone principale bleue qui regroupe les colonnes de boucles complètes et bloquées par les mors, une zone principale rouge qui regroupe les rangées de boucles complètes et bloquées par les mors, et des zones secondaires incomplètes. Pour un rapport ($L/W=1$), nous remarquons la disparition de la zone bleue notifiée dans le cas ($L/W=0.5$), l'apparition d'une zone principale verte qui regroupe les colonnes de boucles complètes et libres, la diminution du largeur de la zone rouge notifiée dans le premier cas ($L/W=0.5$), et des zones secondaires incomplètes. Pour un rapport ($L/W=1.5$), nous remarquons l'augmentation du largeur de la zone verte notifiée dans le cas ($L/W=1$), la diminution du largeur de la zone rouge notifiée dans les cas ($L/W= 0.5, 1$), et des zones secondaires incomplètes.

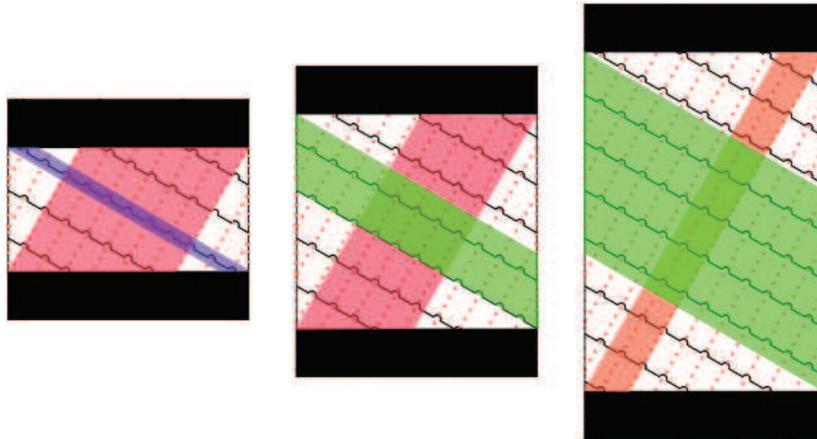


Figure 2-35 : L'orientation des colonnes de boucles à (60°) aux différentes rapports ($L/W=0.5, 1, 1.5$)

Cette analyse schématique nous a montré que l'éprouvette étudiée peut être divisée en des zones principales et secondaires. Nous définissons par zones principales, les colonnes ou les rangées de boucles, qui dans les éprouvettes, en fonction de leurs tailles sont soit totalement libres, ou totalement prises dans les mors du banc de traction uni axiale.

Les zones secondaires, sont définies par le reste de l'éprouvette et contiennent des colonnes ou des rangées de boucles qui sont prises d'un côté par les mors du banc, et sont libres d'effort à l'autre extrémité.

Le comportement mécanique d'une structure tricotée à maille cueillie sur traction uni axiale dans la direction (0°) et (90°) montre que la réponse mécanique de la structure tricotée est transférée par deux voies principales : voie des colonnes et des rangées, (de Araújo et al. 2003). Par conséquent, les voies de réponse mécanique sur traction uni axiale pour les éprouvettes étudiées aux orientations (30°, 45°, 60°) sont les zones principales qui regroupent des colonnes ou des rangées de boucles complètes et bloquées par les mors. Et donc, la taille propre de nos éprouvettes qui assure la présence des voies de réponse mécanique doit répondre à ce rapport ($L/W=0.5$ ou 1). À partir de cette hypothèse, le comportement mécanique sur traction uni axiale d'une structure tricotée à maille cueillie (côte 1 et 1) dans notre cas d'étude » aux orientations (30°, 45°, 60°) sera influencé par les zones principales bloquées. En conséquence, l'éprouvette étudiée peut être composée d'une ou deux zones principales bloquées. Dans le cas d'une zone principale bloquée, nous avons un effet colonne simple ou rangée simple similaire aux cas dans les directions (0° et 90°) respectivement. Dans le cas de deux zones, nous avons un effet complexe colonne et rangée

simultanément, dans ce cas, la taille de chaque zone détermine quel effet sera prédominant colonne ou rangée ou les deux. Si la taille de zone qui regroupe les colonnes de boucles bloquées est plus large que la taille de zone qui regroupe les rangées de boucles bloquées, l'effet de colonne est prédominant et vice versa. Dans le cas ($L/W=0.5$, 45°) où les deux zones sont identiques, nous avons un cas d'équilibre entre les deux effets colonne et rangée.

2.4.3.3 Préparation des éprouvettes

En raison de l'absence d'une norme dédiée à la mesure de dimension d'une pièce de tricot, nous avons conçu un protocole dépende de l'analyse de l'éprouvette étudiée. Dans la phase de la préparation des éprouvettes, nous avons travaillé à montrer l'influence de certains paramètres sur le comportement membranaire de la contexture de type (côte 1 et 1) tels que : la longueur de l'éprouvette, l'effet de bord, l'effet de la machine et l'orientation des colonnes par rapports l'axe de traction (0° , 30° , 45° , 60° , 90°).

- Le premier critère consiste à préparer deux groupes ayant les mêmes paramètres hormis la longueur de l'éprouvette, pour le premier groupe la longueur de l'éprouvette est **100 mm**, alors qu'elle est **50 mm** pour la deuxième.
- Le deuxième critère consiste à préparer deux groupes de mêmes paramètres hormis pour le paramètre de bord, pour le premier groupe le bord de l'éprouvette est libre (sans surjet), alors qu'il est bloqué (avec surjet) pour la deuxième en utilisant une machine à surjeter, la figure (2-36).



Figure 2-36 : Une éprouvette surjetée

- Le troisième critère consiste à préparer deux groupes ayant les mêmes paramètres hormis le paramètre du choix de jauge de la machine, pour le première groupe la jauge

est de 7 (7 aiguilles par pouce), alors qu'il est de 13 pour le second où la densité surfacique est plus élevée, la figure (2-37).

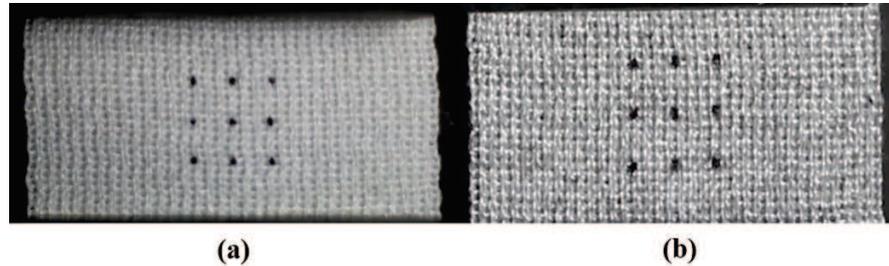


Figure 2-37: (a) jauge 7, (b) jauge 13

- Le quatrième critère consiste à préparer cinq groupes ayant les mêmes paramètres sauf le paramètre de l'orientation des colonnes par rapport à l'axe de traction (0° , 30° , 45° , 60° , 90°).

De cette manière, nous avons préparé selon ces critères quatre groupes d'éprouvettes, tableau (2-4), chaque groupe est composé de cinq sous-groupes selon l'orientation des colonnes par rapport à l'axe de traction (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) et chaque sous-groupe comprend cinq éprouvettes à tester. L'étude expérimentale portera donc sur **100** éprouvettes pour étudier le comportement mécanique sur le banc de traction uni axiale.

Tableau 2-4: Les groupes des éprouvettes testées dans notre étude

	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Dimensions	100*100 mm ²	50*100 mm ²	50*100 mm ²	50*100 mm ²
Les bords	Sans surjet	Sans surjet	Avec surjet	Sans surjet
Fil	Acrylique bleu	Acrylique bleu	Acrylique bleu	Acrylique gris-blanc
Masse surfacique (g/m ²)	521	521	521	604

2.4.3.4 Transfert de la force de traction uni axiale dans une structure tricotée

Notre analyse schématique a montré que les zones principales bloquées par les mors aux orientations (30° , 45° , 60°) sont les voies principales de charge appliquée sur l'éprouvette au motif que la structure tricotée n'est pas un milieu continu comme le cas des corps solides. Le transfert de force dans une structure tricotée se fait par des voies particulières, ce que nous appelons dans notre

étude les zones principales bloquées. Par conséquent, les déformations provoquées par la charge appliquée sur une éprouvette répondent à cette particularité structurelle de la structure tricotée à maille cueillie.

Nous proposons une éprouvette dans l'orientation (α), figure (2-38), composée d'une zone principale bloquée qui regroupe des colonnes des boucles complètes, et d'une zone principale libre qui regroupe des rangées de boucles complètes. Les centres initiaux de l'éprouvette et de la zone principale sont les mêmes et coïncident avec l'axe du banc de traction uniaxiale. Nous appelons la zone mutuelle entre les deux zones principales la zone d'intersection. L'éprouvette est assujettie à un effort de traction (\vec{F}), qui peut être transféré dans la zone principale bloquée via les points d'application de l'effort, noté (a) et (b). Le segment [ab] représente, à la fois, l'axe de la zone principale et une colonne complète prise dans les mâchoires du banc de traction uniaxiale aux points (a) et (b). Le segment [cd] est une partie d'une rangée libre, qui appartient à la zone d'intersection entre les zones principales bloquée et libre. Selon l'analyse schématique, la force appliquée (\vec{F}) peut être décomposée en deux composantes orthogonales $F \cdot \sin \alpha$ et $F \cdot \cos \alpha$. Où α désigne l'angle mesuré dans la zone centrale entre l'axe de traction et les colonnes bloquées. L'éprouvette sous effet de la charge appliquée réagit dans la zone principale bloquée. Les zones secondaires sont influencées par la déformation dans la zone principale. Les colonnes regroupées dans la zone principale bloquée s'allongent sous effet de la composante ($F \cdot \cos \alpha$), et elles subissent un moment issu d'un couple de force (T) due aux deux composantes des efforts ($F \cdot \sin \alpha$) aux points (a) et (b), où le segment [ab] représente le bras de levier de ce couple. Et donc, d'un point de vue macroscopique selon ce cas d'étude, la charge de traction uniaxiale appliquée sur cette éprouvette provoque un allongement et une rotation dans la zone principale bloquée.

Au cours de la traction, la zone bloquée s'allonge dans la direction de sollicitation, et se rétrécit dans la direction transverse. On remarque sur la bande des colonnes de boucles bloquées, figure (2-38), 4 zones délimitées par les points (1, 2, 3), (5, 6, 7), (h, 7, 6, g) et (1, l, g, 3). Le rétrécissement dans ces zones se fait d'un seul côté, le segment [2-3] pour la zone concernée par les points (1, 2, 3), le segment [5-7] pour la zone la zone concernée par les points (5, 6, 7), le segment [7h] pour la zone la zone concernée par les points (h, 7, 6, g), et le segment [3g] pour la zone la zone concernée par les points (1, l, g, 3). Alors que les points (1) et (6) sont bloqués dans les mâchoires, et les

points (g) et (l) appartiennent aux les rangées bloquées du côté (i) et (j) respectivement. Ces conditions aux limites imposent un comportement particulier sur la structure tricotée dans l'orientation α ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) au cours de traction. La figure (2-39) illustre l'effet de bord évoqué en modifiant l'orientation de bande de colonnes bloquées par rapport l'axe de traction, le parallélogramme rouge représente la zone principale bloquée ($\alpha=30^\circ$). Cet effet asymétrique concentre les déformations dans les zones déterminées par les points (2, 3, 4) et (5, 7, 8), figure (2-38), où l'initiation de la rupture est observée.

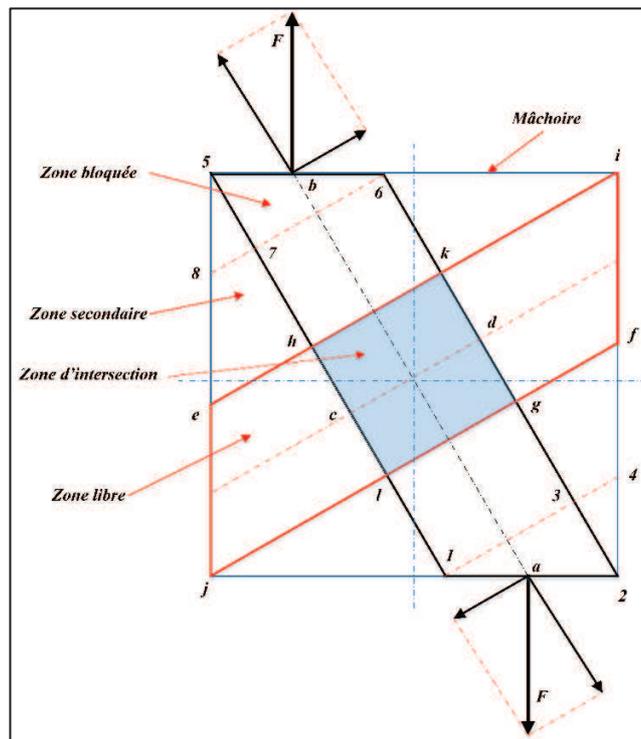


Figure 2-38 : Analyse de Force dans la zone principale

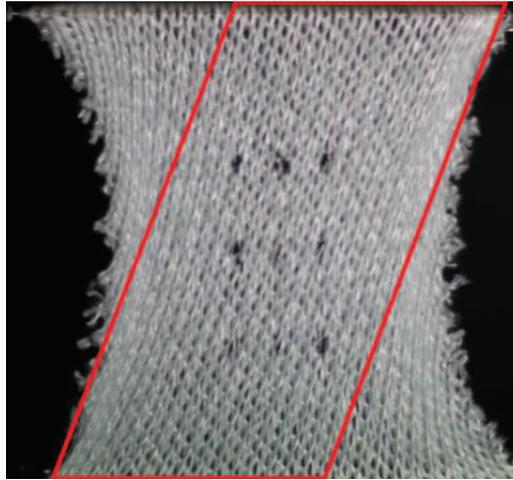


Figure 2-39: La déformation de la zone principale bloquée (30°)

La figure (2-40) illustre deux zones principales bloquées, au cours de traction l'effort transfère par ces zones. La phase de déformation structurelle dans la zone principale qui regroupe la bande des colonnes bloquées (la bande noire) est inférieure à celle-ci dans la bande de rangées bloquées (la bande rouge). Donc, les efforts transfèrent aux fils à partir du point de la déformation critique (C) dans la bande des colonnes où sa déformation devient primordiale.

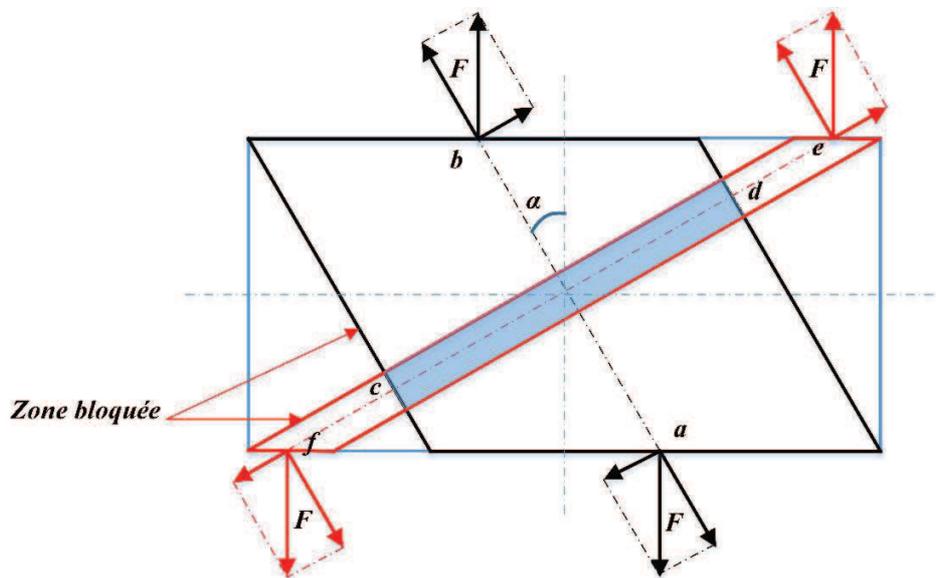


Figure 2-40- analyse des forces lors que les deux bandes sont bloquées

2.4.3.5 La zone d'intersection

Définition

La zone d'intersection est la zone formée d'après l'analyse schématique entre deux zones principales (bloquées ou libres).

Les dimensions de la zone d'intersection

L'analyse dimensionnelle de la zone d'intersection s'appuie sur les dimensions suivantes : (h) qui est la largeur de la bande des colonnes bloquées (ou libres), et (k) qui est la largeur de la bande des rangées bloquées (ou libres). Par conséquent, la détermination de (h) et (k) permet de calculer le nombre des colonnes et rangées dans chaque zone, si la densité surfacique de la structure tricotée est connue.

1. Une bande de colonnes bloquées et une bande de rangées libres

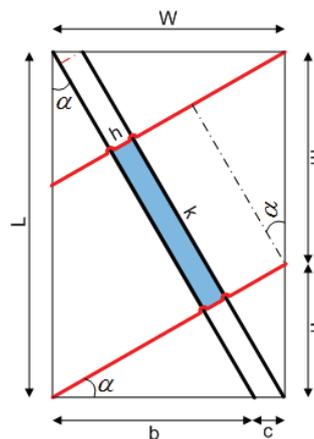


Figure 2-41: Une bande de colonnes bloquées et une bande de rangées libres

- Calcul « k » d'une bande de rangées libres :

$$\cos \alpha = \frac{k}{m} \Rightarrow k = m * \cos \alpha$$

$$m = L - n$$

$$\tan \alpha = \frac{n}{W} \Rightarrow n = W * \tan \alpha$$

$$m = L - W * \tan \alpha$$

$$k = L * \cos \alpha - W * \sin \alpha \quad (2 - 13)$$

- Calcul « h » d'une bande de colonnes bloquées :

$$\cos \alpha = \frac{h}{c} \Rightarrow h = c * \cos \alpha$$

$$c = W - b$$

$$\tan \alpha = \frac{b}{L} \Rightarrow b = L * \tan \alpha$$

$$c = W - L * \tan \alpha$$

$$h = W * \cos \alpha - L * \sin \alpha \quad (2 - 14)$$

2. Une bande de colonnes bloquées et une bande de rangées bloquées

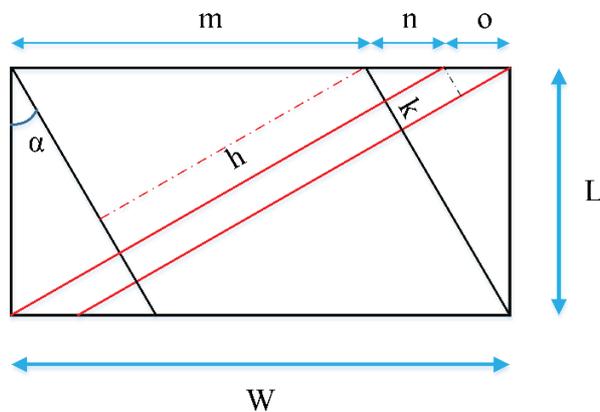


Figure 2-42: Une bande de colonnes bloquées et une bande de rangées bloquées

$$W = m + n + o$$

$$h = m * \cos \alpha$$

$$k = o * \sin \alpha$$

- Calcul « k » d'une bande de rangées bloquées :

$$m + n = \frac{L}{\tan \alpha} \stackrel{W}{\Rightarrow} o = W - \frac{L}{\tan \alpha}$$

$$k = W * \sin \alpha - L * \cos \alpha \quad (2 - 15)$$

- Calcul « h » d'une bande de colonnes bloquées :

$$n + o = L * \tan \alpha \stackrel{W}{\Rightarrow} m = W - L * \tan \alpha$$

$$h = W * \cos \alpha - L * \sin \alpha \quad (2 - 16)$$

3. Une bande de colonnes libres et une bande de rangées bloquées

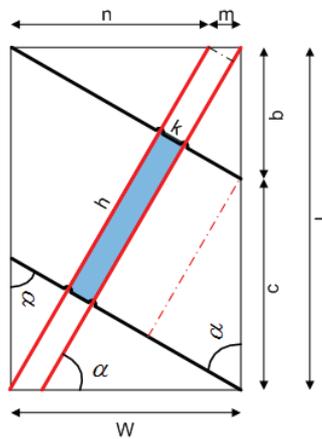


Figure 2-43: Une bande de colonnes libres et une bande de rangées bloquées

- Calcul « k » d'une bande de rangées bloquées :

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \frac{k}{m} \Rightarrow k = m * \sin \alpha \\ m &= W - n \\ \tan \alpha &= \frac{L}{n} \Rightarrow n = L * \cot \alpha \\ m &= W - L * \cot \alpha\end{aligned}$$

$$\mathbf{k = W * \sin \alpha - L * \cos \alpha \quad (2 - 17)}$$

- Calcul « h » d'une bande de colonnes libres :

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \frac{h}{c} \Rightarrow h = c * \sin \alpha \\ c &= L - b \\ \tan \alpha &= \frac{W}{b} \Rightarrow b = W * \cot \alpha \\ c &= L - W * \cot \alpha\end{aligned}$$

$$\mathbf{h = L * \sin \alpha - W * \cos \alpha \quad (2 - 18)}$$

4. Une bande de colonnes libres et une bande de rangées libres

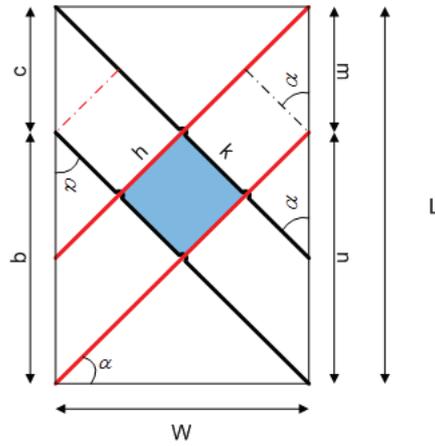


Figure 2-44: Une bande de colonnes libres et une bande de rangées libres

- Calcul « k » d'une bande de rangées libres :

$$\begin{aligned}\cos \alpha &= \frac{k}{m} \Rightarrow k = m * \cos \alpha \\ m &= L - n \\ \tan \alpha &= \frac{n}{W} \Rightarrow n = W * \tan \alpha \\ m &= L - W * \tan \alpha\end{aligned}$$

$$\mathbf{k = L * \cos \alpha - W * \sin \alpha \quad (2 - 19)}$$

- Calcul « h » d'une bande de colonnes libres :

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \frac{h}{c} \Rightarrow h = c * \sin \alpha \\ c &= L - b \\ \tan \alpha &= \frac{W}{b} \Rightarrow b = W * \cot \alpha \\ c &= L - W * \cot \alpha\end{aligned}$$

$$\mathbf{h = L * \sin \alpha - W * \cos \alpha \quad (2 - 20)}$$

2.5 Démarches expérimentales

2.5.1 Banc de traction uni axiale

Les essais sont réalisés sur une machine électromécanique MTS 2/M :

- Capacité de la cellule : 10 kN
- Précision de la charge : $\pm 0,5\%$ de la pleine échelle
- Précision du déplacement : $\pm 0,01$ mm de l'affichage

2.5.2 Méthode de mesure optique simplifiée

2.5.2.1 Introduction

La caractérisation de la déformabilité des renforts textiles secs fournit des données essentielles afin de valider les modèles de comportement de matériau ou identifier les caractéristiques de ces modèles, alors que la déformabilité des renforts textiles a un rôle essentiel dans la qualité de pièce composite finale de forme 3D. Les tests de déformabilité de textiles se concentrent principalement sur les caractéristiques membranaires du renfort textile tels que : le cisaillement et le comportement en tension, (Willems et al. 2008). La mécanique expérimentale des textiles est donc confrontée à des défis lorsqu'elle est appliquée à la mise en forme des matériaux composites, du fait de la complexité des mécanismes de déformations pendant les phases transitoires et des besoins spécifiques des procédés de formage, qui peuvent être traités efficacement par des mesures optiques de champ : 1- La fiabilité des dispositifs expérimentaux et les protocoles de test. 2- Révéler les mécanismes de la déformation du textile à méso-échelle et leur relation avec le comportement des fils individuels. 3- Mesurer l'état de déformation locale d'un renfort drapé, (Lomov et al. 2008).

La technique de corrélation d'image numérique (DIC) est une technique optique-numérique qui fournit des informations quantitatives et qualitatives sur la déformation hétérogène d'un objet. Une caméra (CCD) acquiert des images en niveaux de gris d'un objet au cours du chargement : on calcule un champ de déplacement tangent à la surface de l'objet en comparant avec les images précédemment acquises, puis le champ de déformation est dérivé à partir des gradients de déplacements. La technique (DIC) est d'un intérêt pratique dans le domaine de la caractérisation de textiles du fait de sa nature sans contact et de la possibilité d'adapter la longueur de jauge de contrainte à l'échelle d'intérêt du matériau. Il est à noter que le champ de déplacements obtenu est

seulement fiable dans le cas où les déformations dans la direction de l'épaisseur peuvent être négligées, (Lomov et al. 2008; Willems et al. 2008).

Dans notre cas d'étude, nous caractérisons la déformabilité d'une structure tricotée à maille cueillie de type (côte 1 et 1). L'extensibilité élevée des structures tricotées à maille cueillie et l'aspect géométrique tridimensionnel de leurs boucles rendent l'utilisation de la technique de corrélation d'image numérique (DIC) complexe car les algorithmes utilisés afin de calculer les champs de déplacements sont adaptés pour les cas des petites déformations et des milieux continus. Par conséquent, l'application de cette technique sur des structures tricotées n'est pas encore efficace parce que les niveaux de gris acquis pendant le chargement peuvent être dus à la reconfiguration des boucles dans la phase de déformation structurelle, et au chargement des fils dans la phase de déformation milieu continu. En outre, le chargement d'une structure tricotée provoque une déformation dans la direction de l'épaisseur, figure (2-45), avant d'atteindre la phase transitoire (point de blocage). La restriction de cette méthode dans notre étude nous a conduits à concevoir une méthode simple afin de caractériser la déformabilité locale d'une structure tricotée.

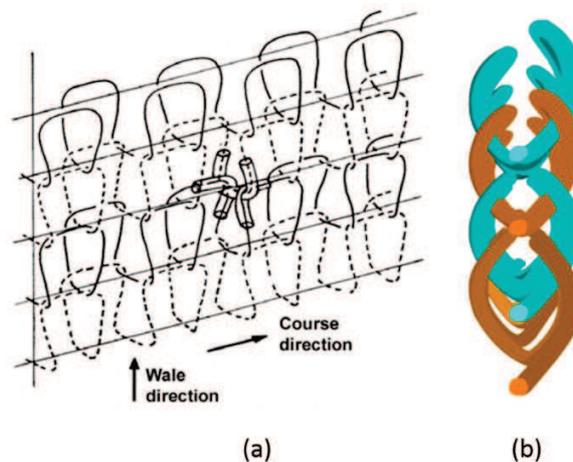


Figure 2-45: a) L'aspect 3D du tricot ; b) Vue latérale du tricot, (Duhovic 2004; Innovation Centre 2009)

2.5.2.2 Principe de la technique

En raison des restrictions sur l'application de la technique (DIC) dans notre cas d'étude, nous avons décidé la mise en place d'une méthode optique simplifiée permettant d'avoir une vue globale sur les déformations locales à l'échelle macroscopique.

Cette méthode consiste à dessiner un quadrillage composé de neuf points en utilisant un marqueur noir sur la zone d'intérêt de l'éprouvette, les dimensions de ce quadrillage sont déterminées à l'aide de l'analyse qualitative exposée précédemment, figure (2-46).

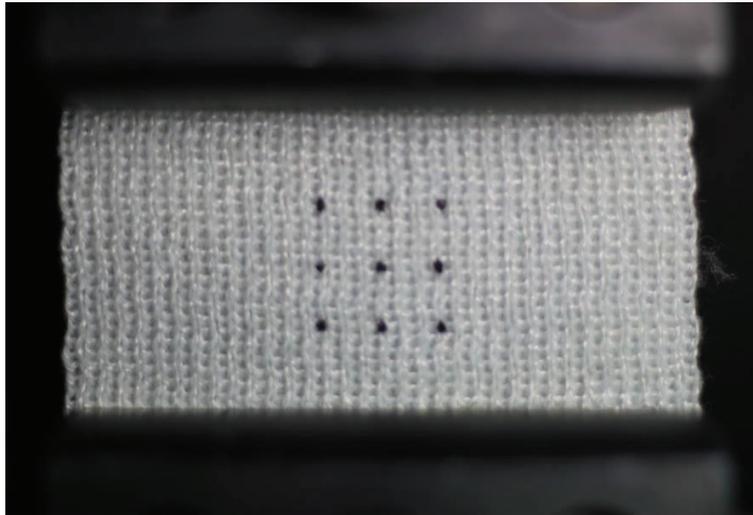


Figure 2-46: Le quadrillage sur la zone d'intérêt

Une image est une fonction de deux variables : par exemple $I(x, y)$ représente une fonction d'amplitude (l'intensité) des deux variables associées à la position (x, y) dans le plan cartésien, figure (2-47). Donc, chaque point du quadrillage peut être repéré dans l'image de l'éprouvette acquise au cours d'un chargement par les deux variables de position (x_i, y_i) en utilisant un logiciel de traitement d'images tel que Photoshop ou ImageJ.

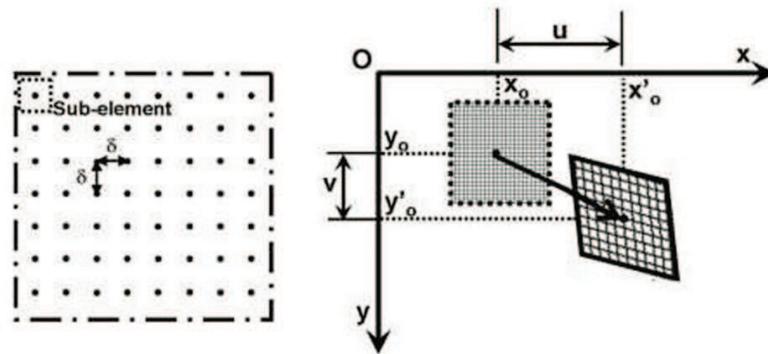


Figure 2-47: Les coordonnées d'un point dans une image, (Sciammarella et al. 2012)

En utilisant le logiciel de traitement d'image, figure (2-48), on peut repérer les points du quadrillage, et la distance et la position angulaire relative entre deux points quelconques par la fonction de règle intégrée dans ce logiciel. Par conséquent, cette méthode permet de mesurer le champ de déplacements (limité aux points du quadrillage), puis d'en déduire une estimation des déformations dans la zone d'intérêt.

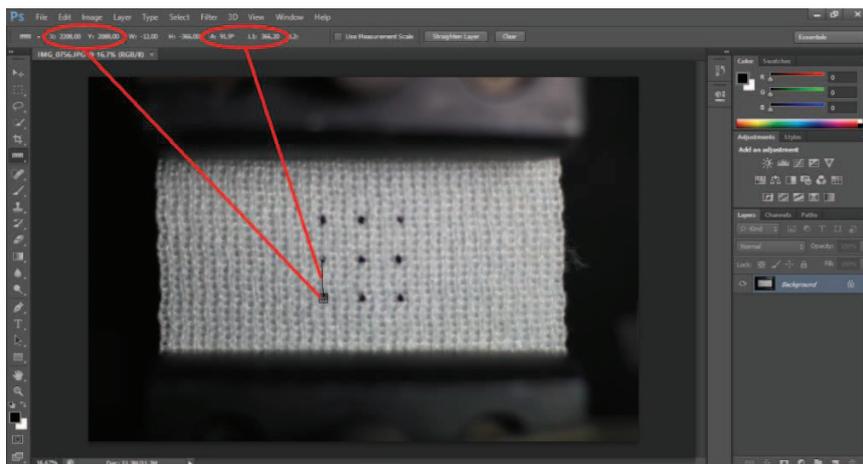


Figure 2-48: L'image traitée

2.5.2.3 Equipements et analyse

Dans les campagnes d'essais, on a utilisé un appareil photo numérique réflex « Canon EOS 550 D » de haute résolution (18 Méga Pixel) muni d'un objectif de type Canon à focale fixe (50 mm). Les sources d'éclairage utilisées sont un flash « Canon Speedlite 430EX II », ainsi que un lampadaire orientable afin d'assurer un éclairage suffisant de la zone d'intérêt « quadrillage ». L'ensemble « boîtier, objectif et flash » est installé sur un trépied afin d'assurer la stabilité de

l'appareil photo numérique au cours de l'essai. L'axe optique de l'objectif est orthogonal à la surface de l'éprouvette, alors que le point d'intersection virtuelle entre l'axe optique de l'objectif et la surface de l'éprouvette représente le centre du quadrillage « éprouvette » dans l'état initial ($t = 0$). Afin que de pouvoir bien installer l'éprouvette entre les deux mâchoires du banc de traction, deux rubans de protection ont été installés afin d'éviter le glissement de l'éprouvette des mâchoires. Il faut par ailleurs s'assurer que l'axe de l'éprouvette coïncide avec l'axe de traction, pour ce faire nous avons utilisé un fil enroulé sur les axes des mâchoires, afin que le fil, l'axe de l'éprouvette et l'axe de traction se croisent au centre du quadrillage, figure (2-49).

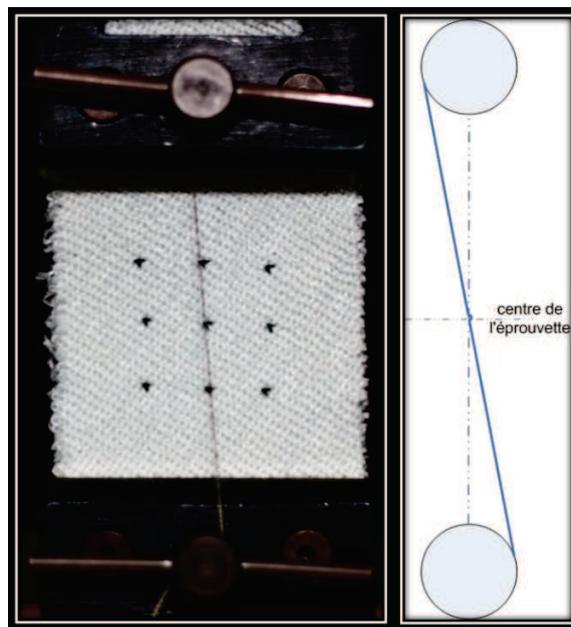


Figure 2-49: L'installation de l'éprouvette sur le banc de traction uni axiale

Le principe de la méthode se résume à l'observation de la variation relative entre les positions des points du quadrillage au cours du chargement, ce qui permet de calculer le champ de déplacements simplifié, et donc le champ simplifié des déformations locales dans la zone d'intérêt. Le figure (2-50) représente le quadrillage dans deux états initial (t_0) et déformé (t_1). On remarque que le quadrillage est composé d'un grand carré (ABCD) et de quatre petits carrés (A ; 1 ; 0 ; 4), (1 ; B ; 2 ; 0), (0 ; 2 ; C ; 3), (4 ; 0 ; 3 ; D). Le calcul de déformation locale dans les carrés grands et petits permet d'évaluer l'homogénéité du champ simplifié des déformations sous charge appliquée.

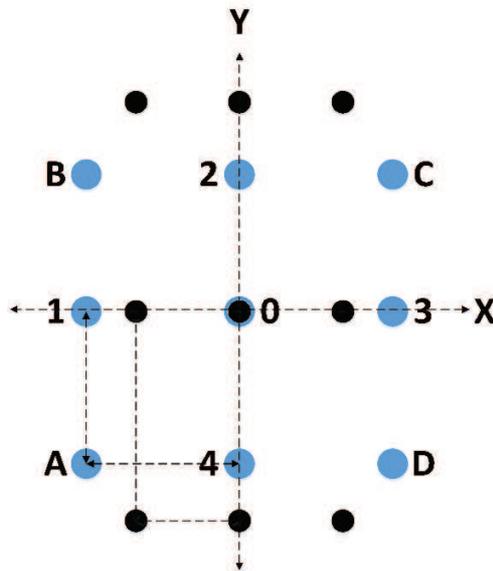


Figure 2-50: Le schéma du quadrillage avant et après la déformation

Afin de réaliser le calcul des déformations locales, nous faisons l'hypothèse que (A ; 1 ; 0 ; 4) est un rectangle (ou un carré), figure (2-50), dont les côtés sont initialement parallèles soit au côté \overrightarrow{OX} soit au côté \overrightarrow{OY} de l'image.

(A ; 1 ; 0 ; 4) : rectangle initial

1^{ère} étape : déterminer les coordonnées (en pixels) des quatre points A, 1, 0, 4 dans le repère « image » (OXY)

(\hat{A} ; $\hat{1}$; 0 ; $\hat{4}$) : image déformée

2^{ème} étape : déterminer les coordonnées (en pixels) des quatre points \hat{A} , $\hat{1}$, 0, $\hat{4}$ dans le repère « image »

Calculer :

- Distance de A à 1 (en pixel) = $\sqrt{(x_1 - x_A)^2 + (y_1 - y_A)^2} = d_{A1}$ (2 - 21)
- Distance de 1 à 0, de A à 4, de 4 à 0
- Distance de \hat{A} à $\hat{1}$, de \hat{A} à $\hat{4}$, de $\hat{4}$ à 0, de $\hat{1}$ à 0
- Vérifier la qualité du rectangle initial en calculant le cosinus de l'angle entre deux côtés $\overrightarrow{A1}$ et $\overrightarrow{10}$: $\cos(\overrightarrow{A1}, \overrightarrow{10}) = \frac{(x_1 - x_A)(x_0 - x_1) + (y_1 - y_A)(y_0 - y_1)}{d_{A1} \cdot d_{10}}$ (2 - 22)
- Calculer le cosinus de l'angle entre $\hat{A}\hat{1}$ et $\hat{1}0$ par une formule équivalente

On en déduit :

- Allongement relatif dans la direction \vec{X} : (ϵ_{xx})

$$\frac{d_{10}' - d_{10}}{d_{10}} \quad \text{ou} \quad \ln\left(\frac{d_{10}'}{d_{10}}\right) \quad (2 - 23)$$

Qui devrait être égal à

$$\frac{d_{A4}' - d_{A4}}{d_{A4}} \quad \text{ou} \quad \ln\left(\frac{d_{A4}'}{d_{A4}}\right) \quad (2 - 24)$$

- Allongement relatif dans la direction \vec{Y} : (ϵ_{yy})

$$\frac{d_{A1}' - d_{A1}}{d_{A1}} \quad \text{ou} \quad \ln\left(\frac{d_{A1}'}{d_{A1}}\right) \quad (2 - 25)$$

Qui devrait être égal à

$$\frac{d_{40}' - d_{40}}{d_{40}} \quad \text{ou} \quad \ln\left(\frac{d_{40}'}{d_{40}}\right) \quad (2 - 26)$$

- Glissement g_{xy} entre les directions \vec{X} et \vec{Y} = variation de l'angle droit, $\Delta\alpha$ ($\alpha - \alpha_0$), où α est l'angle entre les segments [ab] et [ad] dans la figure (2-50).

Tableau 2-5: Les informations extraites du quadrillage au cours de la traction

Allongement relatif (\vec{Y})	$\epsilon_v = \text{Ln}(L_{\text{finale}}/L_{\text{initiale}})$	$(\epsilon_{ab} + \epsilon_{cd})/2$
Allongement relatif (\vec{X})	$\epsilon_h = \text{Ln}(L_{\text{finale}}/L_{\text{initiale}})$	$(\epsilon_{bc} + \epsilon_{da})/2$
Glissement g_{xy}	$\Delta\alpha$ ($\alpha - \alpha_0$)	$\Delta\alpha(ab, ad)$

Le tableau (2-6) les dimensions des quadrillages marqués sur les éprouvettes dans les 4 groupes aux orientations (0° , 30° , 45° , 60° , 90°).

Tableau 2-6: Les dimensions du quadrillage pour chaque groupe

Orientation	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
0°	26*26 mm ²	21*20 mm ²		
30°	52*44 mm ²			
45°	59*45 mm ²			
60°	58*57 mm ²			
90°	30*24 mm ²			

2.5.3 Procédures

Au cours de test de la traction les images sont prises aux différents paliers aux premiers trois groupes, alors que les tests sont filmés dans le quatrième groupe où les images sont extraites au déplacement donné, tableau (2-7).

Tableau 2-7: Le nombre des photos prises et le déplacement entre deux photos successives au cours de test de traction

Orientation	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
0°	20 mm – 4 photos	10 mm – 5 photos	10 mm – 6 photos	Test continu
30°	25 mm – 4 photos	10 mm – 5 photos	10 mm – 6 photos	
45°	25 mm – 5 photos	10 mm – 6 photos	10 mm – 6 photos	
60°	25 mm – 7 photos	10 mm – 7 photos	10 mm – 7 photos	
90°	40 mm – 4 photos	10 mm – 7 photos	10 mm – 7 photos	

2.6 Résultats et interprétations

Dans la démarche expérimentale mise en place, on étudie l'influence de certains paramètres sur le comportement mécanique de la structure tricotée de type (côte 1 et 1). En premier lieu, nous analysons la variation du comportement mécanique en traction entre les deux directions principales de la structure tricotée à savoir le sens colonnes et le sens rangées. Nous analysons ensuite l'influence de l'orientation des colonnes par rapport l'axe de traction (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) puis la variation des glissements dans l'orientation (45°) en changeant les paramètres de longueur, de bord, et de jauge de la machine. Nous analysons l'influence des paramètres de longueur, de bord, et de jauge de la machine sur le comportement mécanique en traction dans la direction (0°). Puis, nous présentons les courbes de traction uni axiale (contrainte spécifique – déformation logarithmique) dans les directions (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) qui permettent le calcul de la déformation critique et de la rigidité dans la deuxième partie de courbe. L'influence de l'orientation des colonnes par rapport l'axe de traction (0°, 30°, 45°, 60°, 90°) sur l'effet du bord des éprouvette étudiées est mise en évidence. Nous présentons ensuite la variation du comportement mécanique de la structure tricotée en fonction de la longueur de l'éprouvette. L'influence du bord, avec ou sans surjet, sur le comportement mécanique en traction est mis en évidence de même que l'influence de la jauge de la machine. Enfin, une étude sur l'homogénéité des déformations locales dans les directions (0°, 45°) est proposée.

2.6.1 La différence entre le comportement des colonnes et des rangées

La figure (2-51) montre les résultats bruts de deux essais de traction uniaxiale (Force machine –déplacement relatif des mors) pour des éprouvettes du groupe (4). Ces courbes représentent le comportement mécanique global de l'éprouvette en traction dans les deux directions principales de la structure tricotée à savoir le sens colonnes (0°) et le sens rangées (90°). La courbe associée à une traction dans le sens des colonnes montre bien une rigidité élevée et une extensibilité limitée en comparaison avec la courbe équivalente associée à une traction dans le sens des rangées. La force maximale atteint des valeurs égales à 900 [N] dans la direction des colonnes et 300 [N] dans la direction des rangées. Par contre, l'allongement maximal de la structure est égal à 250 [mm] dans la direction des rangées et [50] mm dans la direction des colonnes. Ces propriétés nous donnent une idée sur les potentiels de la structure tricotée, où le comportement change complètement en alternant entre les deux directions principales colonnes et rangées.

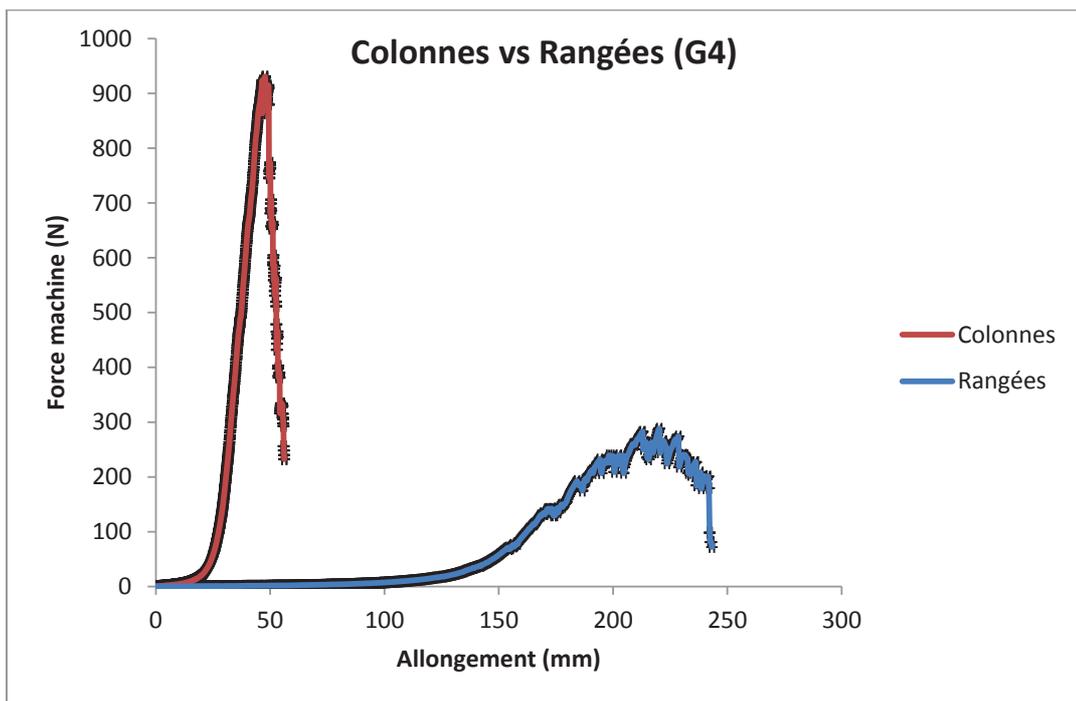


Figure 2-51: La différence entre le comportement des colonnes et des rangées

2.6.2 L'influence de l'orientation sur le comportement mécanique

La figure (2-52) montre les résultats bruts de cinq essais de traction uni axiale (Force machine – déplacement relatif des mors) pour des éprouvettes du groupe (4) ayant des directions ($0^\circ, 30^\circ,$

45°, 60°, 90°) des colonnes par rapport l'axe de traction. Ces courbes permettent de voir l'influence de l'orientation sur le comportement mécanique en traction uni axiale de la structure tricotée. Nous remarquons que l'extensibilité et la rigidité de la structure tricotée sont modifiées en fonction de l'orientation des colonnes par rapport l'axe de traction. Ces propriétés doivent bien sûr être prises en compte lors de la conception de renforts en tenant compte des exigences des applications souhaitées.

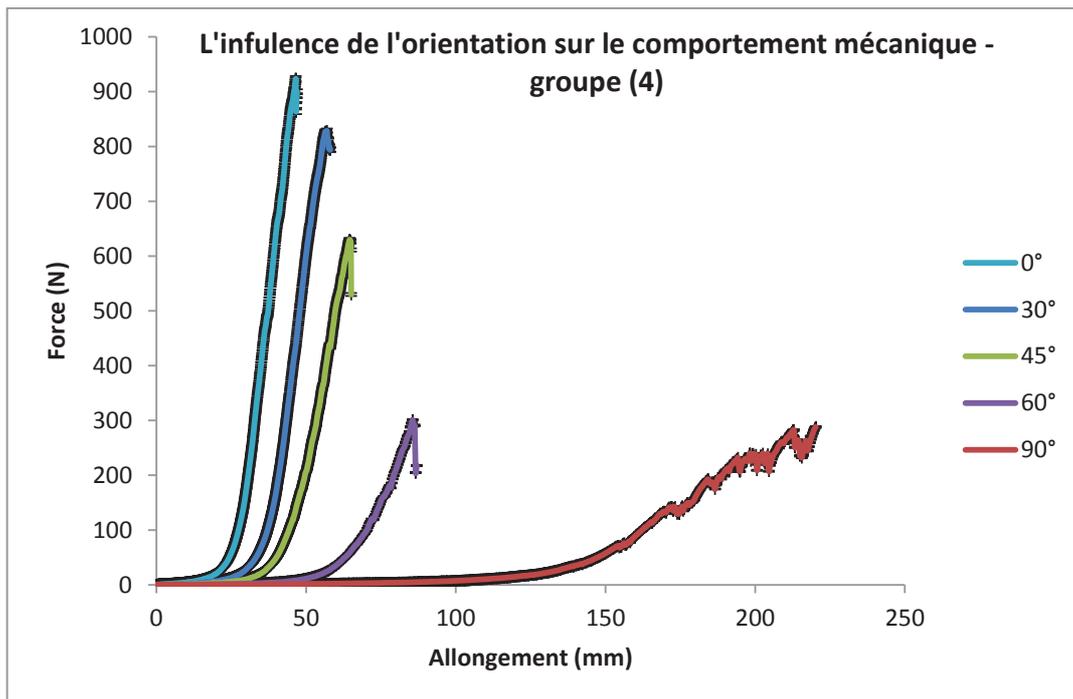


Figure 2-52: L'influence de l'orientation sur le comportement mécanique

2.6.3 Le glissement local dans une structure tricotée – (45°)

La figure (2-53) présente les courbes de glissement, définies comme la variation de l'angle entre les segments [AB] et [AD], dans la figure 2.50, dans la zone centrale d'étude des quatre groupes d'éprouvettes lors d'essais où la direction des colonnes est initialement inclinée à 45° de la direction de traction. Ces courbes montrent l'influence des paramètres de longueur, de bord, de jauge de la machine sur le glissement dans ces diverses éprouvettes. L'influence du rapport longueur/largeur est illustrée par la comparaison des résultats pour les groupes (1) et (2). Dans le groupe (1), où ($W=L$), le glissement évolue linéairement en fonction de l'effort de traction : cela peut être imputé à l'absence de bandes de colonnes (ou rangées) bloquées dans l'éprouvette. Le

glissement se fait le long de colonnes de séparation entre les zones secondaires selon l'analyse schématique de l'éprouvette. Dans le groupe (2), où ($W=L/2$), un comportement non linéaire apparaît correspondant bien avec les deux phases « structurelle » et « milieu continu » de la structure tricotée au cours de la traction uni axiale : au début le glissement augmente très rapidement pour des augmentations faibles de l'effort de traction, puis une phase transitoire apparaît au point de blocage (noté c) qui est suivie d'une zone d'augmentation rapide de la force sans évolution nouvelle du glissement. Ce glissement est généré par les bandes des colonnes et rangées bloquées dans les mâchoires. L'influence du bord est illustrée en comparant les résultats pour les groupes (2) et (3). Pour le groupe (3), le glissement est bloqué par le surjet sur les deux bords libres de l'éprouvette, ce qui entraîne une diminution d'environ 5° du glissement par rapport au groupe (2). L'influence de la jauge de la machine est illustrée en comparant les résultats des groupes (2) et (4). Pour le groupe (4), où la jauge est égale à 13, l'augmentation de la densité surfacique de la structure tricotée s'accompagne d'une importante extension (doublement) de la phase de déformation structurelle.

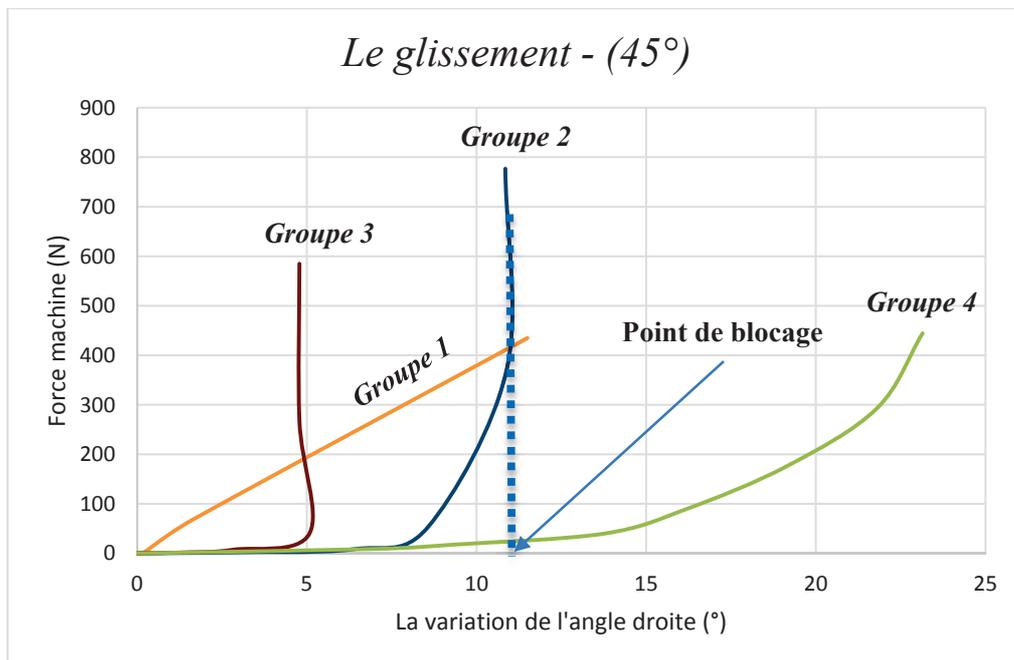
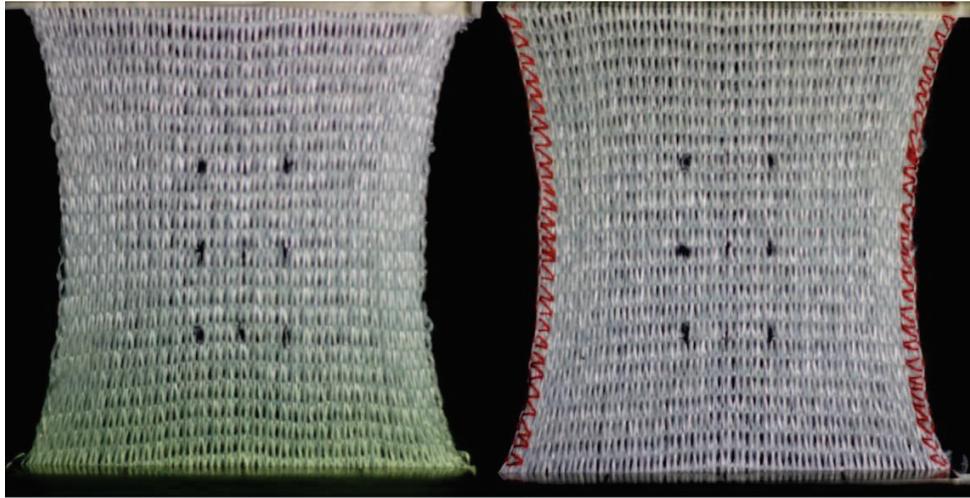


Figure 2-53: Le glissement local dans une structure tricotée – (45°)

2.6.4 L'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique

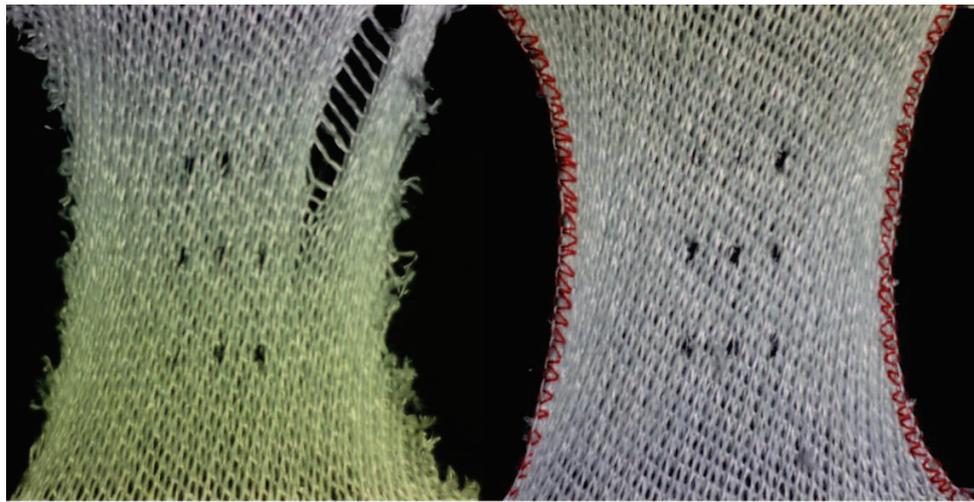
Afin de pouvoir identifier l'impact des paramètres du rapport longueur/largeur de l'éprouvette, de bord et de jauge de la machine sur le comportement mécanique en traction de la structure tricotée, la figure (2-56) présente les évolutions de la contrainte spécifique en fonction de l'allongement relatif dans la direction de traction (déformation logarithmique) pour les quatre groupes d'éprouvettes dans des essais où la direction des colonnes correspond à la direction de traction. La rigidité spécifique E et la déformation globale critique ε_c sont déterminées pour les quatre groupes et sont présentées dans le tableau (2-8). La déformation critique caractérise la fin de la phase « structurelle » et le début de la phase « milieu continu ». La rigidité spécifique reflète le comportement de la structure tricotée dans la phase « milieu continu ». Ces deux valeurs peuvent être utilisées comme des critères pour comparer l'influence des paramètres sur le comportement mécanique de la structure tricotée. La comparaison des résultats des groupes (1) et (2) montre une diminution de la déformation globale critique ($0,75$) à ($0,53$) associée au doublement du rapport longueur/largeur, alors que la rigidité spécifique reste constante. L'influence du paramètre de bord est traduite par la comparaison des résultats des groupes (2) et (3) : la déformation globale critique évolue peu (de $0,53$ à $0,50$), alors que la rigidité spécifique (E) chute de $66.7 N/n$ à $44.4 N/n$, lorsque les deux bords sont bloqués par un surjet qui introduit un blocage des bords latéraux, la figure (2-54). La comparaison entre les deux cas, surjet et sans surjet, montre que le surjet sert à répartir les déformations le long des bords au lieu de leur concentration dans un point dans le cas de sans surjet, ce qui contribue à réduire la rigidité spécifique (E) de la structure tricotée lors de traction, les figures (2-54) et (2-55). L'effet du paramètre de jauge de la machine (ou la masse surfacique de la structure tricotée) apparaît en comparant les résultats des groupes (2) et (4) : l'indice d'extensibilité diminue de $0,53$ à $0,42$, alors que la rigidité spécifique E augmente de $44.4 N/n$ à $66.7 N/n$. Ce phénomène s'explique par l'augmentation de la jauge de la machine (de 7 à 13) qui augmente le nombre de colonnes par unité de largeur et par conséquent, un effet plus élevé des colonnes, ce qui diminue la taille des mailles, soit l'extensibilité de la structure.



a) Sans surjet

b) Avec surjet

Figure 2-54: L'effet du bord dans la direction (0°)



a) Sans surjet

b) Avec surjet

Figure 2-55: L'effet du bord dans la direction (30°)

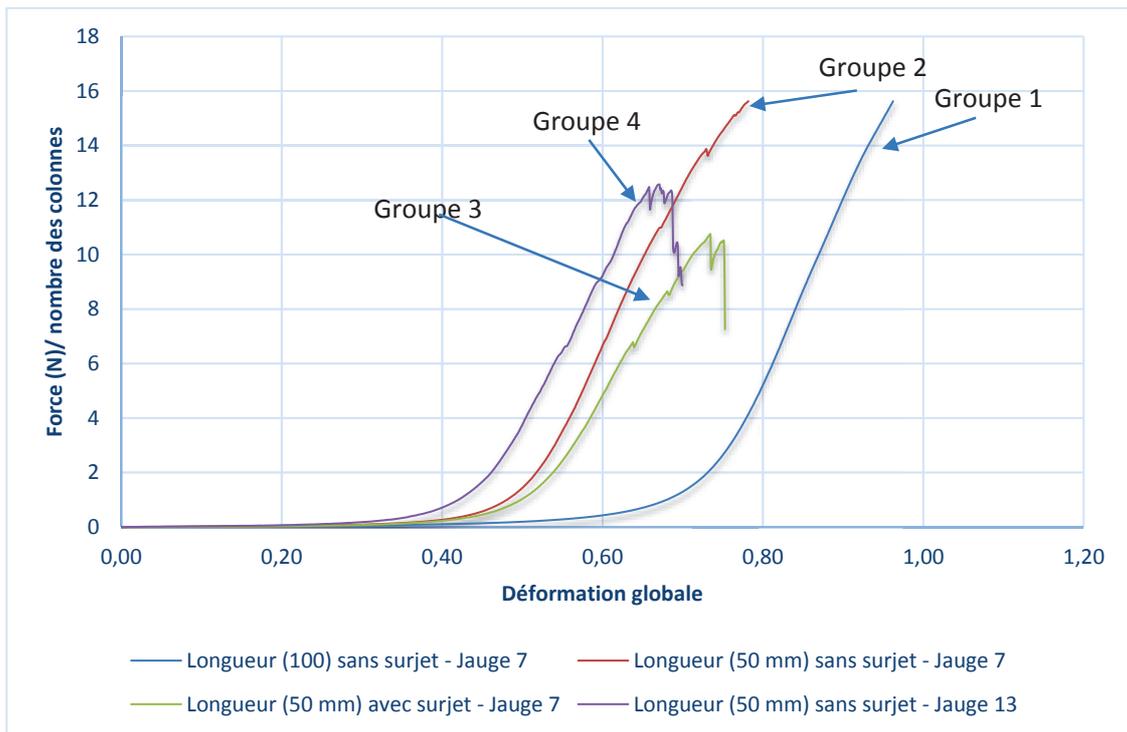


Figure 2-56: L'influence des différents paramètres sur le comportement mécanique

Tableau 2-8: La rigidité spécifique et la déformation globale critique des éprouvettes dans la direction (0°) en fonction des paramètres de la longueur, du bord et la jauge de la machine.

Orientation (0°)	E (N/n)	ε_c
Groupe (1)	66.7	0,75
Groupe (2)	66.7	0,53
Groupe (3)	44.4	0,5
Groupe (4)	57.1	0,42

2.6.5 Courbes de traction locale de Groupe (4)

La figure (2-57) illustre les courbes de traction uni axiale d'un point de vue local pour les éprouvettes du groupe (4) avec diverse orientations des colonnes par rapport à la direction de traction (0° , 30° , 45° , 60° , 90°). Dans ces courbes, la contrainte spécifique est calculée en divisant la force de traction par le nombre total des colonnes et rangées bloquées dans les mâchoires. Le nombre des colonnes et rangées bloquées est déterminé en faisant référence à l'analyse schématique de l'éprouvette décrite précédemment, des dimensions de la zone d'intersection (h) et (k) entre les deux zones principales, et de la densité surfacique de la structure tricotée. La

déformation locale est calculée en suivant le déplacement des côtés verticaux (ab), (cd) dans le quadrillage, figure (2-50), au cours de la traction. Afin d'évaluer l'influence de l'orientation des colonnes (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) sur le comportement mécanique de la structure tricotée, la rigidité spécifique et la déformation critique au niveau local sont déterminées et présentées dans le tableau (2-6). L'extensibilité de la structure tricotée augmente progressivement lorsque l'angle entre l'axe de traction et les colonnes bloquées dans les mâchoires varie de 0° à 90° (voir valeurs de la déformation critique dans le tableau (2-6)). Par ailleurs, les valeurs du module spécifique E restent constants pour les orientations (0° , 30° , 45°) où l'effet des colonnes est primordial selon l'analyse schématique, par contre ce module commence à diminuer à partir de l'angle (60°) où l'effet des colonnes devient faible par rapport l'effet des rangées.

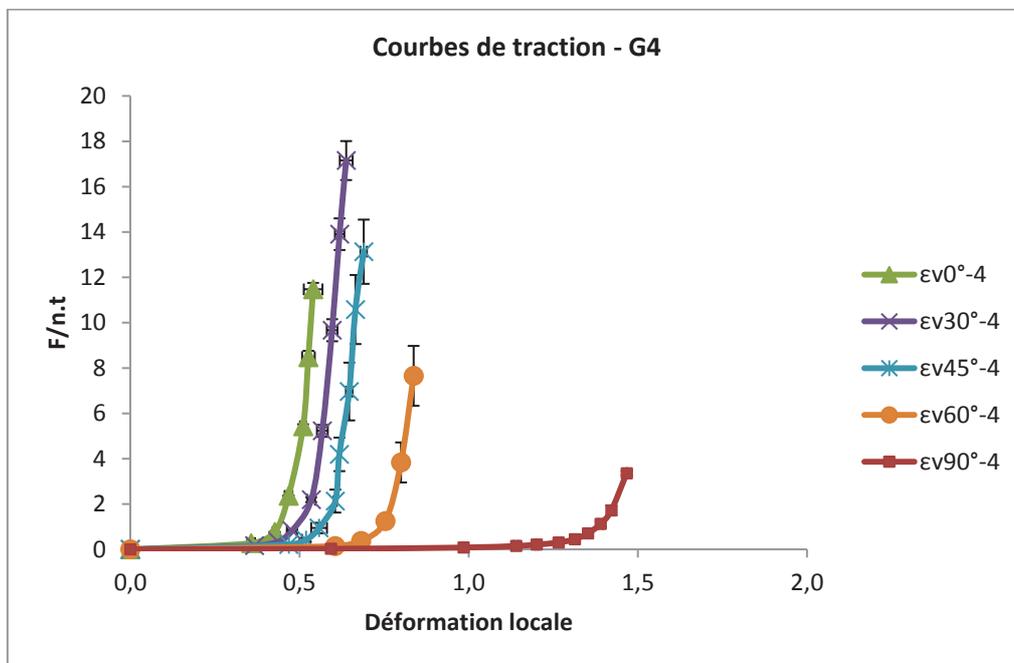


Figure 2-57: Courbes de traction locale de Groupe (4)

Tableau 2-9: La rigidité spécifique, la déformation locale critique et le nombre des colonnes et rangées bloquées des éprouvettes du groupe (4) en fonction de l'orientation (0°, 30°, 45°, 60°, 90°)

<i>Groupe (4)</i>	<i>E (N/n_i)</i>	<i>Déformation locale critique</i>	<i>Le nombre des colonnes et rangées bloquées (n_i)</i>
<i>Orientation (0°)</i>	200	0,49	74
<i>Orientation (30°)</i>	200	0,53	49
<i>Orientation (45°)</i>	200	0,57	42
<i>Orientation (60°)</i>	160	0,76	33
<i>Orientation (90°)</i>	18.8	1,33	46

2.6.6 La déformation globale et locale

Dans cette étude, la déformation globale est calculée par le logarithme du rapport (L/L_0) entre la longueur finale de l'éprouvette (L) et la longueur initiale de l'éprouvette (L_0), alors que la déformation locale est calculée par le logarithme du rapport entre la distance entre deux points verticaux avant chargement du quadrillage (ab, cd, ...) sur l'éprouvette et la distance entre les mêmes points dans l'état de chargement. Théoriquement, les deux valeurs globale et locale doivent être identiques. Expérimentalement, les deux courbes de traction globale et locale, figure (2-58), divergent après le point de blocage structurel (c). L'origine de ce phénomène est du fait que la structure tricotée n'est pas un milieu continu. Donc, lorsque la charge est transférée aux fibres après le point de blocage, l'effet de bord augmente et une zone de déformations apparaît sur les bords libres. La ligne de séparation entre la zone de concentration et la zone normale est la colonne la plus sollicitée dans la structure tricotée, en conséquence, la rupture se fait le long de cette colonne, figure (2-59). D'un autre côté, afin d'évaluer la déformation locale, la zone d'étude appartient à la zone normale, qui peut être optimisée en augmentant le largeur de l'éprouvette, où l'effet de bord peut devenir négligé. Par conséquent, les contraintes internes générées dans la structure tricotée par la force de traction se concentrent au maximum dans les bords, alors que les contraintes dans la zone normale sont réparties de manière plus régulière. En conclusion, la déformation dans la zone normale (zone de quadrillage) est plus faible la déformation dans la zone de concentration, et donc, une divergence entre les deux courbes globale et locale apparaît, figure (2-58).

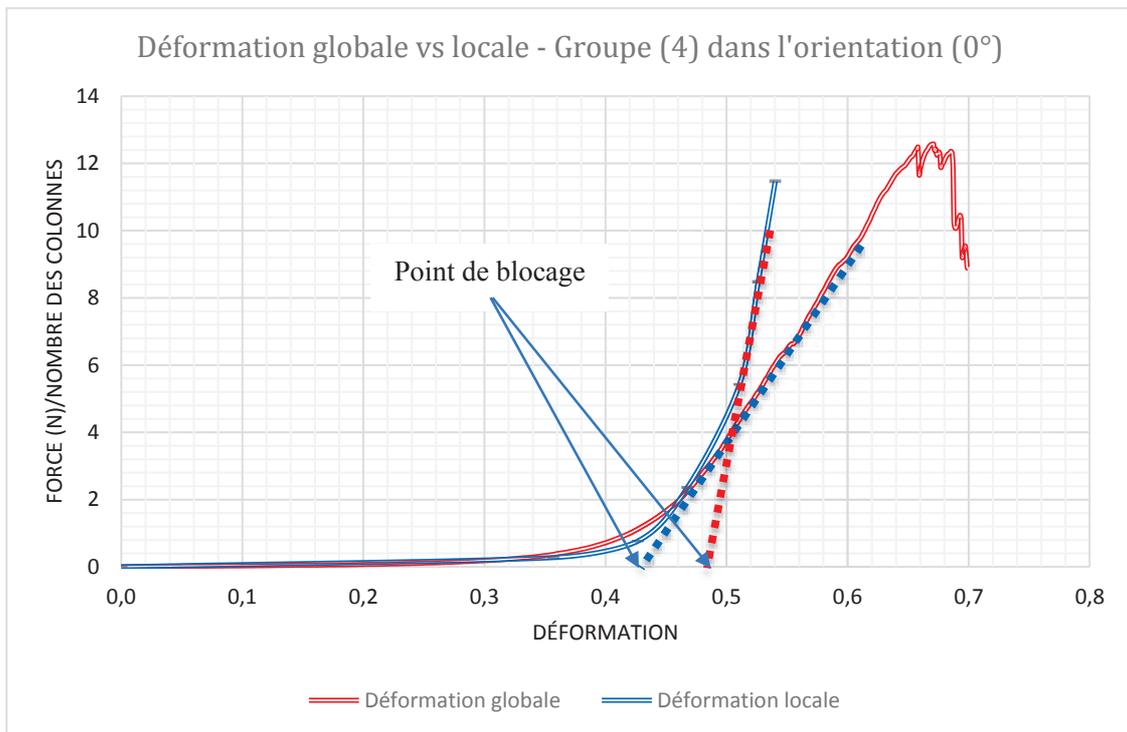


Figure 2-58: Les courbes de la déformation globale et locale

Tableau 2-10: Les valeurs de la rigidité spécifique et de la déformation critique des éprouvettes du groupe (4) dans l'orientation (0°) au niveau globale et locale

Groupe (4) – l'orientation (0°)	E (N/n)	Déformation critique
Déformation globale	66.7	0,42
Déformation locale	200	0,49

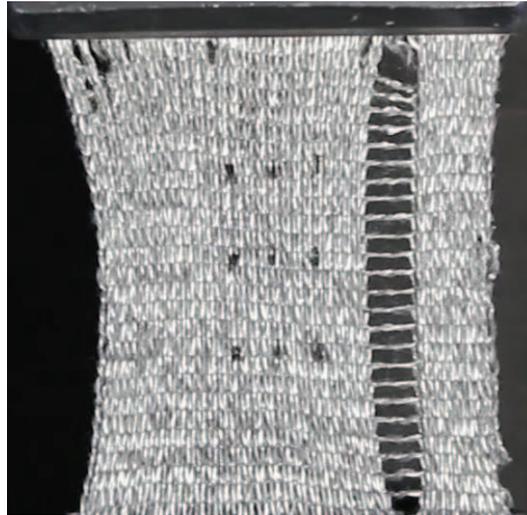


Figure 2-59: La rupture d'une éprouvette dans la direction (0°)

2.6.7 L'influence de l'orientation des colonnes sur l'effet du bord

Le rétrécissement de la structure tricotée dans la direction orthogonale à la direction de traction est variable selon l'orientation des colonnes (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) par rapport l'axe de traction. L'effet de bord génère une zone de concentration de déformations où la ligne de séparation avec le bande des colonnes bloquées dans le cas de (30° , 45° , 60°) est la plus sollicitée ; donc, la rupture se fait le long de cette linge, figure (2-61). Afin d'évaluer le rétrécissement de la structure tricotée (groupe 4) la déformation locale est calculée sur les côtés initialement perpendiculaires à la direction de traction du quadrillage (bc, ad) au cours de la traction dans les orientations (0° , 30° , 45° , 60° , 90°). La figure (2-60) illustre que la déformation transversale dépend de l'orientation des colonnes bloquées et du nombre des colonnes bloquées dans l'éprouvette. Lorsque l'angle de traction varie de 0° à 90° , le nombre des colonnes bloquées diminue et la déformation transversale augmente.

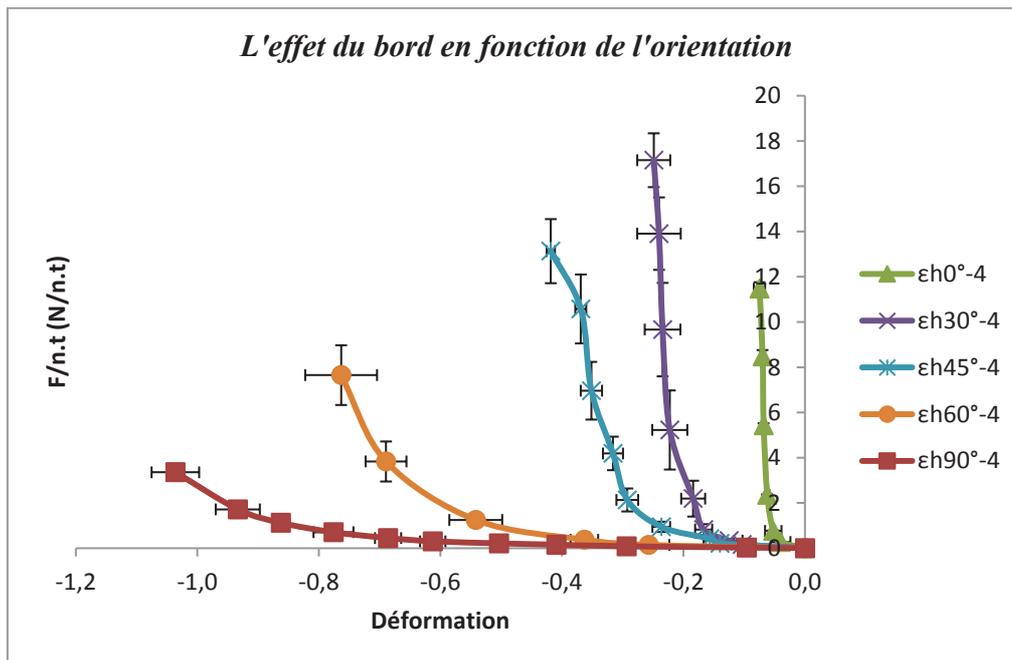


Figure 2-60: Le rétrécissement de la structure tricotée en fonction de l'orientation

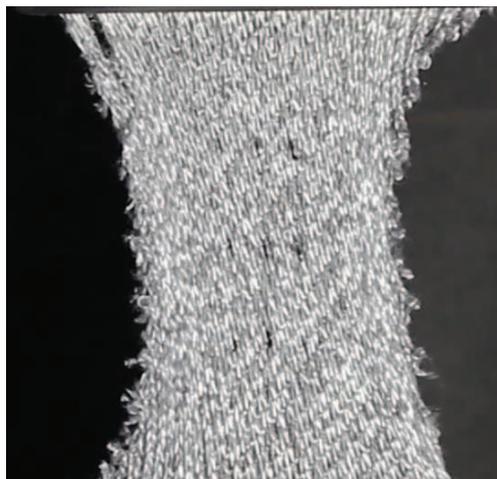


Figure 2-61: Le début de la rupture sur la ligne de séparation entre la bande des colonnes bloquées et la zone secondaire dans éprouvette à (30°) du groupe (4)

2.6.8 Vérification de l'homogénéité des déformations locales – Groupe 4 (0°, 45°)

Afin de qualifier la plus ou moins grande homogénéité des déformations locales dans la structure tricotée, le quadrillage décrit dans la méthode optique simplifiée est divisé en quatre petits carrés. Les déformations locales (transcendamment, un champ de déformation simplifiée) de chaque côté de ces carrés (grand et petits) dans la direction de traction sont calculées. Les figures

(2-62) et (2-63) illustrent les courbes de traction en fonction de la déformation locale dans la direction de traction. Les courbes continues dans les deux figures représentent cette déformation locale calculée sur le grand carré (a, b, c, d) du quadrillage, alors que les courbes en pointillés représentent cette même déformation locale calculée sur les divers petits carrés. La superposition de ces courbes dans une seule figure permet d'apprécier le degré d'homogénéité de cette déformation dans la zone centrale de la structure tricotée. Dans les figures (2-62) et (2-63) la courbe dite « globale » représente les déformations moyennes dans la direction de traction calculées sur le grand quadrillage, alors que les six courbes pointillées représentent les mêmes résultats calculés sur les six côtés des quatre carrés construits sur le grand quadrillage initial. On peut ainsi apprécier les défauts d'homogénéité dans cette zone centrale aux effets d'incertitudes près. Ces calculs ont été effectués également pour les déformations linéiques transversales et les glissements pour lesquels des dispersions plus importantes sont observées. L'utilisation de l'essai de traction et de ses résultats globaux et locaux doit donc être faite avec beaucoup de précautions si on veut les utiliser pour bâtir des lois de comportement de structures tricotées utilisables dans les outils de modélisation.

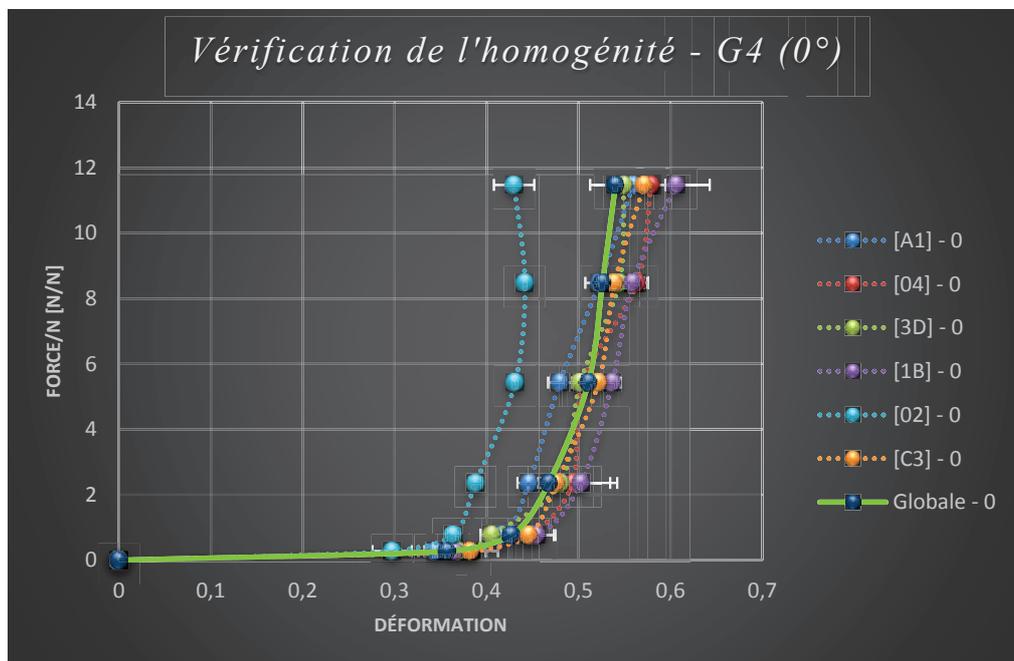


Figure 2-62: Vérification de l'homogénéité des déformations locales – Groupe 4 (0°)

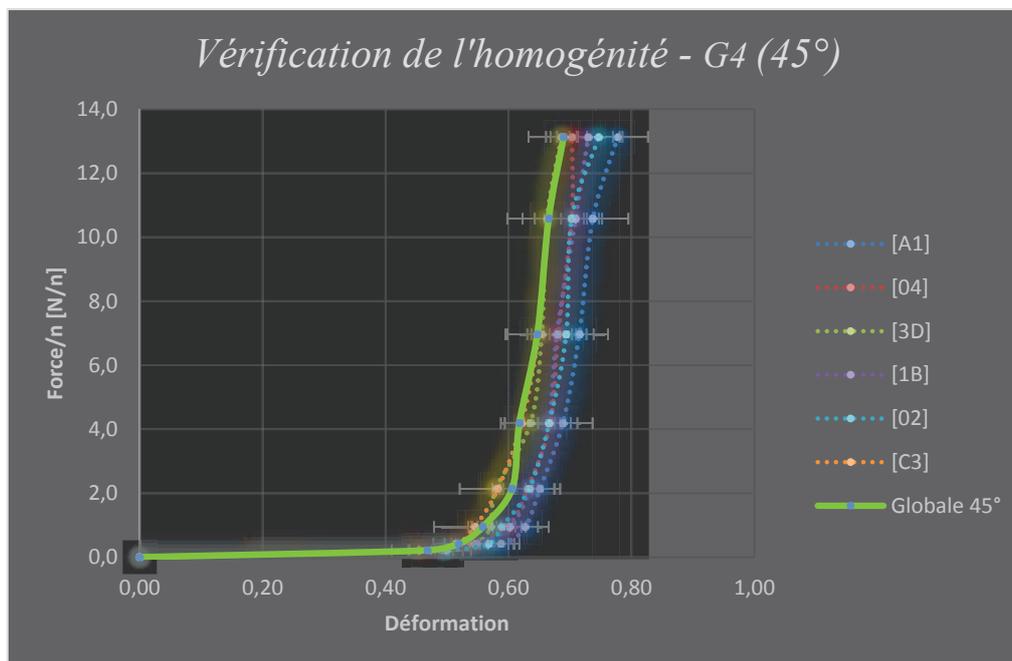


Figure 2-63: Vérification de l'homogénéité des déformations locales – Groupe 4 (45°)

2.7 Conclusions & perspectives du chapitre II

Dans ce chapitre, nous avons essayé de caractériser le comportement mécanique en traction uni axiale d'une structure tricotée de type (côte 1 et 1) en fil acrylique. Cette étude expérimentale présente une vue globale sur l'influence des certains paramètres (le facteur de forme de l'éprouvette ou rapport longueur/largeur, l'effet de bord, la jauge de la machine et l'orientation des colonnes) sur le comportement mécanique en traction uni axiale. L'effet de l'orientation des colonnes par rapport l'axe de traction a été analysé schématiquement sur la base d'une définition géométrique de zones bloquées, libres, secondaires et d'intersection dans l'éprouvette afin d'avoir une compréhension approfondie sur l'origine des variations du comportement mécanique de la structure tricotée. La méthode optique simplifiée utilisée dans cette étude nous a permis d'avoir une idée sur l'évolution des déformations locales dans la zone du quadrillage, et de vérifier leur homogénéité dans cette zone. La courbe de traction (effort spécifique – déformation logarithmique) nous a permis de déterminer la rigidité représentée par la module spécifique, et la déformation critique ϵ_c qui représente la phase transitoire qui accompagne le passage d'un comportement

structurel à un comportement plus proche d'un milieu continu et qui a été définie par un point de blocage c . Un effort spécifique (σ_{sp}) est défini en divisant la force de traction uni axiale par le nombre total des colonnes et/ou rangées dans les zones principales bloquées défini à partir de notre analyse schématique des éprouvettes. La déformation critique ϵ_c peut être un critère pour faire le lien avec la mise en forme de la structure tricotée dans le troisième chapitre où il est recherché de solliciter la structure au-delà de ce point critique.

Cette étude expérimentale limitée permet malgré tout de confirmer le potentiel important d'une structure tricotée, du fait de sa déformabilité très élevée, pour des utilisations comme renforts dans des applications de milieux composites. La complexité structurelle des structures tricotées exige une étude détaillée pour déterminer tous les paramètres qui entrent en jeu. A cet effet, cette étude pourra être prolongée dans certaines voies :

- Développement d'un algorithme robuste de corrélation d'image prenant en compte l'extensibilité élevée des structures tricotées, et l'aspect tridimensionnel d'une boucle (maille), pour accéder à une caractérisation plus complète des champs de déplacement et de déformations.
- Amélioration des conditions d'essais : En augmentant la largeur de mâchoire afin d'élargir la zone d'étude pour minimiser l'effet de bord, et donc, d'avoir plus de données caractérisant bien le comportement membranaire des structures tricotées. En élaborant un système mécanique mobile qui accouple le caméscope avec le banc d'essai afin d'améliorer la qualité des mesures et permettre l'accès à une évolution continue des informations recherchées. En tricotant les éprouvettes sur mesure dans différentes orientations (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) directement sur la machine à tricoter pour éliminer les défauts rencontrés dans la phase de préparation des éprouvettes.
- Variation les paramètres d'étude liés à la fibre (origine, procédé de fabrication...), au fil (titre, torsion, ...), à la contexture (Jersey, (côte 1 et 1), Côte anglaise...), et à la machine (jauge, tension du fil, réglage de came d'abattage.....), afin d'avoir plus d'informations sur tous paramètres qui influencent le comportement mécanique de la structure tricotée. Par conséquent, construction d'un modèle mécanique robuste prenant en compte ces paramètres.

3. CHAPITRE III : La mise en forme d'une structure tricotée

3.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude de la mise en forme d'une structure tricotée à maille cueillie de type (côte 1 et 1). L'étape de mise en forme des renforts secs est la première phase du procédé RTM, elle permet d'étudier la « drapabilité » des renforts secs. La « drapabilité » des structures tissées dans l'industrie textile (Abdin et al. 2013; Süle 2012) a longtemps été mesurée par un banc d'essai de type « drapmeter » (Cusick 1968; Peirce 1930) qui ne caractérise qu'un comportement en flexion de la structure textile. Cependant, dans le cas de formes avec des doubles ou triples courbures, une déformation couplée se produit dans les structures tissées qui ne peut être associée qu'à de la flexion. De nombreuses études portent sur l'analyse expérimentale et numérique de la déformabilité, lors de la mise en forme, des renforts tissés (Boisse et al., 2001; Buet-Gautier et Boisse, 2001; Cao et al., 2008; Dumont et al., 2003; Hivet et Boisse, 2008; Launay et al., 2008; Lomov et al., 2008; Ouagne et al., 2013, 2012, 2011; Zhu et al., 2011), ou des NCF (Bel, 2011; Heß and Himmel, 2011a; Lee et al., 2007; Willems et al., 2009). A l'opposé peu de travaux portent sur le comportement des tricots lors de cette étape du procédé RTM, malgré leur grande extensibilité.

Dans un premier temps une étude bibliographique est réalisée pour situer le contexte de cette étude en vue d'applications de type milieux composites. Puis la mise en œuvre des matériaux composites et les mécanismes physiques de déformation d'un renfort textile lors d'une mise en forme sont abordés. Cette étude, basée sur la littérature, est conclue par une présentation des modes de déformation aux échelles macro et micro dans des structures tissées et tricotées afin de montrer les mécanismes primordiaux pour les deux types de structures. La partie expérimentale du travail est ensuite présentée, d'une part par la description du banc d'essai d'emboutissage, et, d'autre part, par les paramètres du procédé. Les explications concernant la méthode optique utilisée et des corrections géométriques effectuées compte-tenu du caractère 3D de la structure emboutie sont ensuite données. Les principaux résultats des campagnes d'essais réalisées sont présentés et analysés. Un lien entre la mise en forme de la structure tricotée et les résultats d'essais présentés au chapitre 2 est enfin proposé.

3.2 La mise en œuvre des matériaux composites

3.2.1 Le renfort textile pour matériau composite

Un matériau composite est réalisé à partir de plusieurs constituants non miscibles : il s'agit le plus souvent d'un renfort et d'une matrice. Cette combinaison présente des caractéristiques mécaniques qu'un constituant unique n'offre pas (Peters 2001).

La matrice, généralement organique (résine époxy par exemple), enrobe le renfort. Elle le maintient en position et assure la transmission des efforts ainsi que la cohésion du composite final. Le renfort, qui se présente sous différentes formes (particules, nano fibres, fibres continues, etc.), confère au composite ses principales propriétés mécaniques. Les renforts à fibres longues continues sont les plus utilisés dans l'industrie pour les pièces structurales. Ces types de renfort apparaissent sous plusieurs architectures répertoriées dans la littérature soit par la dimension des préformes (Kamiya et al. 2000; Mouritz et al. 1999; Tong 2002), soit par la notion d'axe (ou de direction) des renforts (Adanur 1995; Fukuta & Aoki 1986; Nemoz 2003), soit par les technologies utilisées (tricoté, tressé, tissé, etc.). La structure des renforts textiles peut être bidirectionnelle (tissu 2D) ou multidirectionnelle, figure (3-1).

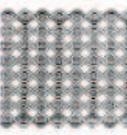
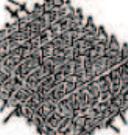
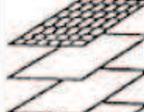
Axis / Dimension	0 NON-AXIAL	1 MONO-AXIAL	2 BI-AXIAL	3 TRI-AXIAL	n MULTI-AXIAL
1D		 Fil - Roving			
2D	 Mat à fibres coupées Cutted fibers mat	 Nappe UD UD web	 Armure toile tissée Twill weave	 Tissage triaxial Tri-axial weaving	 Tricotés multiaxiaux Multi-axial knits and weaves
3D		 Tresse 3-D Tridimensional braid	 Tissage multicouche Multilayer weaving	 Tissage triaxial 3-D 3-D triaxial weaving	 Tissage multiaxial n-D n-D multi-axial weaving
	 Non-tissé 3-D 3-D nonwoven	 Laminé cousu Stitched laminate	 Poutre en H ou I H- or I-shaped beam	 Nid-d'abeilles Honeycomb	 Tricot double paroi Double wall fabric

Figure 3-1: Principaux types d'architectures textiles de renfort, ()

Enfin, les possibilités offertes par les procédés textiles étant nombreuses, le renforcement de structures dans l'épaisseur a été mis au point. Les NCF (Non Crimp Fabric) (Heß & Himmel 2011b; Heß & Himmel 2011a; Karahan et al. 2010; Lomov et al. 2002; Wang 2002), s'inspirent de ce principe. Une observation plus précise d'un renfort textile, figure (3-2), met en évidence le caractère multi échelles de cette architecture.

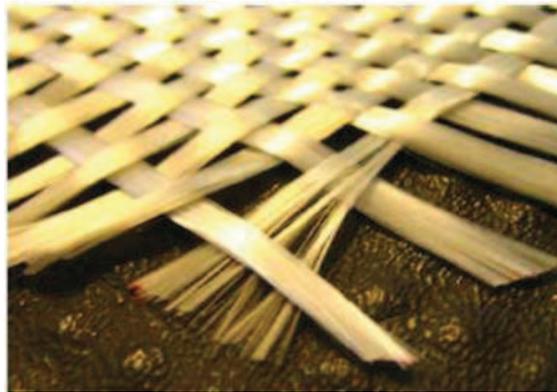


Figure 3-2: Renfort à armure toile fibre de verre, (Najjar 2012)

Le renfort peut être caractérisé à trois échelles différentes, figure (3-3) : l'échelle microscopique (filaments/mèche), l'échelle mésoscopique (mèche/ cellules élémentaires) et l'échelle macroscopique (préforme).

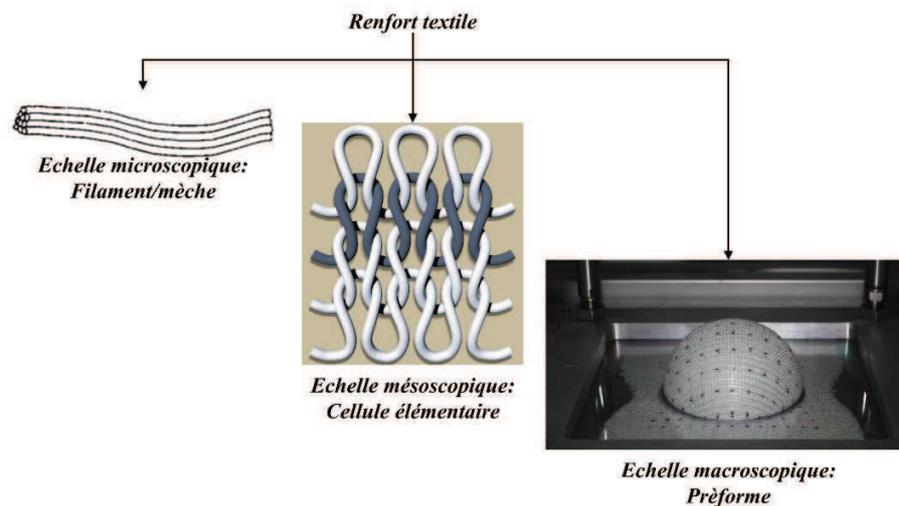


Figure 3-3: Aspect multi échelle de la structure tricotée

Cet aspect multi-échelles est le facteur dominant pour analyser et comprendre le comportement de renforts textiles. Il gouverne, en particulier, les modes de déformation des renforts tissés et tricotés.

3.2.2 Les procédés de mise en œuvre des composites

Les procédés de fabrication des composites ont évolué vers des solutions qui tendent à augmenter les cadences de production et à diminuer l'exposition des personnels aux composés organiques volatils (COV), dans le cas des résines thermodurcissables.

Dans le cas des matériaux composites, le choix d'un procédé de fabrication ne peut s'opérer de manière dissociée du choix des constituants du matériau composite. Les différents procédés de fabrication peuvent être classifiés selon des technologies (en moule fermé ou moule ouvert) (Binétury 2004), ou selon l'état physique des résines utilisées (Binétury 2006). Parmi les principaux procédés on peut citer les procédés associés à la consolidation d'un renfort imprégné de résine liquide, par moulage (au contact, en autoclave), par enroulement filamentaire, ou les techniques par pultrusion dans le cas de moules ouverts.

Notre étude est relative à la famille des procédés de type LCM (Liquid Composite Molding) qui utilisent le principe de transfert de résine et dont l'intérêt est croissant car ils présentent un excellent potentiel de production en grande série (Bathias 2013; Chevalier & Berbain 1997; Parnas 2000; Rudd et al. 1997). Dans cette famille on dissocie les procédés dits par infusion, où la résine est transférée dans le renfort par dépression (Bardonnnet 1997; Ouagne et al. 2009; Wang 2010) des procédés par injection où la résine est poussée dans le renfort.

Parmi les procédés par injection, le procédé dit RTM (Resin Transfer Moulding) est, actuellement, l'un des procédés les plus rencontrés industriellement pour la fabrication des matériaux composites à renfort textile (Bickerton et al. 1997; Boisse 2004; Kalpakjian & Schmid 2013; Potter 1999). Ce procédé comporte deux phases, figure (3-4) :

- Une première phase de préformage du renfort textile.
- Une seconde phase d'injection de la résine (en coulée basse pression) dans la préforme au sein d'un moule hermétique et thermiquement régulé.

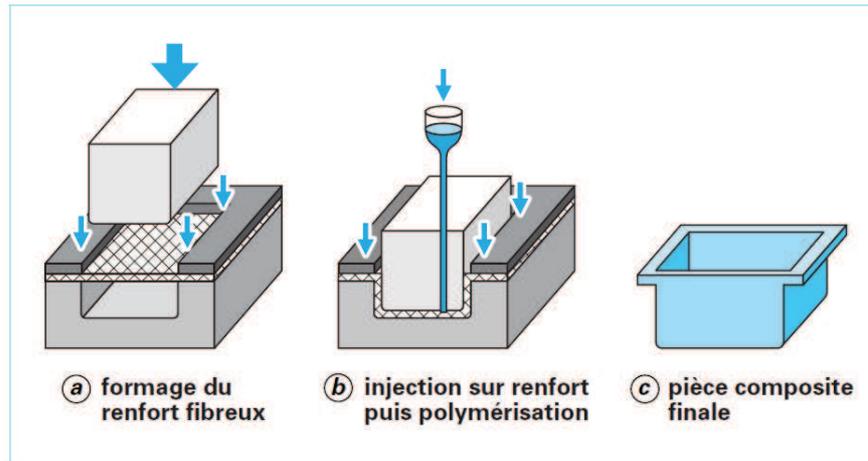


Figure 3-4: Les principales étapes du procédé RTM, (Boisse 2004)

La première étape de cette opération est fondamentale. En effet, à l'issue de cette étape, la maîtrise des paramètres de la préforme, tels que l'orientation et la densité des renforts, est essentielle pour l'analyse du comportement mécanique de la pièce composite (Crookston et al. 2002; Mattsson et al. 2007; Potluri et al. 2006; Smith et al. 1997). Par ailleurs ces paramètres influent sur la perméabilité des renforts et par conséquent sur la seconde étape du procédé, celle d'imprégnation (Arbter et al. 2011; Turner & Hjelmstad 2005; Bickerton et al. 1997).

Enfin la maîtrise de cette étape de préformage permet d'éviter, à l'échelle de la préforme des défauts tels que :

- La rupture des fibres, dans le cas où les efforts dans les mèches dépassent leurs résistances maximales en tension.
- La formation de boucles à cause d'une compression excessive, (Lee et al. 2007; Ouagne et al. 2011).
- La localisation de plis générés par des angles de cisaillement trop importants, (Allaoui et al. 2011; Zhu et al. 2011; Boisse et al. 2011; A. G. Prodromou & Chen 1997).
- L'inhomogénéité de la préforme en termes de répartition de fractions volumiques de renforts, par des zones plus denses ou au contraire plus espacées qui vont modifier la perméabilité lors de la phase d'imprégnation.

L'intégrité fonctionnelle de la pièce composite obtenue par le procédé RTM est directement liée à la qualité du préformage. Il est important de maîtriser cette phase de mise en forme, et en particulier dans les domaines de l'évolution des plis et de la prédiction des défauts. Les travaux dans ce chapitre sont essentiellement dédiés à l'analyse expérimentale de la déformabilité des structures tricotées lors de l'étape de mise en forme, et le lien avec le comportement membranaire identifié dans le chapitre 2.

3.3 Mécanismes de déformation d'un renfort lors de la mise en forme

Lors de la mise en forme, les mécanismes de déformations dans le renfort sont complexes. Cette étape génère des déformations bi axiales, des déformations de cisaillement dans le plan ainsi que des déformations de flexion hors-plan et de compaction transverse (Badel et al. 2007). Dans le paragraphe (3.2.1), l'aspect multi échelles du renfort textile a été évoqué. En effet cette caractéristique est prédominante pour la caractérisation du comportement du renfort.

La déformation du tissu est gouvernée par des mécanismes spécifiques (Long 2007), totalement différents de ceux qui gèrent la déformation des matériaux macroscopiquement homogènes (i.e. élasticité et plasticité pour les métaux), (Chaboche & Lemaitre 2009). Néanmoins, les observations expérimentales montrent que les mécanismes les plus influents sur la déformation d'un matériau textile sont ceux qui existent (voire coexistent) à l'échelle mésoscopique, échelle dite des « mèches », (Long 2007).

3.3.1 Cisaillement dans le plan

Le mécanisme clé de la déformation des tissus, notamment ceux à fibre de forte rigidité, pour l'obtention des formes développables ou non est le cisaillement dans le plan, (Long 2007).

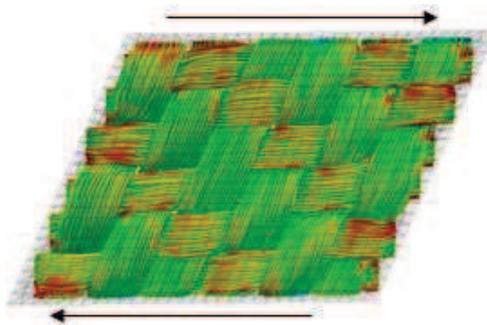


Figure 3-5: Simulation des mèches soumises au cisaillement, (Durville 2009)

Ce mécanisme se manifeste par une rotation des mèches au niveau des entrecroisements, figure (3-6). Le choix de la structure textile qui caractérise l'entrelacement est donc primordial. Dans le cadre des renforts tissés on parle souvent de l'effet treillis (Youssef 2005) qui apparaît surtout au début du processus de déformation. Cette rotation engendre une diminution de l'angle entre la chaîne et la trame, initialement égal à 90° , et en conséquence un accroissement de l'angle de cisaillement γ (angle complémentaire) (Duong 2008; Cao et al. 2008; Launay et al. 2008). Cet effet conduit à une compaction des mèches suivie d'un blocage pour une valeur de seuil de l'angle de cisaillement appelé (γ_{blocage}) spécifique à l'architecture du tissu. Au-delà de cette valeur critique on assiste à la formation de plis locaux qui sont inacceptables dans un contexte industriel, et surtout pour des applications aéronautiques.

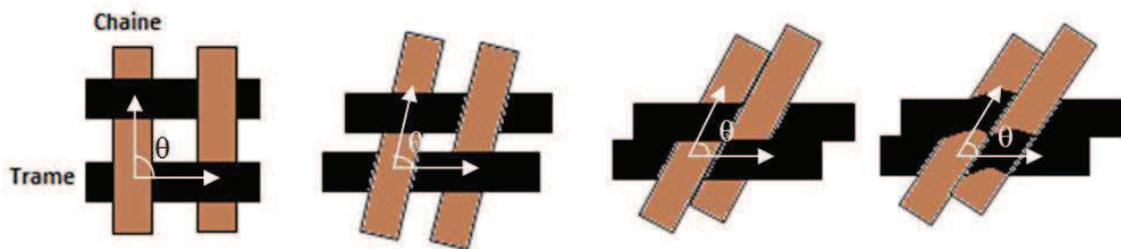


Figure 3-6: Mécanisme de déformation en cisaillement au niveau local, (Najjar 2012)
 a) $\gamma=90^\circ-\theta=0$, b) $\gamma=90^\circ-\theta>0$, c) $\gamma=90^\circ-\theta=\gamma_{\text{blocage}}$, d) $\gamma=90^\circ-\theta>\gamma_{\text{blocage}}$

3.3.2 Tension

Le comportement en tension dans la direction des renforts a longtemps été le seul considéré lors des modélisations du comportement en raison de sa prépondérance relativement aux autres rigidités (Boisse et al. 2001; Gasser et al. 2000). La forte rigidité longitudinale des fibres est une caractéristique primordiale des matériaux fibreux renforts des composites. Cependant, dans le cas d'un tissu non imprégné, le début de chargement dans les directions principales est associé à une dégradation de la réponse mécanique. Ce phénomène spécifique du caractère tissé de la structure et de l'aspect multi-échelles est associé à l'embuvage. Il est induit par l'entrelacement entre les mèches et il se caractérise par une diminution de l'amplitude des ondulations. Il est présent jusqu'au compactage maximal des entrecroisements, figure (3-7). Cette caractéristique définit également l'aspect biaxial du comportement à l'échelle du renfort (Buet-Gautier & Boisse 2001; Hivet & Boisse 2008; Launay et al. 2008). Une fois les mèches compactées, la réponse mécanique du tissu

ne dépend que du comportement propre des mèches. Nous passons ainsi d'un mode de comportement structurel à une réponse matérielle. La rigidité globale ne dépend, alors, uniquement que de celle de la mèche.

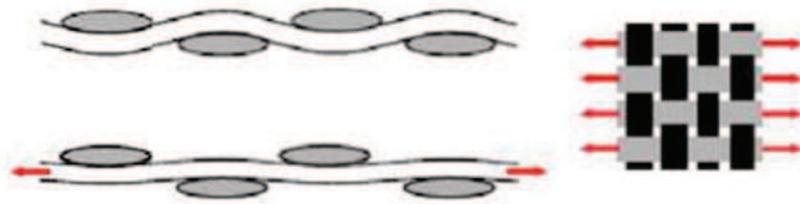


Figure 3-7: Manifestation des mèches soumises à la tension uniaxiale, (Charmetant et al. 2010)

3.3.3 Flexion

La rigidité en flexion du tissu est généralement négligée par rapport aux rigidités dans les autres directions du fait des très faibles sections des filaments constituant les mèches. Ceci est d'autant plus vérifié pour les tissus de faible épaisseur (Bel 2011; de Bilbao et al. 2010).

Relativement au procédé de formabilité, le comportement en flexion a longtemps été un critère de drapabilité (Abdin et al. 2013; Peirce 1930). Notons tout de même que pour la simulation du préformage l'influence de la prise en compte de ces rigidités de flexion a été étudiée soit pour la modélisation des défauts de type plissements (Boisse et al. 2011), soit pour l'influence sur le comportement lors de cet essai (Yu et al. 2005).

3.3.4 Compaction

La compaction transverse des renforts textiles tissés offre un grand intérêt en modifiant la perméabilité des parois des préformes au cours de l'étape d'imprégnation du renfort par la résine qui constituera la matrice du composite. La variation d'épaisseur d'un renfort (ou d'un empilement de renforts) résultant d'une compression transverse modifie fortement la porosité et influe de manière importante sur la perméabilité et, par conséquent, lors du procédé RTM, sur l'étape d'injection (Michaud & Mortensen 2001). L'influence de la prise en compte de la compaction des renforts secs lors de l'étape de préformage est un sujet bien moins présent dans la littérature (Nguyen 2011).

3.3.5 Analyse des modes de la déformation dans les renforts textile (tissé vs tricoté)

Les modes des déformations rencontrées au cours de la mise en forme d'une structure textile peuvent être divisés hiérarchiquement en deux échelles comme introduit dans la figure (3-3), (Duhovic & Bhattacharyya 2006; Duhovic 2004).

Les modes de déformation à l'échelle du renfort, figure (3-8), regroupent la compaction (a), la tension dans le plan (b), le cisaillement dans le plan (c) et la flexion hors plan (d).

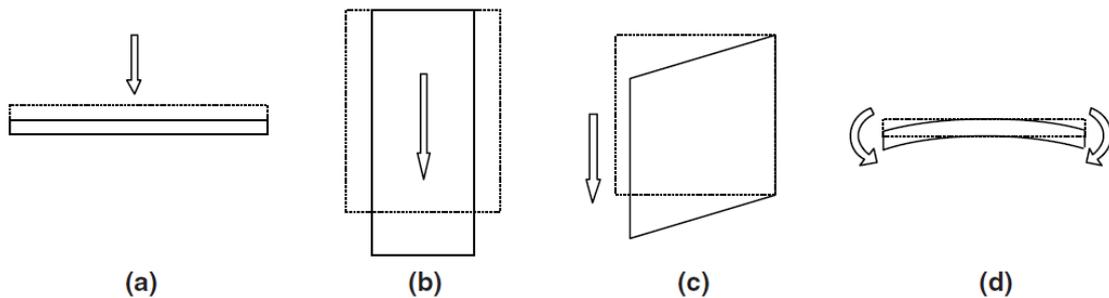


Figure 3-8: Les modes des déformation à l'échelle macro dans la structure textile, (Duhovic & Bhattacharyya 2006)

Les modes à l'échelle macroscopique, figure (3-10), qui sont les mécanismes réels des déformations dans les structures textiles, regroupent :

- Le glissement entre les fils (a),
- Le cisaillement entre les fils (b) qui est un mode commun aux structures tissées et tricotées,
- La flexion du fil (c),
- Et également le flambement (d).

Parmi ces 4 modes, le glissement, la flexion et à un degré moindre le flambement sont spécifiques aux structures tricotées du fait de la géométrie des boucles entre les colonnes et les rangées, figure (3-9).

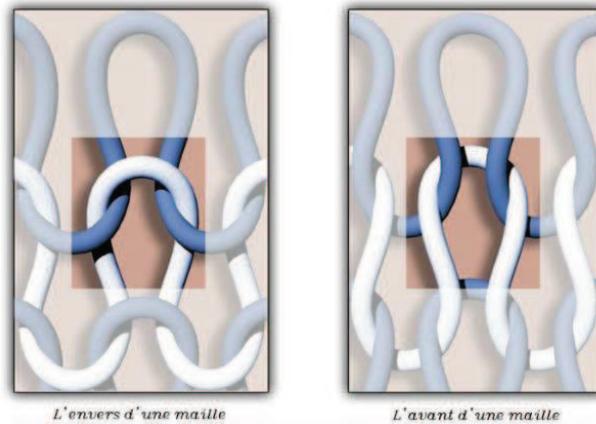


Figure 3-9: Les zones de croisement entre les fils dans la structure tricotée, (Innovation Centre, 2009)

Le flambement du fil (d) est un mode défavorable du aux défauts générés au cours de ce mode, difficile à observer dans les structures complexes (tricotées et tressées). Le flambement hors plan a lieu lorsque les modes dans le plan ne peuvent plus accumuler la déformation requise. Le flambement dans plan peut aussi se produire, mais de manière moins probable, du fait des contraintes géométriques. Notons à cette échelle, que lors de la mise en forme ces sollicitations peuvent être couplées.

A l'échelle du fil composant la maille les sollicitations, dont le frottement entre les fils, peuvent générer au sein du fil du cisaillement transverse (e), des modes d'extensions longitudinaux (f), de la compression du fil (g) qui va modifier la section transverse, mais également de la torsion du fil (h) qui, dans la structure tricotée, est soumis à un tour complet pendant le procédé du tricotage afin de former la boucle. Ce mode résiste à l'augmentation de la courbure du fil lors de la déformation.

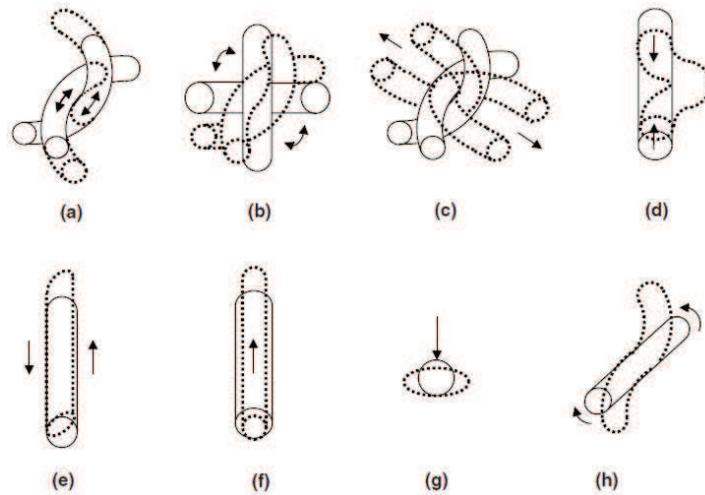


Figure 3-10: Les modes des déformations à l'échelle micro dans la structure textile, (Duhovic & Bhattacharyya 2006)

L'importance relative de chaque mécanisme de ces déformations est une caractéristique spécifique de la structure textile, et dans certains cas, certains modes de déformation peuvent être négligés. Au cours de la déformation d'une structure textile, des combinaisons de ces mécanismes se produisent simultanément, et l'influence de chaque mode change continuellement pendant l'évolution de la déformation. La figure (3-11) illustre dans le cas général les courbes (force – déplacement) pour deux structures, l'une tissée et l'autre tricotée et permet une comparaison, en fonction des régions, des différents modes de déformations.

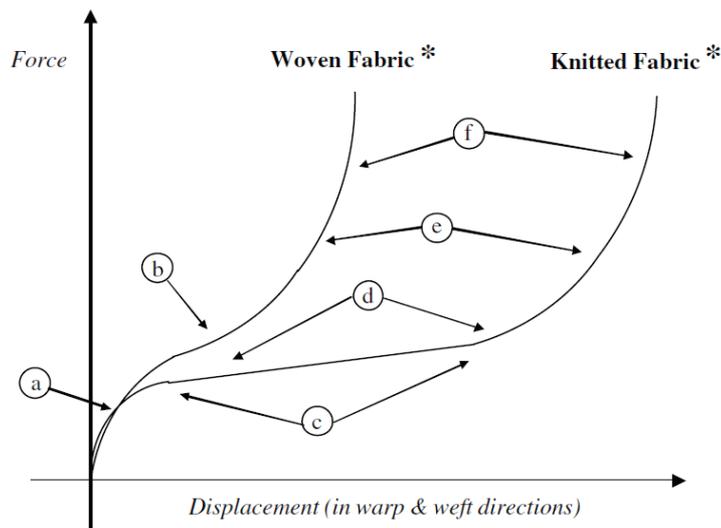


Figure 3-11: Les courbes (déplacement de force) des structures tissée et tricotée. * Notez que les ordres de grandeurs dans certaines régions et l'échelle des deux courbes ont été modifiés pour le but d'explication. (Duhovic & Bhattacharyya 2006)

De manière générale le comportement des structures tricotées, du fait de leur structure spécifique, et notamment de la réserve de fil, montre des déformations quantitativement plus importantes relativement aux structures tissées.

Le frottement entre fils (et fibres) (a) est le plus influent dans la phase initiale pour les deux courbes, où le début des courbes représente le frottement statique qui doit être surmonté pour initier le glissement des fibres longues les unes par rapport aux autres.

Pour les deux structures, les grandes régions suivantes (b) et (c) sont générées par le fléchissement/ le redressement et la résistance à la torsion. Le frottement est encore présent à partir d'ici, mais sa présence est sous la forme d'une force de friction dynamique inférieure. En raison de sa structure, une structure tricotée a plus de fils ondulés à étendre tandis qu'une structure tissée, quel que soit son degré d'ondulation, en a beaucoup moins. Pour les structures tricotées, le glissement entre-fils, (d), contribue également à la forme de la courbe dans cette région centrale à partir de l'extension autour de 10% et se terminant une fois que les forces aux points de croisement de fils deviennent trop grandes. Enfin la compression et l'extension du fil, (e) et (f), sans doute présentes tout au long de l'extension, deviennent plus dominantes dans les dernières parties de la courbe et, ensemble, peuvent représenter jusqu'à 5% de l'extension totale d'une structure tricotée.

Il est important de noter que, bien que les différentes régions des courbes (force-déplacement) illustrées dans la figure (3-11) aient été établies avec des ordres de grandeurs similaires dans un but d'explication, ce n'est généralement pas le cas dans la pratique. Par exemple, les courbes (force-déplacement) réelles d'une structure tissée peuvent sembler assez raides et linéaires ce qui indique que les régions (e) et (f) sont les plus dominantes. De plus, pour la plupart des structures tissées, la région (a) sera nettement moins étendue que celle du reste de la courbe.

3.4 Démarches expérimentales

3.4.1 Introduction

Dans la littérature, de nombreuses équipes ont développé leurs propres démonstrateurs de préformage, les objectifs étant :

- D'étudier la déformabilité des renforts ;
- De mettre en évidence les défauts ;
- De corrélérer avec des modèles de simulation par éléments finis de cette étape.

Les formes concernées par ces études sont majoritairement hémisphériques (Lin et al. 2007; Mohammed et al. 2000). D'autres formes géométriques ont également été étudiées, parmi lesquelles, on peut citer le tétraèdre (Allaoui et al. 2011) et le double dôme (Khan et al. 2010).

La complexité de ce type d'essai réside dans l'analyse des résultats. Une fois la mise en forme effectuée, il devient difficile de contrôler les formes obtenues dans le cas d'un préformage à froid. En effet la préforme de renfort étant sèche, si elle est retirée des outils (poinçon, matrice) elle reprend sa forme initiale. Les mesures doivent en effet s'effectuer in situ, ce qui ne s'avère pas évident compte tenu des bancs d'essais. Pour remédier à cette difficulté et renforcer la tenue des formes déformées, des études ont été menées en utilisant soit des pré imprégnés (carbone /époxy) conjointement à un chauffage (Manthey & Lee 1995) soit des renforts poudrés d'époxy puis figés à l'issue de la mise en forme par un chauffage (Duong 2008).

Les méthodes de mesure des déformations sans contact sont par conséquent communément utilisées pour acquérir les quantités caractérisant la déformabilité des préformes lors de cette phase de préformage (Najjar et al. 2013; Ouagne et al. 2013; Ouagne et al. 2012; Allaoui et al. 2011; Boisse et al. 2011; Duong 2008; Khan et al. 2010; Lomov et al. 2008; Zhu et al. 2011). Ces quantités se divisent en paramètres macroscopiques, à l'échelle de la préforme, tel que l'avalement

ou en quantités locales telles que la mesure des déformations dans les mèches ainsi que l'angle de cisaillement. Dans quasiment toutes les études, ces méthodes de mesure des déformations nécessitent un marquage réalisé par un réseau de traits sur le renfort avant préformage. Cette méthode appliquée aux renforts nécessite de tracer les lignes du réseau de traits le long des mèches du renfort. Or les mèches ne restent pas forcément droites lors de la mise en forme. Par ailleurs, le glissement entre celles-ci ou le frottement entre le renfort et les outils peuvent endommager cette grille de référence.

Pour l'estimation du cisaillement, cette technique de marquage peut être associée à une technique d'imagerie combinée à un logiciel de traitement qui permet d'extraire les coordonnées des points de la grille et de déduire le cisaillement en un point à partir des 4 points l'entourant (Lomov et al. 2008). D'autres équipes ont réalisé cette estimation par mesure directe des traits du réseau déformé (Skordos et al. 2007).

3.4.2 Banc d'emboutissage développé

Le banc de préformage développé au GEMTEX (Najjar et al. 2012; Najjar 2012; Najjar et al. 2013) est présenté sur la figure (3-12). Il est constitué de :

- Un vérin pneumatique d'emboutissage, sur lequel des poinçons de formes différentes peuvent s'adapter.
- Quatre vérins portant un cadre métallique de forme carrée permettant l'équirépartition de la pression et dotés d'une interface d'acquisition, permettant de suivre l'évolution de la force d'emboutissage. Il convient de noter, par ailleurs, que l'effort de serre flan sur cette machine est réglable.

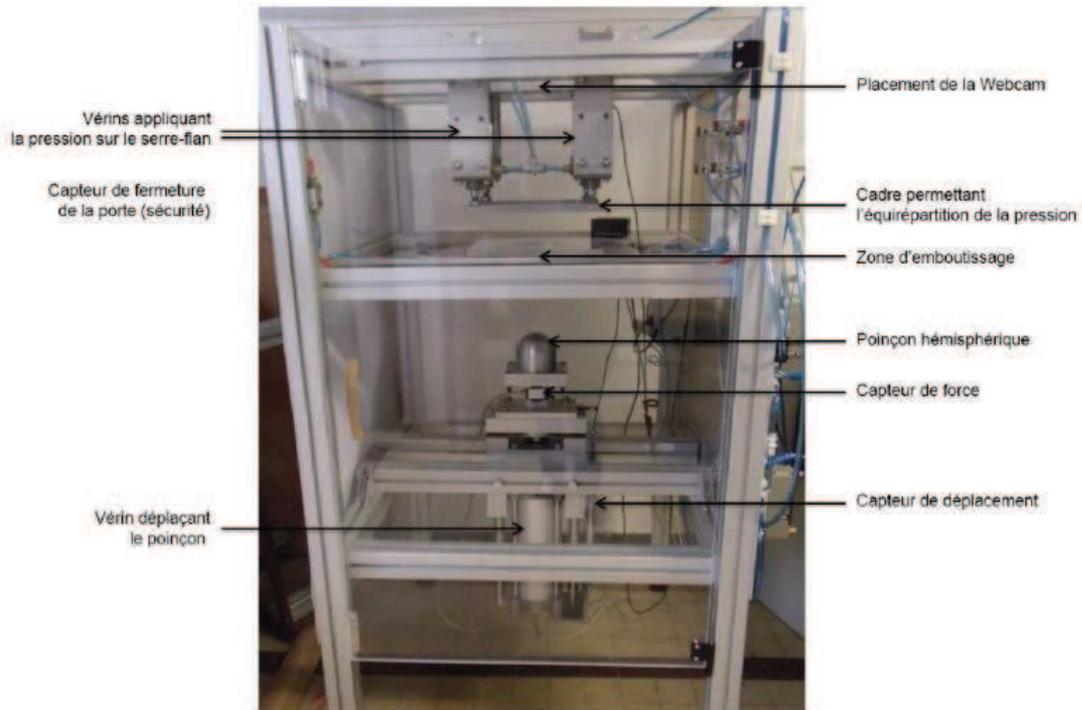


Figure 3-12: Machine d'emboutissage réalisée, (Najjar, 2012)

La grande particularité de cette machine est que le serre flan et la matrice ouverte sont transparents (deux plaques en plexiglas). Cela permet d'observer le renfort embouti in situ (sur la machine). Cette solution est exclusivement adaptée aux essais à froid. Il n'est pas possible d'utiliser un chauffage pour rigidifier le renfort déformé compte tenu du matériau plexiglas des serres flans et de la matrice. Par contre la transparence de ces derniers permet de capturer la déformée par prise d'images, ou de mesurer directement les angles sur la préforme, figure (3-13). Dans l'étude expérimentale décrite dans ce chapitre, nous nous sommes limités à un poinçon de forme hémisphérique.

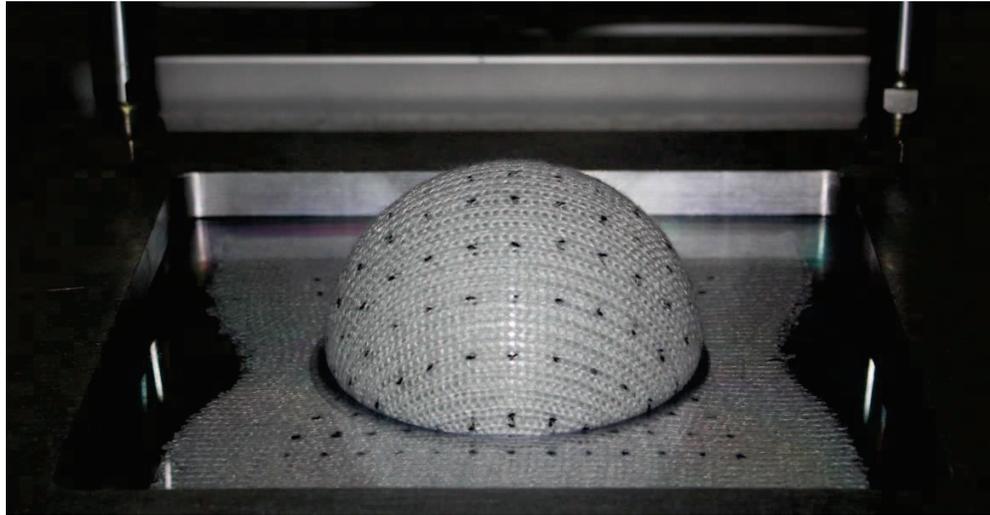


Figure 3-13: Préformage hémisphérique d'une structure tricotée

3.4.3 Préparations des éprouvettes

Afin de caractériser la mise en forme de la structure tricotée dans notre étude expérimentale, deux groupes d'éprouvettes ont été préparés :

Les flans sont de forme carrée (18×18) cm^2 , dans la direction (0°) ou (45°) où l'orientation représente l'angle entre la direction des colonnes et le côté de l'éprouvette. La figure (3-14), illustre ces deux positionnements.

Chaque groupe est composé de 5 éprouvettes réputées identiques de façon à pouvoir analyser la dispersion des résultats. Un quadrillage est imprimé sur l'éprouvette, composé de 169 points, afin de pouvoir apprécier l'évolution des déformations locales lors de la mise en forme de cette structure tricotée. La distance entre deux points successifs du quadrillage est égale à **1 cm**.

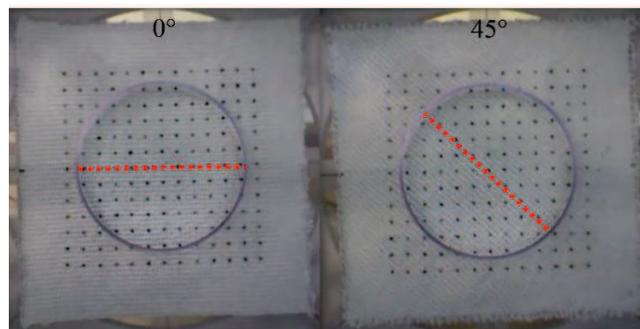


Figure 3-14: Les renforts utilisés dans l'essai d'emboutissage

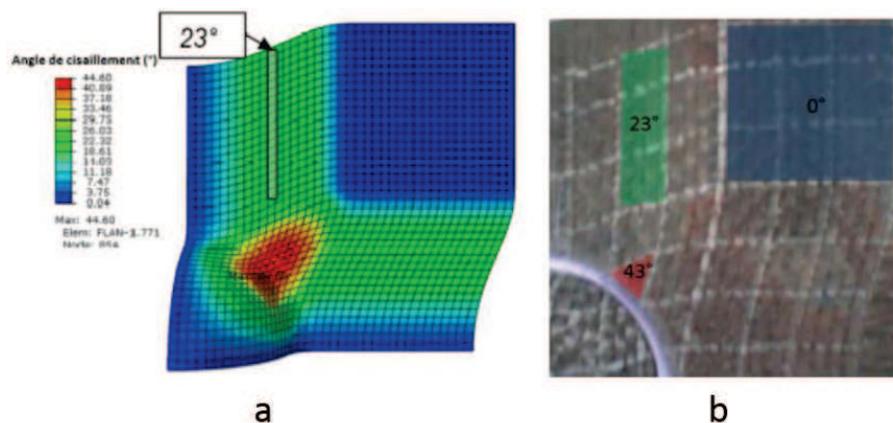
3.4.4 Méthode de mesure optique simplifiée

3.4.4.1 Introduction

De manière similaire aux travaux menés sur les renforts tissés, les quantités recherchées lors et à l'issue de cette étape de mise en forme, se divisent en des quantités, dites globales à l'échelle de la préforme et des quantités dites locales.

Dans la première catégorie nous nous intéressons à la forme finale de la préforme, ou à la différence avec les dimensions initiales du flan, soit l'avalement, mais également aux efforts d'emboutissage. Ces deux quantités ne nécessitent pas de méthodes de mesure spécifiques. L'avalement peut être quantifié par une simple mesure réalisée à l'aide des prises d'images (avant – après) ; concernant les efforts d'emboutissage ceux-ci sont directement prélevés sur la machine d'essai en fonction du temps, ou du déplacement du poinçon.

Les quantités locales mesurées sur la préforme textile sont généralement associées aux modes de déformation prépondérants, qui pour les renforts tissés, relèvent principalement de la déformation de cisaillement. Des mesures d'angles sont réalisées, de manière expérimentale et/ou numérique comme on peut le voir sur la figure (3-15), dans le cas d'un emboutissage hémisphérique d'un renfort de carbone (orienté 0-90°) (Najjar, 2012), effectué sur le même banc d'essai que celui utilisé dans ce travail.



Ces mesures d'angles sont réalisées en différentes zones de la préforme, afin d'avoir une cartographie de l'état de cisaillement entre les mèches de direction trame et chaîne. La mesure de l'angle de cisaillement, en tant que scalaire, est plus complexe pour les structures tricotées : en effet, comme décrit dans le chapitre 1, la structure particulière des mailles tricotées et la présence des boucles ne permettent pas de définir un angle initial entre les colonnes et les rangées, sans hypothèses fortes. Par ailleurs comme observé sur la figure (3-15), dans le cas d'emboutissage hémisphérique les zones où les angles de cisaillement sont les plus importants sont dans la jonction entre la forme hémisphérique de la préforme et les zones sous serre-flans ; la mesure dans ces zones courbes de l'angle n'est pas accessible, sans figer et démouler le renfort après emboutissage, ce qui n'a pas été réalisé dans le cadre de ces campagnes d'essais. Pour ces deux raisons dans le cadre de ces essais nous ne nous intéressons pas à cette cartographie de cisaillement.

Les mesures de déformations locales le long des mèches lors du préformage ne sont que très peu effectuées (Ouagne et al., 2013, 2012) dans le cadre des renforts tissés. Dans la continuité du chapitre 2 et des mesures effectuées lors des essais de caractérisations, nous utilisons ces mesures locales de déformation sur le haut de la sphère pour analyser le comportement mécanique des structures tricotées, et ce à l'aide de la méthode optique décrite ci-dessous.

3.4.4.2 Principe de la technique

Afin de caractériser la mise en forme de la structure tricotée, nous avons utilisé le même principe que celui utilisé pour la caractérisation du comportement membranaire des structures tricotées dans le paragraphe (2.5.2.2). Le procédé d'emboutissage est filmé par un caméscope placé au-dessus de la machine d'emboutissage et positionné de sorte que l'axe de l'optique coïncide avec l'axe ascendant du poinçon. Des images sont extraites de la vidéo (25 images par seconde). De cette manière, l'évolution des déformations, calculées localement dans la zone utile de la préforme (symbolisée par un carré bleu de la figure (3-16)) est déterminée au cours du procédé d'emboutissage en fonction de déplacement du poinçon (noté dans la direction Z). Les coordonnées des points dans le carré bleu sont déterminées au cours du procédé dans le plan (O, x, y) , à l'aide des images, soit à chaque instant du procédé, puis des corrections prenant en compte la forme hémisphérique du poinçon sont effectuées.

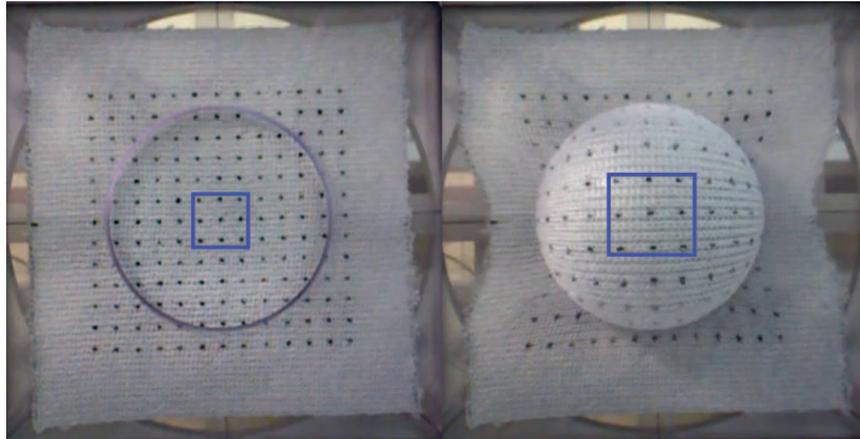


Figure 3-16: Le renfort avant et après l'emboutissage

Les images obtenues au cours de l'emboutissage donnent des coordonnées dans le plan (O, x, y) , mais dans la réalité le renfort commence à prendre sa forme hémisphérique progressivement. La figure (3-17) illustre la mise en forme du renfort tricoté au cours du procédé d'emboutissage. Les grandeurs (X) [mm] représentent la pénétration du poinçon dans le renfort au moment (t) , (r_t) [mm] représente le rayon de la partie sphérique du renfort projetée sur la plan (O, x, y) au moment (t) , (S_t) [mm²] représente l'aire de la partie sphérique du renfort projetée sur la plan (O, x, y) au moment (t) , (R) [mm] représente le rayon de la partie sphérique du poinçon, (I) [mm] représente la hauteur de la partie cylindrique du poinçon. Les grandeurs (R) , (I) et (X) sont connues, alors que les grandeurs (r_t) et (S_t) peuvent être calculées par les formules suivantes :

$$r_t = \sqrt{R^2 + (R - X)^2} \quad (3 - 1)$$

$$S_t = \pi r_t^2 \quad (3 - 2)$$

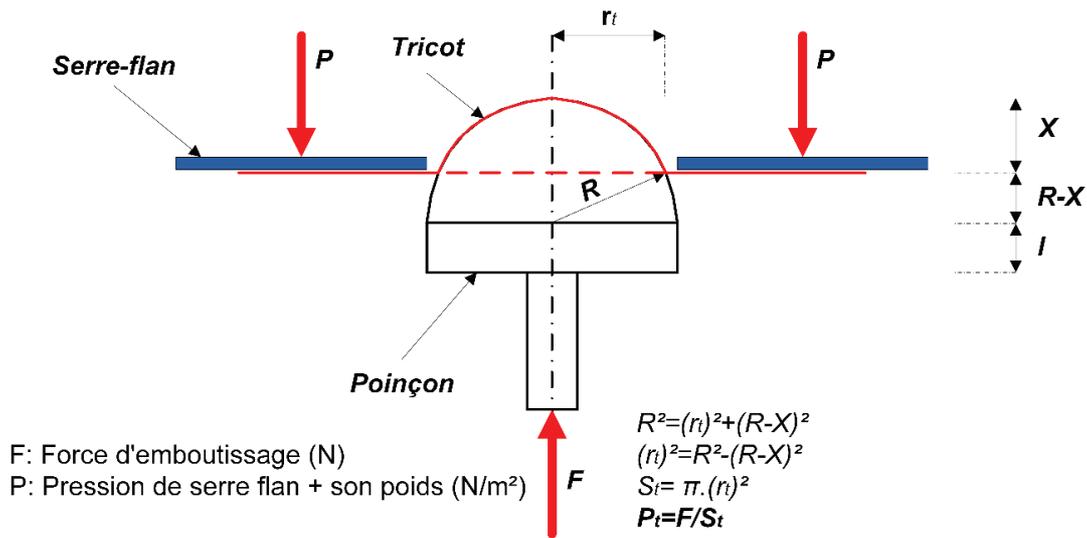


Figure 3-17: La mise en forme du renfort au cours du procédé d'emboutissage

La figure (3-18) illustre les coordonnées sphériques où un point $P(r, \varphi, \theta)$ de l'espace y est repéré par la distance (r) à un pôle et deux angles. (r) est la distance du point P au centre O et donc $r > 0$. (φ) est l'angle non orienté formé par les vecteurs z et OP (colatitude). (θ) est l'angle orienté formé par les demi-plans ayant pour frontière l'axe vertical et contenant respectivement la demi-droite $[O, x)$ et le point P . Si H est le projeté orthogonal de P dans le plan horizontal (O, x, y) , alors θ peut être défini comme l'angle formé par les vecteurs x et OH (longitude), (Weisstein 2013). Donc, pour faire les corrections des coordonnées extraites des images (O, x, y) , on propose que l'axe (Z) représente l'axe du poinçon utilisé au cours du procédé d'emboutissage. Les grandeurs connues sont X, Y et r (rayon d'hémisphère), les grandeurs inconnues sont φ, θ et Z . Il est à noter que l'unité de mesure est le pixel pour toutes les grandeurs. En utilisant les lois de transformation entre les coordonnées cartésiennes et sphériques, tableau (3-1), on peut calculer les grandeurs inconnues. De cette manière, on obtient les coordonnées des points du quadrillage dans le carré bleu au cours du procédé d'emboutissage sur la surface du poinçon, figure (3-16).

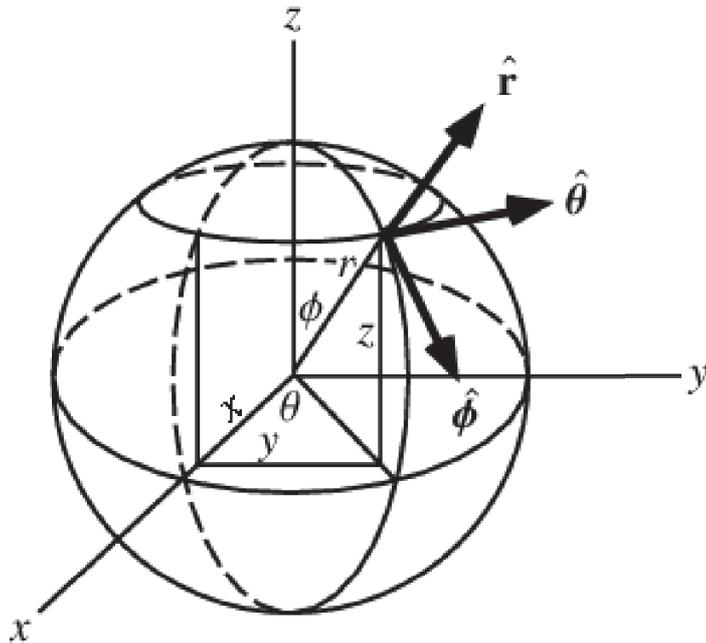


Figure 3-18: Coordonnées sphériques, (Weisstein 2013)

Tableau 3-1: Les coordonnées cartésiennes (x, y, z) et sphériques (r, θ, ϕ) lorsqu'elles sont définies par rapport au même repère cartésien (O, x, y, z) suivent les lois de transformations, (Weisstein 2013)

Système de coordonnées	Depuis les coordonnées sphériques	Vers les coordonnées sphériques
Coordonnées cartésiennes	$x = r \sin \phi \cos \theta$ $y = r \sin \phi \sin \theta$ $z = r \cos \phi$	$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ $\phi = \cos^{-1} \left(\frac{z}{r} \right)$ $\theta = \left\{ \begin{array}{l} \cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad \text{si } y \geq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad \text{si } y \leq 0 \end{array} \right\}$

Afin de calculer l'évolution de la déformation entre deux points **(a)** et **(b)** du quadrillage, il faut prendre en compte que les deux points dans l'état initial sont dans un plan, mais au cours du procédé de l'emboutissage l'évolution de la déformation entre les deux points s'effectue sur une surface sphérique, figure (3-19). Donc, il faut calculer la variation de longueur de l'arc ($S=ab$) au cours de

la mise en forme de la structure tricotée dans le plan formé par les points (O, a, b) . La longueur de l'arc S est calculée par la formule suivante :

$$S = r * \alpha \quad (3 - 3)$$

Où l'angle α , qui représente l'angle en radian du secteur circulaire ab , peut être calculé par la formule suivante :

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \frac{c}{2r} \quad (3 - 4)$$

Où c représente la longueur de la corde, qui peut être calculée par la formule suivante :

$$c = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \quad (3 - 5)$$

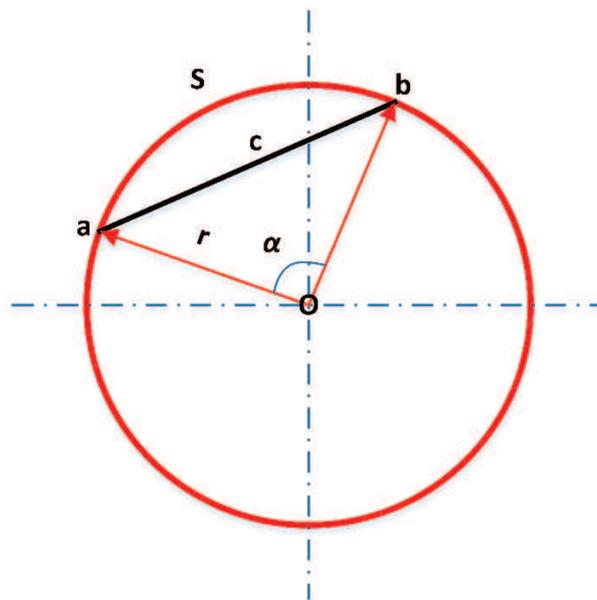


Figure 3-19: Evolution de la déformation entre deux points sur une surface sphérique

De cette manière les corrections sont effectuées sur les coordonnées extraites des images, et l'évolution de la déformation linéique est calculée entre deux points a et b par la formule suivante :

$$\varepsilon = \ln \frac{ab_{final}}{ab_{initial}} \quad (3 - 6)$$

Les mesures sont effectuées sur les bords du carré de marqueurs (figure 3-16), soit le long des directions initiales des colonnes et rangées, lors d'un embouti à 0-90° mais également pour un embouti à 45°.

3.4.4.3 Equipements et analyse

Dans cette méthode, un caméscope est installé de manière que son axe optique et l'axe du poinçon coïncident. Le renfort de forme carrée est positionné sur la matrice de manière à ce que son centre se croise avec l'axe optique du caméscope. Un serre flan est placé sur l'éprouvette afin d'assurer une répartition régulière de pression sur le renfort lors de la mise en forme de la structure tricotée. Le caméscope filme le procédé d'emboutissage, figure (3-20). Les images extraites du film aux différents déplacements illustrent l'évolution de la déformation locale du renfort tricoté dans la zone concernée, figure (3-16). La force d'emboutissage est quant à elle mesurée globalement.

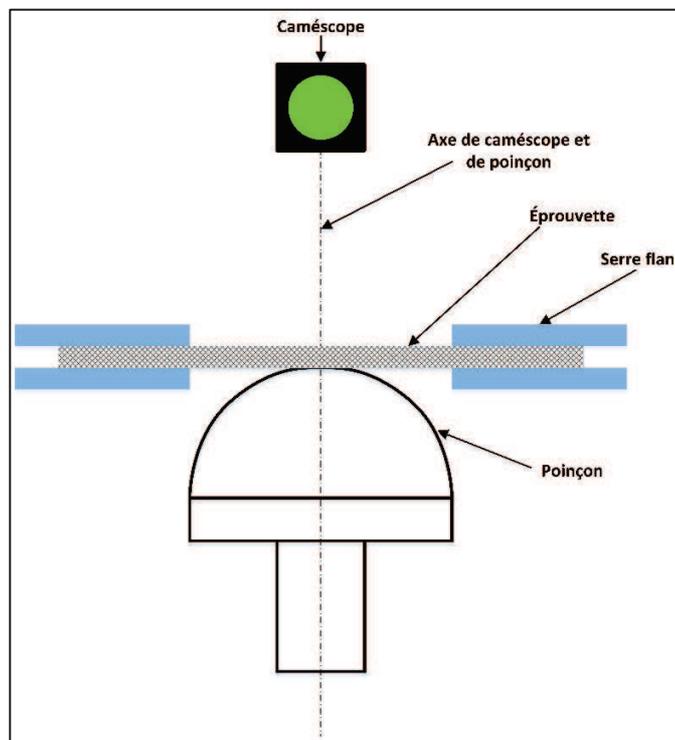


Figure 3-20: Schéma du dispositif d'essai d'emboutissage

3.5 Résultats et interprétations

Deux campagnes d'essais sont réalisées sur cinq éprouvettes de la structure tricotée à maille cueillie de type (côte 1 et 1) dans les directions (0°) et (45°), afin de caractériser sa mise en forme sur un poinçon hémisphérique (de diamètre $D=100$ mm) par un procédé d'emboutissage, où la pression serre flan appliquée est égale à $0,2$ MPa, et la course du poinçon de (59 mm \pm 1 mm).

Des courbes (force d'emboutissage – déplacement) et (force d'emboutissage – déformation locale) sont tracées pour analyser l'écart entre les valeurs globales et locales. L'incertitude de mesure est exprimée par l'erreur type de la moyenne qui représente le rapport de l'écart type (σ) et la racine carré du nombre des éprouvettes ($n=5$).

3.5.1 Analyse de l'avalement

3.5.1.1 Résultats d'avalement

La figure (3-21) illustre l'avalement des préformes aux deux orientations différentes.

Pour l'orientation à (0°), on constate que l'avalement est différent dans la direction des rangées et des colonnes. L'avalement est maximal dans la direction des colonnes et quasiment nul dans la direction des rangées. La forme finale de la préforme n'est, par conséquent, pas symétrique. L'avalement global, mesuré à l'aide des photos et du logiciel ImageJ, figure (3-24), est égal à ($1269 \pm 22 \text{ mm}^2$), ce qui représente 3,9% de l'aire totale de l'éprouvette. Plus précisément, sur l'axe de symétrie dans la direction des colonnes l'avalement maximal est de ($13,8 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm}$).

En comparaison est représenté figure (3-22,a), l'avalement obtenu avec un renfort tissé (de carbone), orienté à $0-90^\circ$, sur le même banc d'essai avec un poinçon hémisphérique de taille plus petite (Najjar, 2012). On constate, en termes de forme que pour des orientations à ($0^\circ-90^\circ$), l'avalement de la structure textile suit le même profil pour la maille tricotée, tout du moins dans la direction colonne, que pour le renfort tissé. Par contre, comme signalé précédemment cet avalement n'est pas symétrique car l'avalement dans la direction rangée est quasi nul, contrairement au renfort tissé où la préforme finale est symétrique. Cette non symétrie de l'avalement, avec pourtant un outil-poinçon de forme symétrique et des efforts (serre-flan) uniformément répartis a été constatée précédemment (figure 3-22,b) pour des renforts tissés très fortement déséquilibrés (figure 3-23,a) en terme de comportement (Dumont, 2003; Zouari et al., 2006) dans les directions chaîne et trame.

L'analogie avec le comportement mécanique de la structure tricotée, identifié par des essais de traction uni axiale et analysé dans le chapitre 2, qui est très différent, par la structure spécifique de la maille, dans le sens colonnes et rangées, peut être faite. On constate lors de la mise en forme une conséquence de cet effet de structure sur l'avalement pour une orientation à ($0^\circ-90^\circ$).

Concernant l'avalement obtenu pour une orientation à $\pm 45^\circ$, on constate que l'avalement est quasi-nul (figure 3-21, b) pour le renfort tricoté. Dans la même démarche comparative avec les

renforts tissés, même si les renforts ne sont pas identiques, l'avalement du renfort de carbone obtenu suite à un emboutissage sur poinçon hémisphérique est représenté figure (3-23, b). On constate, pour un renfort tissé, une extension des diagonales et une ovalisation des bords droits, alors qu'aucune de ces formes n'est obtenue avec le renfort tricoté.

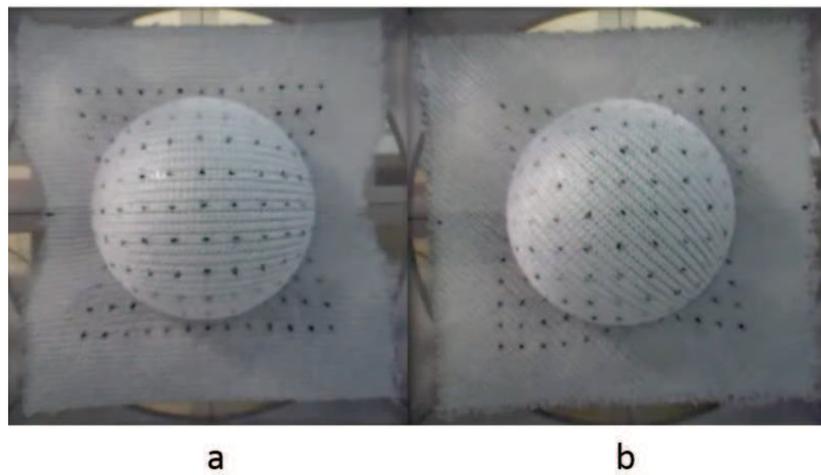


Figure 3-21: La fin du procédé d'emboutissage dans les directions (a) 0° et (b) $\pm 45^\circ$

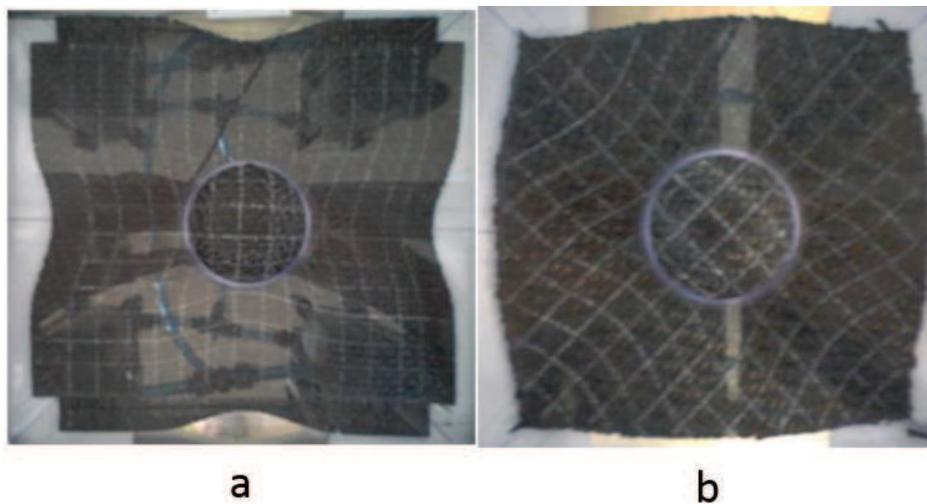


Figure 3-22: Avalement d'une préforme tissée hémisphérique (a) orientation 0° - 90° (b) $\pm 45^\circ$, (Najjar, 2012)

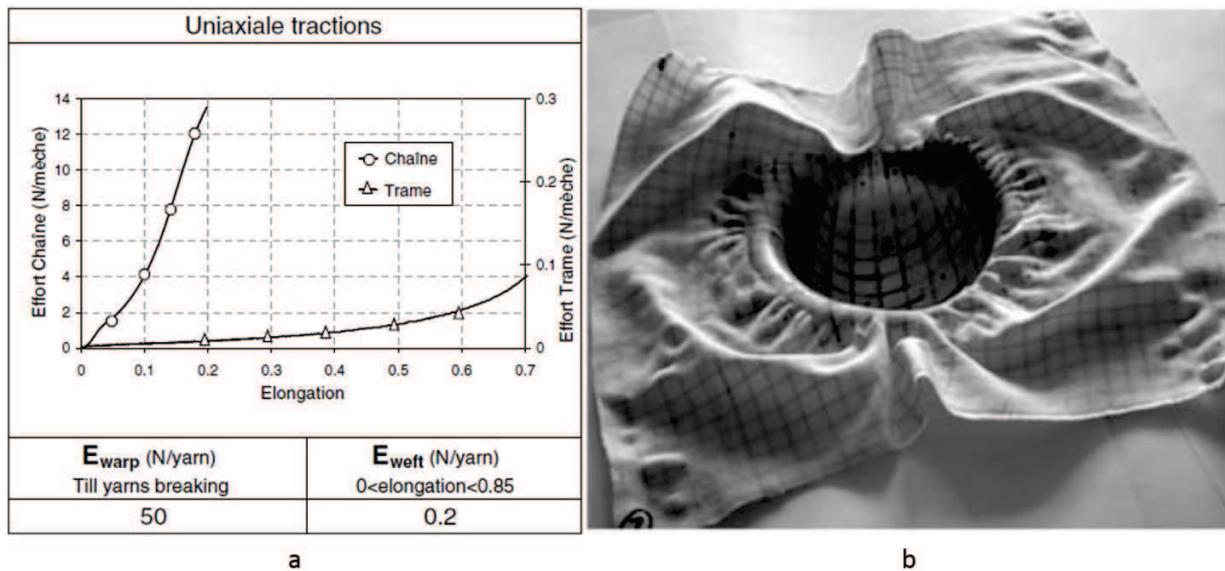


Figure 3-23: a) Comportement mécanique d'un renfort tissé très déséquilibré. b) Avalement lors de sa mise en forme sur poinçon hémisphérique, (Zouari et al., 2006)

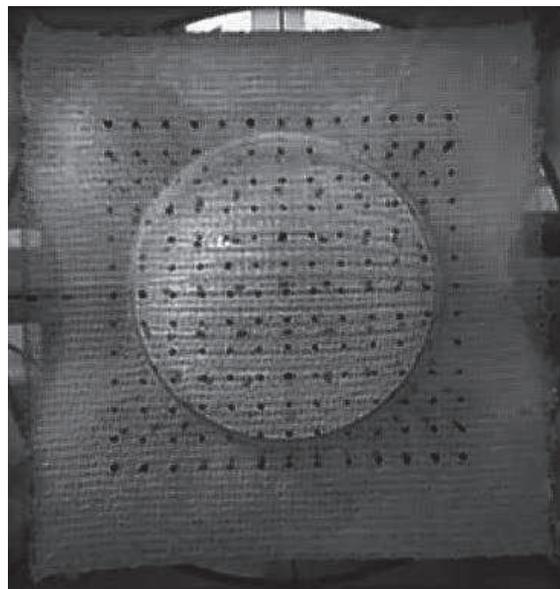


Figure 3-24: Le calcul des deux zones d'avalement par ImageJ

Une analyse de ces phénomènes d'avalement est donnée dans le paragraphe ci-dessous.

3.5.1.2 Interprétation de l'avalement

L'interprétation des phénomènes d'avalement pour ces préformes orientées respectivement à (0°) et (45°) se fait en revenant vers le comportement membranaire de la structure tricotée et l'analyse schématique de l'éprouvette vus dans le chapitre II.

La figure (3-25) illustre un schéma de l'éprouvette lors du procédé d'emboutissage dans la direction (0°) . Sur ce schéma, se positionne une bande de colonnes de longueurs identiques dans la zone d'emboutissage (entourée en rouge). Une bande de rangées est positionnée dans la direction orthogonale. Lors du procédé d'emboutissage, l'éprouvette est soumise à des tensions progressives issues d'une part du contact avec le poinçon afin de se conformer avec la géométrie hémisphérique, mais également, à l'autre extrémité de la zone utile, à la pression exercée par le serre-flan. Cette tension générée dans la structure tricotée est transférée par les voies principales de la structure tricotée, colonnes et rangées. L'analyse membranaire de la structure tricotée, en fonction de l'orientation des colonnes par rapport l'axe de la traction, montre que le point de déformation critique (**C**) pour les colonnes est inférieur à celui-ci pour les rangées, (voir le tableau (2-9)). En conséquence, un blocage est rencontré sur la bande de colonnes dans la zone d'emboutissage avant celui atteint par la bande de rangées. Un avalement se produit lorsque la force dépasse la valeur autorisée par la pression de serrage du serre-flan et les conditions de glissement au contact. Cet avalement est maximal le long de la colonne centrale, car elle correspond à la zone de déplacement maximal imposé par le poinçon. Les autres colonnes voient leurs déplacements imposés diminuer à partir de la colonne centrale. Puisque les longueurs des colonnes sont identiques dans la zone d'emboutissage, l'avalement évoqué dans l'éprouvette varie en fonction de l'avancement du poinçon. Par contre, la tension générée dans l'éprouvette au niveau de la bande de rangées au cours du procédé d'emboutissage est absorbée par la phase de déformation structurelle plus importante dans ce cas, avec en conséquence un point de déformation critique **C** plus élevé en comparaison avec la bande de colonnes, ce qui explique le non avalement sur la bande de rangées.

L'analyse schématique de la structure tricotée montre que les colonnes et les rangées sont les voies principales qui transfèrent la charge sous sollicitations uni axiale et bi axiale. Dans le cas de la mise en forme d'une éprouvette $(0^\circ-90^\circ)$, un avalement apparaît dans la direction (0°) où sa valeur maximale atteint $(13,8 \text{ mm} \pm 0,6 \text{ mm})$, alors qu'aucun avalement n'est observé dans la direction (90°) . Lors de la mise en forme, le poinçon hémisphérique consomme la réserve des fils

dans les voies principales colonnes et rangées, et comme la réserve est beaucoup moins importante dans la direction des colonnes l'avalement est plus conséquent dans cette direction.

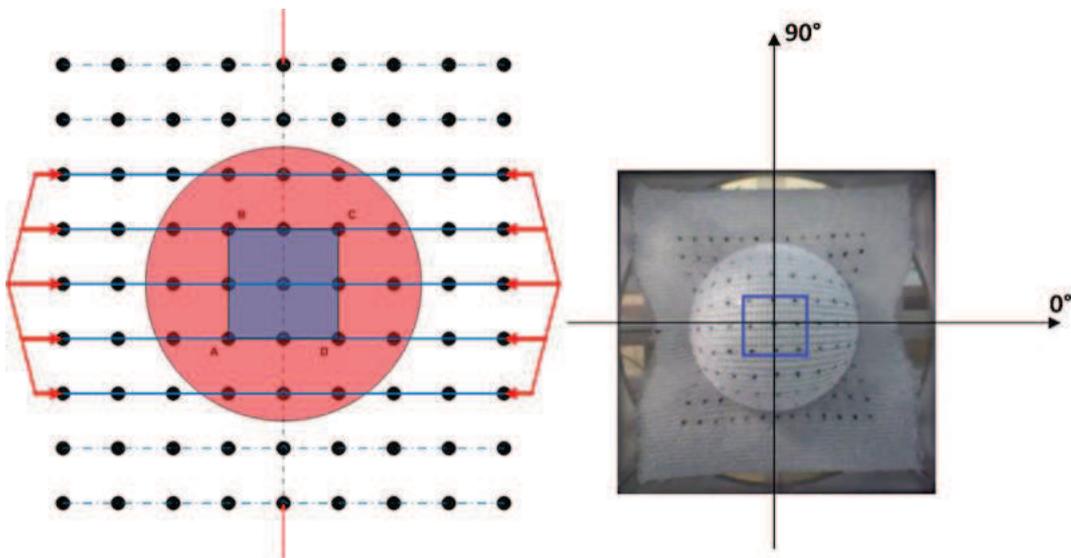


Figure 3-25: Schéma de l'éprouvette lors du procédé d'emboutissage dans la direction ($0^\circ/90^\circ$)

La figure (3-26) illustre un schéma de l'éprouvette dans la direction ($\pm 45^\circ$) lors du procédé d'emboutissage. A l'aide de la même analyse schématique, une bande de colonnes aux longueurs variables apparaît dans la zone d'emboutissage (le cercle rouge), où la colonne centrale a une longueur maximale. Selon le même principe, une autre bande de rangées aux longueurs variables apparaît dans la direction orthogonale. Au cours du procédé d'emboutissage, la tension générée dans l'éprouvette due à sa mise en forme est transférée par les voies les plus favorables de la structure tricotée (colonnes et rangées). Selon l'analyse membranaire de cette structure abordée dans le chapitre 2, l'augmentation de la longueur de colonne augmente la phase de déformation structurelle. Donc, le point de blocage C est plus élevé en comparaison avec le cas précédent ($0^\circ/90^\circ$). En conséquence, l'avalement évoqué dans le cas ($0^\circ/90^\circ$) disparaît par modification de la position de la bande de colonnes ($\pm 45^\circ$) lors de préparation des éprouvettes. De cette manière, la déformation de la structure tricotée lors de sa mise en forme peut être absorbée dans la phase structurelle avant le point du blocage, et donc sans avalement.

Dans le cas de la mise en forme d'une éprouvette ($\pm 45^\circ$), le phénomène d'avalement a disparu. Les voies principales qui transfèrent la charge lors de la mise en forme dans le cas (± 45) sont les diagonales. Les dimensions de ces voies sont augmentées par rapport aux voies dans le cas ($0^\circ-90^\circ$), donc la réserve des fils est augmentée. Cette augmentation dimensionnelle exige une force supplémentaire. En modifiant l'orientation, la taille des voies principales augmente, donc une augmentation dans les déformations dans ces voies, ce qui explique l'augmentation de force d'emboutissage dans cette orientation.

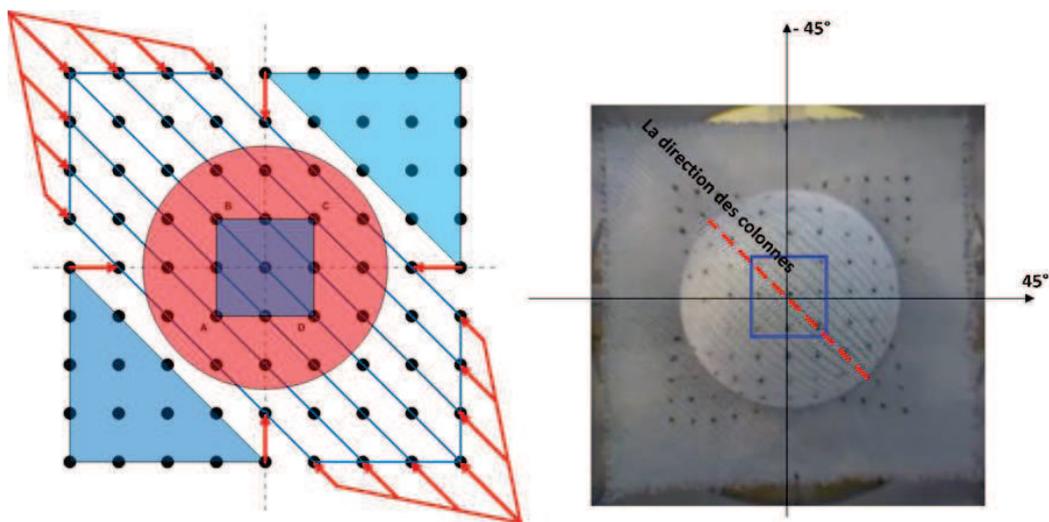


Figure 3-26: Schéma de l'éprouvette lors du procédé d'emboutissage dans la direction ($45^\circ/-45^\circ$)

3.5.2 Analyse des efforts d'emboutissage

3.5.2.1 Courbes d'emboutissage dans les directions (0°) et (45°)

Afin de mieux comprendre le comportement de la structure tricotée lors de sa mise en forme, une analyse locale dans la zone d'emboutissage est utile.

La figure (3-27) présente les courbes d'emboutissage de l'éprouvette dans les directions ($0^\circ/90^\circ$) : cette fois, on porte en abscisse les valeurs des déformations locales au quadrillage (carré bleu dans la figure 3-25), où (0°) correspond à la direction des colonnes, et (90°) correspond à la direction des rangées.

Les deux courbes (0°) et (90°) restent confondues jusqu'au point qui correspond à une déformation mesurée égale à 0,43 et à un effort d'emboutissage égal à 23 N. Au-delà de ce point les deux courbes se séparent : la déformation continue à augmenter dans la direction des rangées, alors que celle dans la direction des colonnes ne se développe plus ce qu'on peut associer à l'avalement dans la direction des bandes de colonnes.

Notons que pour cette orientation à $0\text{-}90^\circ$ l'effort nécessaire pour déformer complètement, lors de ce test d'emboutissage, la préforme tricotée est égal à 50 N.

On constate que l'allure de ces courbes correspond aux courbes de comportement identifiées dans le chapitre 2 ; une comparaison sera menée dans le paragraphe 3.6 ci-dessous. La notion de déformation critique identifiée dans le chapitre 2, peut être déduite de la même manière. Pour les orientations concernées ($0^\circ/90^\circ$) et ($-45^\circ/45^\circ$) lors de la mise en forme, cette déformation critique est égale à (0,4).

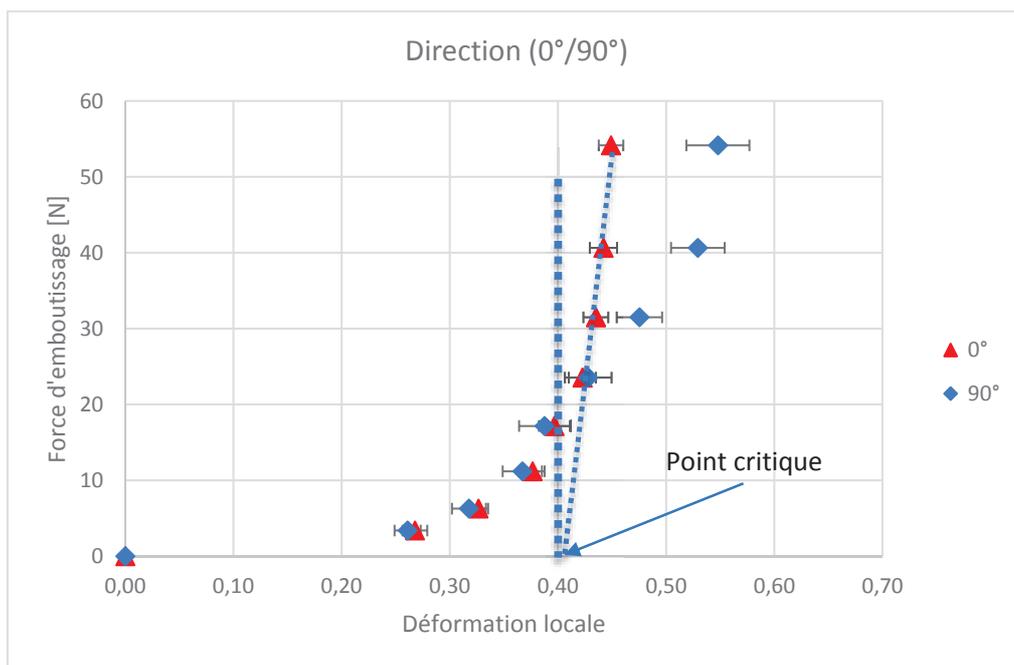


Figure 3-27: Les courbes d'emboutissage (Force – déformation locale) dans la direction ($0^\circ/90^\circ$)

La figure (3-28) présente le même type de résultats pour l'éprouvette dans la direction ($45^\circ/-45^\circ$) avec en abscisse la déformation locale calculée sur le quadrillage (carré bleu dans la figure 3-23). Les deux courbes (45°) et (-45°), qui présentent l'évolution de la déformation linéique locale

au cours du procédé de l'emboutissage, restent coïncidentes ce qu'on peut associer à la disparition de l'avalement rencontré dans le cas précédent du fait de l'augmentation de la phase de la déformation structurelle de l'éprouvette.

Notons que pour cette orientation à $\pm 45^\circ$ l'effort nécessaire pour déformer complètement, lors de ce test d'emboutissage, la préforme tricotée est égal à 70 N.

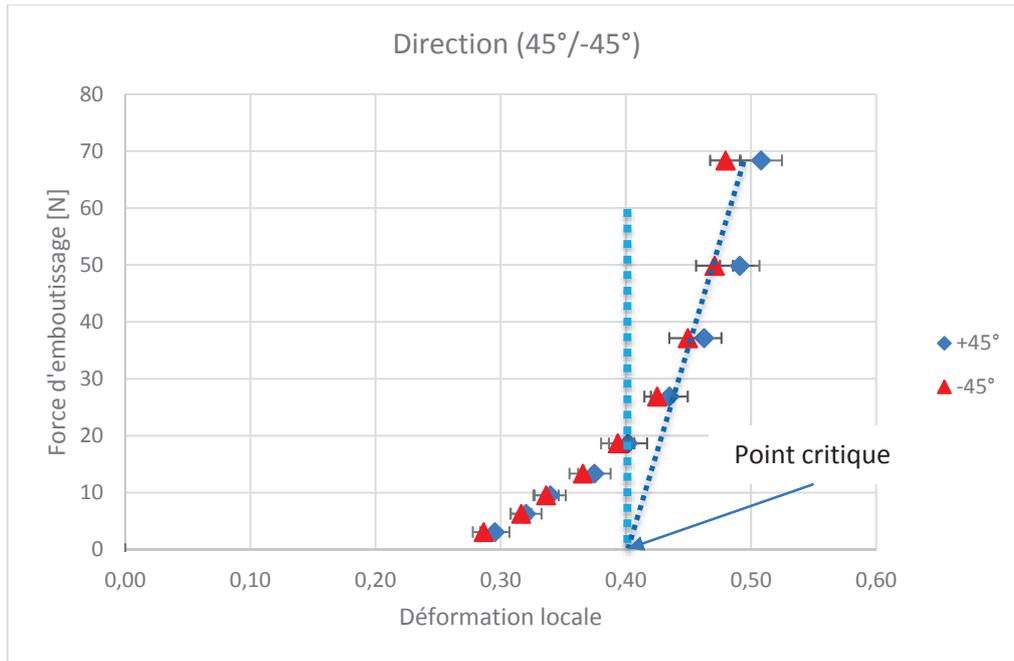


Figure 3-28: Les courbes d'emboutissage (Force – déformation locale) dans la direction (45°/-45°)

Relativement à l'analyse portée sur l'avalement et les comparaisons avec les renforts tissés, cette même démarche peut être amenée concernant les efforts d'emboutissage.

En effet selon l'orientation initiale du flan (à 0 ou à 45°) pour une structure tricotée, ces essais nous montrent que les efforts nécessaires à cette opération d'emboutissage ne sont pas quantitativement identiques (différence de 20 N). Par comparaison on reporte dans la figure (3-29), les efforts d'emboutissage relevés lors de la mise en forme du renfort tissé de carbone (Najjar, 2012), en fonction de la course du poinçon. Même si le diamètre du poinçon hémisphérique utilisé est différent (50 mm), ainsi que la course (25 mm), lors de ce test, on constate que quelle que soit l'orientation les efforts d'emboutissages sont, à l'issue du procédé, égaux. Cette différence est due

à la prise en compte de comportements mécaniques très différents entre un tissu (relativement) équilibré et un tricot dont la structure spécifique modifie le comportement.

Cette comparaison en termes d'efforts, nous montre, tout comme celle menée sur l'avalement, que la faisabilité de cette opération de mise en forme ne dépend pas que de la forme des outils utilisés, soit des paramètres liés aux procédés. Cette opération de préformage a longtemps été simulée numériquement, à l'aide de modèles qualifiés de « géométriques », s'appuyant sur des algorithmes du filet (Cherouat et al., 2005; Long and Rudd, 1994; Mack and Taylor, 1956; Van Der Ween, 1991). Ces méthodes ne prennent pas en compte le comportement du renfort à draper. Ces essais sur la maille tricotée, par la spécificité de son comportement, montre qu'il est essentiel de considérer le comportement mécanique lors de la mise en forme.

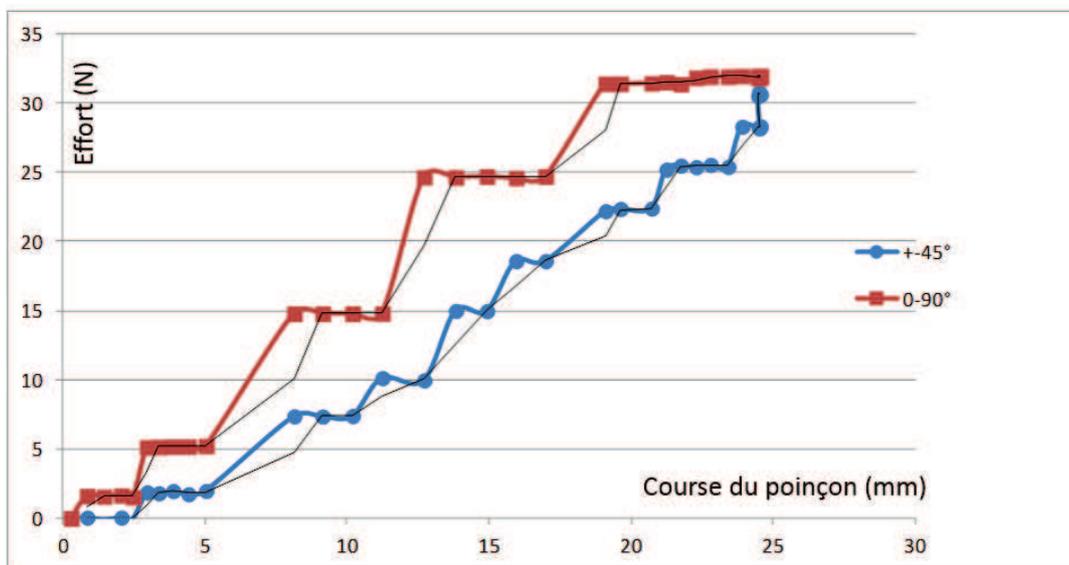


Figure 3-29: Effort d'emboutissage/course du poinçon pour un renfort tissé de carbone, (Najjar, 2012)

3.6 Le lien entre la mise en forme et le comportement membranaire

Afin de déduire le lien entre le comportement membranaire, identifié et caractérisé au chapitre 2 de ce manuscrit, et la déformabilité mise en jeu lors de cette étape de mise en forme de la structure tricotée, les courbes de traction uni axiale (force spécifique – déformation locale) et de

l'emboutissage (force d'emboutissage – déformation locale) sont superposées, respectivement dans les figures (3-30) et (3-31) pour les deux orientations considérées.

Les déformations locales calculées dans la zone du quadrillage représentent l'allongement relatif (\vec{Y}) dans le cas de traction uni axiale, alors qu'elles représentent l'allongement relatif dans les directions (0°), (90°), (45°) et (-45°) sur l'hémisphère dans le cas de la mise en forme sachant que les directions (0°) et (90°) représentent les colonnes et les rangées respectivement.

Les efforts (en N) qui figurent en ordonnée dans les figures (3-30) et (3-31) représentent dans le cas de la mise en forme les efforts d'emboutissage et dans le cas des essais membranaires de traction les efforts divisés par le nombre de mèches.

Dans la figure (3-30), un comportement bi axial est observé lors de la mise en forme de la structure tricotée dans la direction (0° - 90°) par l'effet du serre-flanc. Cette variation dans le comportement entre les deux directions (0°) et (90°) est due à la consommation complète de la réserve de fils dans la direction (0°), alors que cette réserve dans la direction (90°) reste suffisante au cours du préformage de la structure tricotée. Par conséquent, l'avalement a lieu sur la direction (0°) lors de la consommation complète de la réserve de fils, et, donc, une divergence est notifiée sur les courbes de l'emboutissage au début de l'avalement. En faisant le lien avec le comportement en traction en uni axiale, le point de la déformation critique (C), qui représente la phase transitoire entre les deux phases structurelles et milieu continu, sur la courbe dans la direction (0°) est très proche de la déformation qui correspond avec l'avalement sur les courbes de l'emboutissage. Alors que la courbe dans la direction (90°) ne montre aucune réponse mécanique jusqu'à 100 % d'allongement du fait de la réserve des fils dans cette direction, et, donc, aucun avalement n'est observé dans la direction (90°).

Dans la figure (3-31), les courbes de l'emboutissage sont identiques lors de la mise en forme de la structure tricotée dans les directions (45°) et (-45°), où la même réserve de fils est disponible dans les deux directions (45°) et (-45°). Par contre, un comportement bi axial est notifié sur les directions diagonales qui correspondent avec les directions de la colonne (0°) et de la rangée (90°), mais cette fois-ci sans avalement dû à l'augmentation de la réserve des fils sur la direction diagonale, où les colonnes sont plus longues que dans le cas précédent, ce qui permet d'augmenter la déformabilité structurelle. En faisant le lien avec le comportement en traction uni axiale dans la direction (45°), la distance entre le point d'intersection entre la tangente à la deuxième partie de la

courbe de l'emboutissage et le point de la déformation critique (C) sur la courbe de traction uni axiale dans la direction (45°) représente la capacité du renfort à se déformer sans avalement.

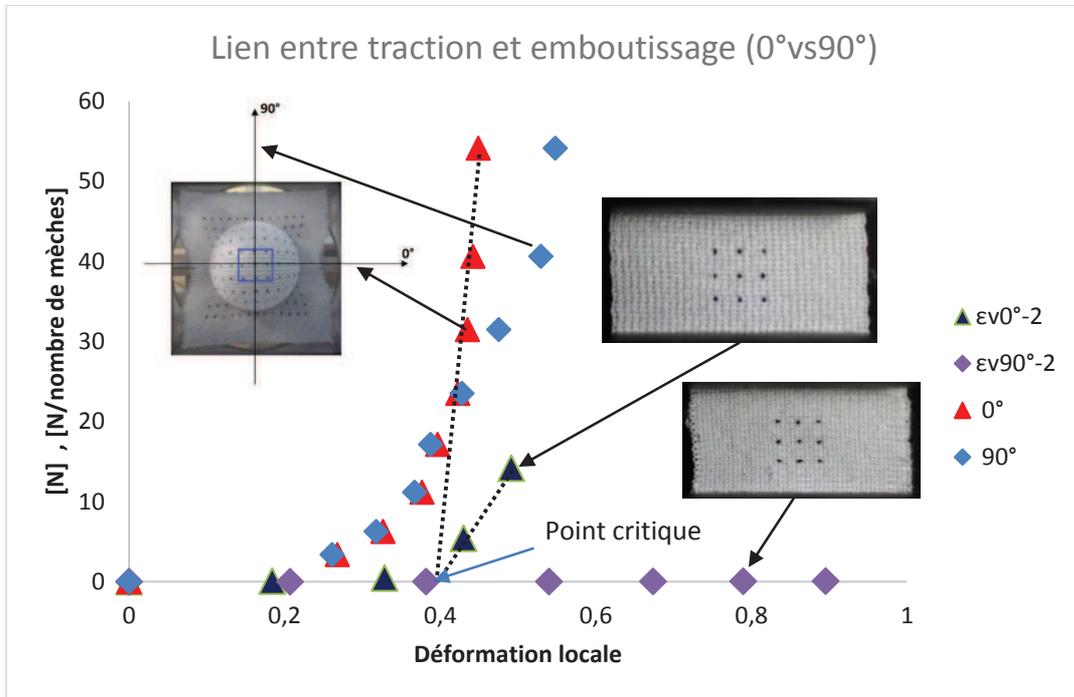


Figure 3-30: Le lien entre le comportement membranaire et la mise en forme de la structure tricotée (0° vs 90°)

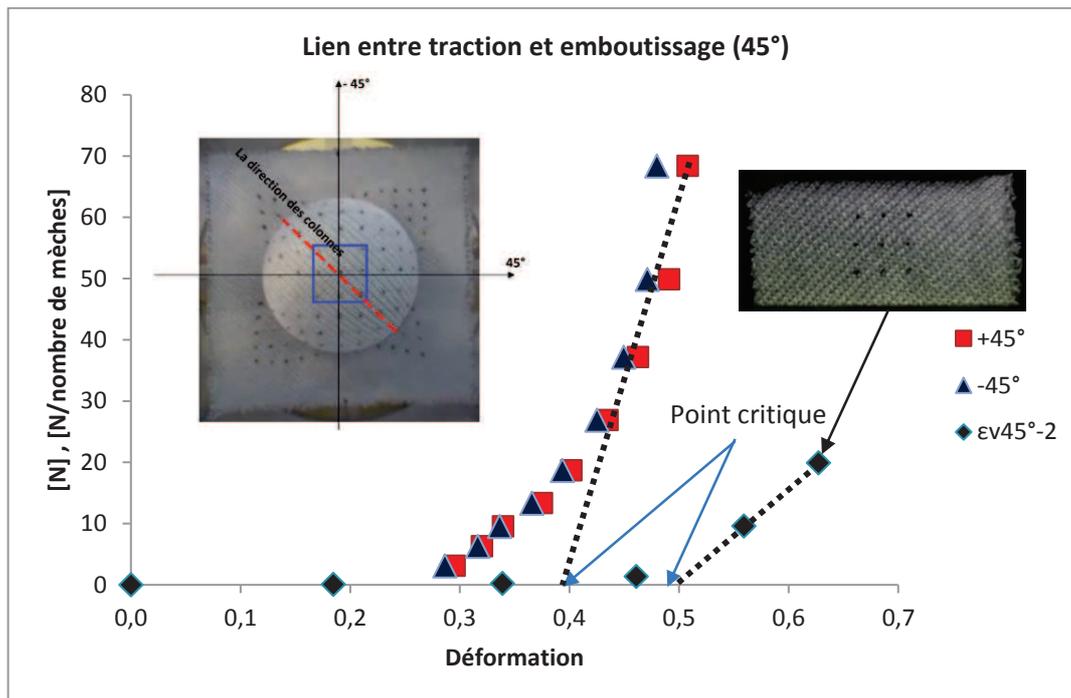


Figure 3-31: Le lien entre le comportement membranaire et la mise en forme de la structure tricotée (45°)

Dans les figures (3-30) et (3-31), les points critiques sur les courbes d'emboutissage et de traction, en termes de déformation, peut être considéré comme un critère de formabilité (pour avoir l'avalement). La distance entre ces points représente la capacité du renfort à draper.

3.7 Conclusions et perspectives du chapitre III

Dans ce chapitre, une analyse bibliographique montre l'importance de la maîtrise de la mise en forme de renforts textiles pour des applications à des milieux composites. Les mécanismes physiques de déformation rencontrés dans un renfort textile sont discutés. Une étude expérimentale du comportement d'une structure tricotée lors du procédé d'emboutissage a été réalisée. Des interprétations des courbes d'emboutissage à l'aide d'une analyse schématique faisant appel aux apports des analyses en comportement membranaire d'une structure tricotée vues au chapitre 2 ont été réalisées. Dans cette étude, l'objectif est d'établir un lien entre le comportement membranaire de la structure tricotée et sa mise en forme, afin de comprendre l'origine de comportement de l'éprouvette dans cette phase.

Cette étude a été réalisée, tout comme l'étude sur machine de traction vue au chapitre 2, sur une structure tricotée à maille cueillie de type côté (1*1) utilisant le même fil et les mêmes réglages de machine à tricoter. Des éprouvettes carrées, dans les directions (0°/90°) et (45°/-45°), ont été installées sur la machine d'emboutissage en utilisant un poinçon de forme hémisphérique de diamètre D=100 mm. La mesure des déformations locales a été effectuée par une méthode optique simplifiée utilisant des grilles de points comme dans le chapitre 2, mais avec cette fois des corrections permettant de tenir compte du caractère tridimensionnel de la structure déformée.

Les résultats de mise en forme, à l'échelle de la préforme, soit en termes d'avalement et d'efforts d'emboutissage mais également à l'échelle locale de la maille tricotée ont été présentés. La spécificité du comportement des renforts tricotés, et leur anisotropie relative à un comportement déséquilibré dans les directions des colonnes et des rangées ont été comparés avec les phénomènes montrés dans la littérature et concernant les renforts tissés. Cette comparaison a permis de mettre en exergue que la très grande déformabilité des structures tricotées nécessite la mise en place d'un critère en déformation, le long des rangées et des colonnes, à l'échelle de la structure pour caractériser la « drapabilité » de ces structures, alors que dans les structures tissées, cette «formabilité» est quantifiée par un critère en cisaillement. La notion de déformation critique ne peut s'apparenter à la notion d'angle de blocage utilisée couramment dans les renforts tissés pour prévenir les plis (Boisse et al., 2011; Hamila and Boisse, 2013), car dans le cas des renforts tricotés ce critère permettrait de qualifier la formabilité, alors que l'angle de blocage est utilisé pour prévenir les défauts.

La mesure du cisaillement a été réalisée par le biais de la mesure de la variation de de l'angle droit du quadrillage. On a constaté des variations très faibles de cisaillement sur le haut de la préforme, comme publié lors des emboutis des renforts tissés. En perspective cette mesure de cisaillement devrait être poursuivie notamment en d'autres endroits de la préforme.

La méthodologie mise en place, et le lien établi avec les résultats des essais de traction, doivent servir de base à des travaux ultérieurs dont l'un des objectifs pourra être la validation des modèles dans les outils de simulation numérique du procédé. D'autres travaux complémentaires relèvent de l'analyse de la formabilité de ces structures tricotées sur d'autres formes que le poinçon hémisphérique, afin d'appréhender des défauts, différents ou similaires à ceux décrits dans la littérature pour les renforts tissés (boucles, plis, démaillage). Ces travaux expérimentaux de mise

en forme seront associés à l'influence de la variation de paramètres procédés (effort serre-flanc, par exemple) sur cette déformabilité des structures. De manière identique le préformage de plusieurs couches et l'analyse du frottement, relativement à la structure spécifique des mailles de tricots seraient à mener.

4. CHAPITRE IV : Conclusions et perspectives générales

Dans ce manuscrit, nous nous sommes intéressés à la déformabilité et à l'analyse du comportement mécanique de renforts tricotés en vue de leur utilisation comme renforts de composites. Par leurs propriétés spécifiques issues de leur structure et notamment la grande extensibilité qu'elles permettent, ces architectures textiles sont déjà utilisées comme renfort dans différents domaines (Huysmans et al., 2001; Jiwei Zhang et al., 2009; Khondker et al., 2005; Leong et al., 1998; Luo and Verpoest, 2002; Pandita et al., 2002; Ramakrishna et al., 1997). Citons entre autre des applications en dynamique (impact, balistique, etc...), la grande extensibilité permettant une absorption d'énergie conséquente de ces structures.

Ces propriétés spécifiques sont, comme précisé, liées à leur structure. Cette structure a été présentée dans le chapitre 1, où comme tout milieu fibreux une démarche multi-échelle a été nécessaire. Ainsi après avoir présenté l'échelle du fil, et spécifiquement les propriétés influentes sur le comportement (titre du fil, torsion du fil, module d'élasticité spécifique, ténacité spécifique et allongement à rupture), nous avons détaillé les différentes méthodes de transformation de ce fil en contexture. Les types de technologie du tricotage (maille cueillie, maille jetée), le type de la machine (rectiligne, circulaire, Rachel, Tricot), l'arrangement des aiguilles (Jersey, (côte 1 et 1), Côte anglaise, Interlock, Punto-di-Roma), la taille des aiguilles, la jauge de la machine, les réglages de came d'abattage, la tension de fil, et la tension de rouloir, ont été respectivement passés en revue en tant que paramètres principaux influant sur la structure tricotée.

La variation d'un de ces paramètres peut modifier les propriétés dimensionnelles et géométriques d'une structure tricotée comme la hauteur (h) et la largeur (b) d'une maille, la longueur de fil absorbé par une maille (L_f), l'épaisseur de la structure tricotée (e), la géométrie de la maille, la masse surfacique de la structure tricotée, et la densité surfacique représentée par le nombre de colonnes et de rangées par unité de longueur.

Ce premier chapitre a permis de fabriquer une structure tricotée à maille cueillie de type (côte 1 et 1) dont la présentation des caractéristiques a conclu ce chapitre. Cette structure a servi de fil conducteur à l'étude expérimentale menée dans les chapitres 2 et 3. En termes de perspectives on peut bien évidemment citer que la démarche conduite sur cette structure n'a pas pu prendre en

compte l'influence de tous ces paramètres sur le comportement mécanique. La fabrication d'autres structures tricotées aurait pu être réalisée, ou l'influence de certaines caractéristiques étudiée.

Le second chapitre a été consacré à l'étude et la caractérisation expérimentale en traction uni axiale de la structure tricotée en fil acrylique. Cette étude expérimentale présente une vue globale sur l'influence de certains paramètres (le facteur de forme de l'éprouvette ou rapport longueur/largeur, l'effet de bord, la jauge de la machine et l'orientation des colonnes) sur le comportement mécanique. L'effet de l'orientation des colonnes par rapport l'axe de traction a été analysé schématiquement sur la base d'une définition géométrique de zones bloquées, libres, secondaires et d'intersection dans l'éprouvette afin d'avoir une compréhension approfondie sur l'origine des variations du comportement mécanique de la structure tricotée. La méthode optique simplifiée utilisée dans cette étude nous a permis d'avoir une idée sur l'évolution des déformations locales dans la zone du quadrillage, et de vérifier leur homogénéité dans cette zone. La courbe de traction (effort spécifique – déformation logarithmique) nous a permis de déterminer la rigidité, représentée par le module spécifique, et la déformation critique ϵ_c qui représente la phase transitoire qui accompagne le passage d'un comportement structural à un comportement plus proche d'un milieu continu et qui a été définie par un point de blocage.

Cette étude expérimentale limitée permet malgré tout de confirmer le potentiel important d'une structure tricotée, du fait de sa déformabilité très élevée, pour des utilisations comme renforts dans des applications de milieux composites. La complexité structurelle des structures tricotées exige une étude détaillée pour déterminer tous les paramètres qui entrent en jeu. A cet effet, cette étude pourra être prolongée dans certaines voies :

- Développement d'un algorithme robuste de corrélation d'image prenant en compte l'extensibilité élevée des structures tricotées, et l'aspect tridimensionnel d'une boucle (maille), pour accéder à une caractérisation plus complète des champs de déplacement et de déformations.
- Amélioration des conditions d'essais :
 - En augmentant la largeur de mâchoire afin d'élargir la zone d'étude pour minimiser l'effet de bord, et donc, obtenir ainsi plus de données caractérisant bien le comportement membranaire des structures tricotées,

- En élaborant un système mécanique mobile qui accouple le caméscope avec le banc d'essai afin d'améliorer la qualité des mesures et permettre l'accès à une évolution continue des informations recherchées.
- En tricotant les éprouvettes sur mesure dans différentes orientations (0° , 30° , 45° , 60° , 90°) directement sur la machine à tricoter pour éliminer les défauts rencontrés dans la phase de préparation des éprouvettes.
- Variation des paramètres d'étude liés à la fibre (origine, procédé de fabrication...), au fil (titre, torsion, ...), à la contexture (Jersey, (côte 1 et 1), Côte anglaise...), et à la machine (jauge, tension du fil, réglage de came d'abattage....), afin d'avoir plus d'informations sur tous les paramètres qui influencent le comportement mécanique de la structure tricotée. Par conséquent, construction d'un modèle mécanique robuste prenant en compte ces paramètres.

D'autres perspectives sur l'identification de ce comportement mécanique peuvent également être citées et notamment l'étude du comportement en traction bi axiale, les sollicitations dans les colonnes et les rangées lors de la mise en forme, par la présence des serres-flancs, étant plus proches de sollicitations de tractions bi axiales que de la traction uni axiale.

Le troisième et dernier chapitre a été dédié à l'étude expérimentale de la mise en forme, première étape du procédé de fabrication RTM. Une analyse bibliographique montre l'importance de la maîtrise de la mise en forme de renforts textiles pour des applications à des milieux composites. Les mécanismes physiques de déformation rencontrés dans un renfort textile ont été discutés. Pour autant cette analyse bibliographique et les mécanismes de déformations lors de ce procédé sont, dans la littérature, relatifs aux renforts tissés, et peu d'études traitent du comportement des tricots lors de la mise en forme. Après une présentation du banc d'essai, l'étude expérimentale du comportement d'une structure tricotée lors d'un procédé d'emboutissage a été réalisée. Les interprétations menées sur l'avalement tout autant que sur les efforts d'emboutissages nécessaires pour avoir la préforme ont été proposées à l'aide d'une analyse schématique faisant appel aux apports des analyses en comportement membranaire d'une structure tricotée vues au chapitre 2. En mettant en exergue les différences avec les renforts tissés couramment utilisés, cette étude expérimentale a montré l'importance de la mesure des déformations le long des colonnes et

des rangées, pour définir un critère « d'emboutissabilité », et indépendamment d'un critère en cisaillement communément utilisé avec les renforts tissés.

La méthodologie mise en place a permis de faire le lien entre le comportement membranaire caractérisé dans le chapitre 2 et le comportement lors de la mise en forme, et notamment les limites en déformations.

En termes de perspectives ces travaux expérimentaux ont permis d'établir une première base de résultats qui pourraient servir à corréler des méthodes de simulations par éléments finis du procédé RTM, ces modèles pouvant prendre en compte, dans la modélisation du comportement, les courbes expérimentales de comportement identifiées au chapitre 2.

D'autres travaux complémentaires relèvent de l'analyse de la formabilité de ces structures tricotées sur d'autres formes que le poinçon hémisphérique, afin d'appréhender des défauts, différents ou similaires à ceux décrits dans la littérature pour les renforts tissés (boucles, plis, démaillage). Ces travaux expérimentaux de mise en forme seront associés à l'influence de la variation de paramètres du procédé (effort serre-flanc, par exemple) sur cette déformabilité des structures. De manière identique le préformage de plusieurs couches et l'analyse du frottement, relativement à la structure spécifique des mailles de tricots, seraient à mener.

5. Annexe A : Propagation des incertitudes

5.1 Introduction

Le mot "erreur" se réfère à quelque chose de juste ou de vrai. On parle d'erreur sur une mesure physique lorsqu'on peut la comparer à une valeur de référence qu'on peut considérer comme "vraie" (par ex : mesure de la vitesse de la lumière, de la température du zéro absolu).

Généralement, pour les mesures effectuées en laboratoire, on ne possède pas de valeur de référence et on ne connaît pas la valeur exacte de la grandeur mesurée (par ex. vitesse d'un projectile (tir)). On parle alors d'**incertitude**.

Le résultat Y d'une mesure dépend généralement de plusieurs grandeurs mesurées (x_1, x_2, \dots). On parle alors d'une **grandeur composée**. Chaque grandeur mesurée a une certaine incertitude ($\Delta x_1, \Delta x_2, \dots$) et ces dernières vont se combiner pour produire l'incertitude totale ΔY sur le résultat Y . La façon dont l'incertitude de chaque paramètre individuel contribue à l'incertitude totale est décrite par la **propagation des incertitudes**.

La propagation des incertitudes est donc le terme correct pour l'expression improprement mais couramment utilisée de **calcul d'erreur**.

5.2 Mesure

Dans nos travaux expérimentaux, nous utilisons un moyen optique pour mesurer en pixel les déplacements des points du quadrillage sur une éprouvette au cours d'un test (traction uni axiale ou emboutissage), puis nous insérons ces **grandeurs mesurées** dans une formule afin de calculer les déformations locales (sans dimension) qui représentent les **grandeurs calculées**.

Il est essentiellement impossible de déterminer la vraie valeur d'une grandeur physique (par ex. allongement relatif entre deux points). Cela s'explique par le fait que les instruments de mesure utilisés, de même que les organes des sens dont on ne peut se passer, ne possèdent pas une sensibilité infinie. La limite de sensibilité se trouve imposée en dernier lieu par la structure atomique de la matière et les phénomènes de fluctuation statistique qui y sont liés. Un résultat de mesure aura par conséquent plus ou moins de chances de s'approcher de la vraie valeur de la grandeur à mesurer, suivant la finesse de l'instrument de mesure et l'habileté de l'expérimentateur.

5.3 Les incertitudes des mesures

On distingue différentes sortes d'erreurs dont toute mesure peut être affectée : les erreurs systématiques, les erreurs accidentelles et la dispersion statistique, (Hughes, 2010; Taylor et al., 1999).

5.3.1 Les erreurs systématiques

Elles se produisent par exemple lorsqu'on emploie des unités mal étalonnées ou lorsqu'on néglige certains facteurs qui ont une influence sur la marche de l'expérience. Cela mène à un décalage (biais) du résultat si l'erreur commise est toujours la même. Ces erreurs influencent l'exactitude (ou justesse) de la mesure.

Dans la plupart des cas, les erreurs systématiques, pour autant qu'on en connaisse la cause, peuvent être prises en considération par une correction correspondante apportée au résultat de la mesure.

Nos travaux de recherche sont composés de deux démarches expérimentales : des essais de traction uni axiale et des essais d'emboutissage. Sur les bancs d'essais, on a deux types de capteurs : un pour mesurer l'effort, et l'autre pour mesurer l'allongement dans le cas de traction uni axiale ou la course du poinçon dans le cas d'emboutissage. Les incertitudes de ces cellules sont mentionnées dans le tableau (5-1).

Tableau 5-1 : Les incertitudes des cellules dans les bancs de traction uni axiale et d'emboutissage

	Traction uni axiale	Emboutissage
Capteur de force	$\pm 0,5\%$ de la pleine échelle	$\pm 0,1$ [N]
Capteur de déplacement	$\pm 0,01$ mm de l'affichage	$\pm 0,01$ mm de l'affichage

5.3.2 Les erreurs accidentelles

Ces erreurs, qui affectent la précision (ou fidélité) de la mesure, ne peuvent en principe pas être évitées. Leur cause se trouve dans l'expérimentateur lui-même. La sûreté avec laquelle la main manie un instrument, l'exactitude avec laquelle l'œil observe ou l'acuité différentielle de l'oreille sont limitées. C'est la tâche de tout observateur d'être conscient des erreurs accidentelles de mesure, de les maintenir aussi faibles que possible et d'estimer ou calculer leur influence sur le résultat obtenu.

Afin de minimiser ce type d'erreurs, et malgré la simplicité des outils de mesure, nos propres protocoles conçus sont strictement respectés (la préparation des éprouvettes, installation des éprouvettes sur le banc d'essais, le serrage des éprouvettes, le positionnement d'appareil photo numérique, et l'éclairage).

5.3.3 La dispersion statistique

La dispersion statique, qui apparaît lorsqu'on fait des mesures répétées de la même grandeur, affecte la précision de la mesure. Si l'on mesure plusieurs fois le même phénomène avec un appareil de mesure suffisamment précis, on obtiendra à chaque fois un résultat différent x_i . Ceci est dû à des phénomènes perturbateurs (par ex. bruit de fond électronique, sensibilité d'un instrument aux variations de température) ou, pour des mesures extrêmement précises, à la nature aléatoire du phénomène (chaos, incertitude quantique).

Pour un grand nombre de mesures et phénomènes physiques, on peut généralement postuler que la distribution des valeurs obtenues suit une distribution de Gauss (distribution normale). La distribution de Gauss est caractérisée par deux paramètres (voir figure (5-1)) : sa **valeur moyenne** x_0 et sa **variance** σ^2 (ou **écart type** σ).

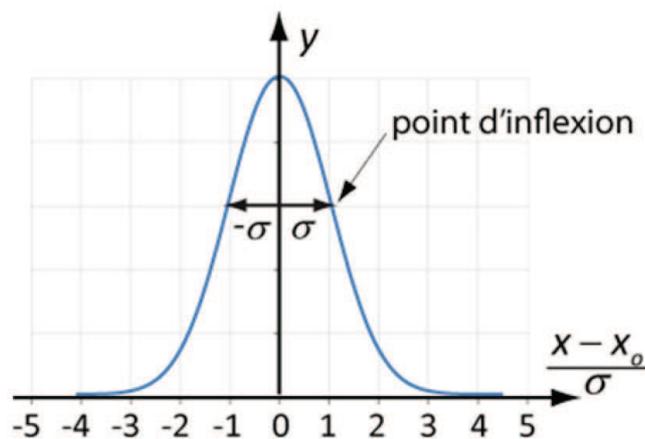


Figure 5-1: Distribution de Gauss, (Hughes, 2010; Taylor et al., 1999)

Le but de répéter un grand nombre de fois (N fois) la mesure du même paramètre est d'obtenir une estimation aussi précise que possible de la vraie valeur cherchée x_0 . On constate que cette estimation sera d'autant plus précise que la distribution de Gauss est étroite, c'est-à-dire que σ est petit. La méthode de mesure, les appareils utilisés ainsi que l'habileté de l'expérimentateur

contribuent chacun à la grandeur de σ . Donc, les mesures du déplacement sont répétées (5 fois), afin d'avoir une estimation aussi précise de la vraie valeur du déplacement.

Le meilleur estimateur de la vraie valeur x_0 est la **moyenne** arithmétique \bar{x} des N résultats individuels x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5 - 1)$$

De même, le meilleur estimateur de la **variance** de la distribution de x est donné par :

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5 - 2)$$

Finalement, la précision avec laquelle on détermine x_0 est donnée par la **variance de la moyenne** \bar{x} qu'on note $\sigma_{\bar{x}}^2$:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{1}{N} \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \cdot \left[\frac{1}{(N - 1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right] \quad (5 - 3)$$

Cette valeur varie inversement avec le nombre de mesures N . Ainsi, si on veut diminuer l'écart type de la moyenne d'un résultat $\sigma_{\bar{x}}$ d'un facteur 2, il faut quadrupler le nombre de mesures (ou alors améliorer la méthode et/ou les appareils, sans parler de l'expérimentateur !).

Le résultat de la mesure est finalement donné sous la forme :

$$\bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (5 - 4)$$

A côté de l'erreur absolue $\sigma_{\bar{x}}$ d'un résultat de mesure, il est souvent commode d'indiquer l'erreur relative $\frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}}$. L'erreur absolue a toujours la même dimension (même unité) que le résultat de la mesure lui-même. L'erreur relative n'a pas de dimension et s'exprime en %.

5.4 Incertitudes sur une mesure composée ; loi de propagation

Les mesures effectuées en physique sont le plus souvent indirectes, c'est-à-dire que le résultat final d'une expérience ne consiste pas dans la mesure (répétée ou non) d'une seule, mais de plusieurs grandeurs qui, liées par une loi physique, conduisent au résultat cherché. Chacune de ces grandeurs comporte une certaine incertitude ; le résultat de l'expérience en comporte aussi une qui dépend des incertitudes individuelles. On peut déterminer de quelle manière chacune de ces incertitudes se répercute sur la grandeur finale, en utilisant la formule suivante pour une fonction de plusieurs variables indépendantes $f(x_1, x_2, x_3, \dots)$:

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_3} \right| \Delta x_3 + \dots \quad (5 - 5)$$

Les grandeurs calculées dans nos travaux expérimentaux sont les déformations locales, qui sont données par la formule suivante :

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{l_{finale}}{l_{initiale}} \right) = \ln(l_{finale}) - \ln(l_{initiale}) \quad (5 - 6)$$

Avec

l : la distance entre deux points dans le quadrillage, qui peut être calculée par la formule suivante :

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5 - 7)$$

On applique la formule (5-5) sur les formules (5-7) et (5-6) :

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta l_{finale}}{l_{finale}} + \frac{\Delta l_{initiale}}{l_{initiale}} \quad (5 - 8)$$

$$\Delta l = \frac{x_1}{l} \cdot \Delta x_1 + \frac{x_2}{l} \cdot \Delta x_2 + \frac{y_1}{l} \cdot \Delta y_1 + \frac{y_2}{l} \cdot \Delta y_2 \quad (5 - 9)$$

On applique les formules (5-8) et (5-9) sur une éprouvette pour déterminer la propagation des incertitudes au cours d'un essai.

6. Bibliographie

A

- Abdin, Y., Taha, I., El-Sabbagh, A., Ebeid, S., 2013. Description of draping behaviour of woven fabrics over single curvatures by image processing and simulation techniques. *Compos. Part B Eng.* 45, 792–799.
- Abou-Iiana, M., 2000. Fadenzugkräfte beim stricken mit relativbewegung. *Melliand TextilberichteInternational Text. Reports* 81, 726–745.
- Abounaim, M., Diestel, O., Hoffmann, G., Cherif, C., 2011. High performance thermoplastic composite from flat knitted multi-layer textile preform using hybrid yarn. *Compos. Sci. Technol.* 71, 511–519.
- Abounaim, M., Hoffmann, G., Diestel, O., Cherif, C., 2009. Development of Flat Knitted Spacer Fabrics for Composites using Hybrid Yarns and Investigation of Two-dimensional Mechanical Properties. *Text. Res. J.* 79, 596–610.
- Abounaim, M., Hoffmann, G., Diestel, O., Cherif, C., 2010. Thermoplastic composite from innovative flat knitted 3D multi-layer spacer fabric using hybrid yarn and the study of 2D mechanical properties. *Compos. Sci. Technol.* 70, 363–370.
- Adanur, S., 1995. *Wellington Sears handbook of industrial textiles*. Technomic Pub, Lancaster, Pa.
- Allaoui, S., Boisse, P., Chatel, S., Hamila, N., Hivet, G., Soulat, D., Vidal-Salle, E., 2011. Experimental and numerical analyses of textile reinforcement forming of a tetrahedral shape. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 42, 612–622.
- Amirbayat, J., 1980. *Mechanics of flexible fibre assemblies*.
- Arbter, R., Beraud, J.M., Binetruy, C., Bizet, L., Bréard, J., Comas-Cardona, S., Demaria, C., Endruweit, a., Ermanni, P., Gommer, F., Hasanovic, S., Henrat, P., Klunker, F., Laine, B., Lavanchy, S., Lomov, S.V., Long, a., Michaud, V., Morren, G., Ruiz, E., Sol, H., Trochu, F., Verleye, B., Wietgreffe, M., Wu, W., Ziegmann, G., 2011. Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 42, 1157–1168.
- Australian Standard Methods of Test for Textiles (Ed.), 1981. Determination of the number of wales and courses per unit length in knitted fabric.

B

- Badel, P., Vidalsalle, E., Boisse, P., 2007. Computational determination of in-plane shear mechanical behaviour of textile composite reinforcements. *Comput. Mater. Sci.* 40, 439–448.
- Balea, L., 2011. Comportement de matériaux composites à renforts tricotés élaborés par infusion de résine (Thesis). Université de Toulouse, Toulouse - France.
- Baley, C., 2005. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Tech. Ingénieur Text. À Usage Tech.* base documentaire : TIB534DUO.
- Bardonnat, P., 1997. Résines époxydes EP Mise en œuvre et applications. *Tech. Ingénieur Matières Thermodurcissables Monogr.* base docum.
- Bathias, C., 2013. *Matériaux composites - 2e édition - NP, 2e ed.* DUNOD.
- Bel, S., 2011. Analyse et simulation de la mise en forme des renforts de composites NCF. INSA de Lyon.
- Berthelot, J.-M., 1999. *Composite Materials Mechanical Behavior and Structural Analysis.* Springer New York, New York, NY.
- Bickerton, S., Šimáček, P., Guglielmi, S.E., Advani, S.G., 1997. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 28, 801–816.
- Binétury, C., 2004. Physique du moulage des composites avancés : aspects théoriques. *Tech. Ingénieur Plasturgie Procédés Spécifiques Aux Compos.* base docum.
- Binétury, C., 2006. Physique du moulage des composites avancés : applications. *Tech. Ingénieur Plasturgie Procédés Spécifiques Aux Compos.* base docum.
- Boisse, P., 2004. Mise en forme des renforts fibreux de composites. *Tech. Ingénieur Plasturgie Procédés Spécifiques Aux Compos.* base docum, 10.
- Boisse, P., Gasser, a., Hivet, G., 2001. Analyses of fabric tensile behaviour: determination of the biaxial tension–strain surfaces and their use in forming simulations. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 32, 1395–1414.
- Boisse, P., Hamila, N., Vidal-Sallé, E., Dumont, F., 2011. Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses. *Compos. Sci. Technol.* 71, 683–692.

- Bueno, M. -a., Renner, M., Nicoletti, N., 2004. Influence of Fiber Morphology and Yarn Spinning Process on the 3D Loop Shape of Weft Knitted Fabrics in Terms of Roughness and Thickness. *Text. Res. J.* 74, 297–304.
- Bueno, M.-A., 2008. Structure and mechanics of knitted fabrics, in: *Structure and Mechanics of Textile Fibre Assemblies*. Woodhead Publishing in association with the Textile Institute ; CRC Press, pp. 84–115.
- Buet-Gautier, K., Boisse, P., 2001. Experimental analysis and modeling of biaxial mechanical behavior of woven composite reinforcements. *Exp. Mech.* 41, 260–269.

C

- Cao, J., Akkerman, R., Boisse, P., Chen, J., Cheng, H.S., Graaf, E.F. de, Gorczyca, J.L., Harrison, P., Hivet, G., Launay, J., Lee, W., Liu, L., Lomov, S. V., Long, A., Luycker, E. de, Morestin, F., Padvoiskis, J., Peng, X.Q., Sherwood, J., Stoilova, T., Tao, X.M., Verpoest, I., Willems, A., Wiggers, J., Yu, T.X., Zhu, B., 2008. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 39, 1037 – 1053.
- Caramaro, L., 2006. Textiles à usage technique. *Tech. Ingénieur Matériaux Compos. Présentation Renforts base documentaire : TIB142DUO*.
- Caramaro, L., 2005. Fibres et fils à usage technique. *Tech. Ingénieur Text. Tradit. Text. Tech.* 33, 0–15.
- Chaboche, J.-L., Lemaitre, J., 2009. *Mécanique des matériaux solides*, 3e ed. Dunod, Paris.
- Chang, S.H., Sutcliffe, M.P.F., Sharma, S.B., 2004. Microscopic investigation of tow geometry changes in a woven prepreg material during draping and consolidation. *Compos. Sci. Technol.* 64, 1701 – 1707.
- Charmetant, A., 2011. *Approches hyperélastiques pour la modélisation du comportement mécanique de préformes tissées de composites*. INSA de Lyon.
- Charmetant, A., Wendling, A., Hivet, G., Vidal-Sallé, E., Maire, E., Boisse, P., 2010. Simulation and tomography analysis of textile composite reinforcement deformation at the mesoscopic scale, in: *Proceedings of the 10th International Conference on Textile Composites - TEXCOMP 10: Recent Advances in Textile Composites*. Lille, pp. 135–142.
- Cherouat, A., Borouchaki, H., Billoët, J.-L., 2005. Geometrical and mechanical draping of composite fabric. *Rev. Eur. Éléments Finis* 14, 693–707.

- Chevalier, A., Berbain, F., 1997. Mise en œuvre des composites Méthodes et matériels. Tech. Ingénieur Plasturgie Procédés Spécifiques Aux Compos. base docum.
- Chou, S., Chen, H.-C., Lai, C.-C., 1992. The fatigue properties of weft-knit fabric reinforced epoxy resin composites. *Compos. Sci. Technol.* 45, 283–291.
- Crookston, J.J., Long, A.C., Jones, I.A., 2002. Modelling effects of reinforcement deformation during manufacture on elastic properties of textile composites. *Plast. Rubber Compos.* 31, 58–65.
- Cusick, G.E., 1968. THE MEASUREMENT OF FABRIC DRAPE. *J. Text. Inst.* 59, 253–260.

D

- De Araújo, M., Figueiro, R., Hong, H. b, 2003. Modelling and simulation of the mechanical behaviour of weft-knitted fabrics for technical applications: Part I: General considerations and experimental analyses. *Autex Res. J.* 3, 111–123.
- De Bilbao, E., 2008. Analyse et identification du comportement en flexion des renforts fibreux de composites (Doctorat en Mécanique). Université d'Orléans, Orléans, France.
- De Bilbao, E., Soulat, D., Hivet, G., Gasser, A., 2010. Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements. *Exp. Mech.* 50, 333–351.
- De Luycker, E., 2009a. Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks (Thèse de doctorat en mécanique). Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon - France.
- De Luycker, E., 2009b. Simulation et expérimentation en mise en forme de renforts composites 3D interlocks (Thèse de doctorat en mécanique). Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon - France.
- Doyle, P.J., 1953. Fundamental Aspects of the Design of Knitted Fabrics. *J Text. Inst* 44, 561–578.
- Dridi, S., 2010. Essais de Caractérisation des Structures Tissées (Thèse de doctorat en mécanique). L'Institut National des Science Appliquées de Lyon, Lyon - France.
- Dubied, E., 1967. Dubied Knitting Manual. Switzerland.
- Duhovic, M., 2004. DEFORMATION CHARACTERISTICS OF KNITTED FABRIC COMPOSITES. Mech. Eng. THE UNIVERSITY OF AUCKLAND.

- Duhovic, M., Bhattacharyya, D., 2006. Simulating the deformation mechanisms of knitted fabric composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 37, 1897–1915.
- Dumont, F., 2003. *Expérimentations et Modèles de Comportement de Renforts de Composites Tissés* (Thèse de doctorat en mécanique). Université de Paris 6, Paris, France.
- Dumont, F., Hivet, G., Rotinat, R., Launay, J., Boisse, P., Vacher, P., 2003. Field measurements for shear tests on woven reinforcements [Mesures de champs pour des essais de cisaillement sur des renforts tissés]. *Mec. Ind.* 4, 627–635.
- Duong, A.V., 2008. *Étude expérimentale du comportement mécanique de renforts composites tissés lors de la mise en forme sur géométries non développables* (Doctorat en Mécanique). Université d'Orléans, Orléans, France.
- Durville, D., 2009. Finite element simulation of textile materials at the fiber scale, in: *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*. Baltimore, MD.

E

- Epstein, M., Nurmi, S., 1991. Near net shape knitting of fiber glass and carbon for composites, in: *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)*. pp. 102–113.

F

- Fukuta, K., Aoki, E., 1986. *3D fabrics for structural composites*. Philadelphia, PA.

G

- Gasser, A. c, Boisse, P., Hanklar, S., 2000. Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements. 3D simulations versus biaxial tests. *Comput. Mater. Sci.* 17, 7–20.
- Gay, D., 2005. *Matériaux composites*. Hermès Science Publications : Lavoisier, Paris.
- Gohl, E.P.G., Vilensky, L.D., 1991. . *Knitt. Text. Mod. Living* 4supthsup Ed. 213–245.
- Gu, H., 2007. Tensile behaviours of woven fabrics and laminates. *Mater. Des.* 28, 704 – 707.

H

- Haanappel, S., 2013. FORMING OF UD FIBRE REINFORCED THERMOPLASTICS (Ph.D.). University of Twente, Twente - Netherlands.
- Haanappel, S.P., Akkerman, R., 2013. Shear characterisation of uni-directional fibre reinforced thermoplastic melts by means of torsion. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*
- Hagège, B., 2004. SIMULATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES MILIEUX FIBREUX EN GRANDES TRANSFORMATIONS : APPLICATION AUX RENFORTS TRICOTES (Doctorat en Mécanique). Arts et Métiers ParisTech de Paris, Paris, France.
- Hagège, R., 1998. Filage textile. Tech. Ingénieur Text. Tradit. Text. Tech. base docum.
- Hamila, N., 2007. Simulation de la mise en forme des renforts composites mono et multi plis (Thèse de doctorat en mécanique). INSA de Lyon, Lyon - France.
- Hamila, N., Boisse, P., 2013. Locking in simulation of composite reinforcement deformations. Analysis and treatment. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 53, 109–117.
- Harrison, P., Clifford, M.J., Long, A.C., 2004. Shear characterisation of viscous woven textile composites: A comparison between picture frame and bias extension experiments. *Compos. Sci. Technol.* 64, 1453–1465.
- Hearle, J.W.S., 1994. Textiles for composites. *Text. Horizons* 14, 12–15.
- Herszberg, I., Falzon, P.J., Leong, K.H., Bannister, M.K., 1996. Bearing strength of glass/epoxy composites manufactured from weft-knitted E-glass fabric. *Proc Conf 1st Australas. Congr. Appl. Mech.* 1, 279–284.
- Heß, H., Himmel, N., 2011a. Structurally stitched NCF CFRP laminates. Part 1: Experimental characterization of in-plane and out-of-plane properties. *Compos. Sci. Technol.* 71, 549–568.
- Heß, H., Himmel, N., 2011b. Structurally stitched NCF CFRP laminates. Part 2: Finite element unit cell based prediction of in-plane strength. *Compos. Sci. Technol.* 71, 569–585.
- Hivet, G., Boisse, P., 2008. Consistent mesoscopic mechanical behaviour model for woven composite reinforcements in biaxial tension. *Compos. Part B Eng.* 39, 345–361.
- Höhfeld, J., Drew, M.J., Kaldenhoff, R., 1994. Consolidation of thick, close, circular, knitted glass fibre textiles with epoxy resin into flat panels, tubes and T-profiles. *Proc Conf Int. Conf. Flow Process. Compos. Mater.* 120–142.

- Hughes, I., 2010. *Measurements and their uncertainties: a practical guide to modern error analysis*. New York : Oxford University Press, Oxford.
- Hunter, B., 2008. High speed ML 45 raschel lace machine for dynamic lingerie market [WWW Document]. Knitt. Ind. URL <http://www.knittingindustry.com/high-speed-ml-45-raschel-lace-machine-for-dynamic-lingerie-market/> (accessed 7.12.13).
- Hunter, B., 2009. New dimension in technical knits from Mayer & Cie. [WWW Document]. Knitt. Ind.
- Huysmans, G., Verpoest, I., Van Houtte, P., 2001. A damage model for knitted fabric composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 32, 1465–1475.

I

- Innovation Centre, W.L., 2009. K4I - Knowledge for innovation [WWW Document]. URL www.k4i.org.uk
- ISO 3801, 1977. TEXTILES - TISSUS - DETERMINATION DE LA MASSE PAR UNITE DE LONGUEUR ET DE LA MASSE PAR UNITE DE SURFACE. - Textiles. Tissus. Détermination de la masse par unité de longueur et de la masse par unité de surface.
- ITF-Maille, 1976. Géométrie des tricots: application à la mise en fabrication. Presented at the ITF-Maille, Troyes - France.
- JEC Group, 2010. *The worldwide composites industry : Structure, Trends and Innovation*.
- Jiwei Zhang, Hong Hu, Baozhong Sun, Bohong Gu, 2009. Dynamic Responses of 3-D Multi-structured Knitted Composite T-beam under Transverse Impact. *J. Compos. Mater.* 44, 157–180.
- JJF, K., W, F., 1971. Dimensional properties of knitted wool fabrics. Interlock and Swiss double-pique structures fully relaxed and in machinewashing and tumble-drying- 5. *Text. Res. J.* 41, 158–166.
- Johnson, A.F., 1995. Rheological model for the forming of fabric-reinforced thermoplastic sheets. *KCompos. Manuf.* 6, 153 – 160.

K

- Kalpakjian, S., Schmid, S.R., 2013. *Manufacturing engineering and technology*, Seventh ed. ed. Prentice Hall.

- Kamiya, R., Cheeseman, B.A., Popper, P., Chou, T.-W., 2000. Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: A review. *Compos. Sci. Technol.* 60, 33–47.
- Karahan, M. b, Lomov, S.V., Bogdanovich, A.E., Mungalov, D., Verpoest, I., 2010. Internal geometry evaluation of non-crimp 3D orthogonal woven carbon fabric composite. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 41, 1301–1311.
- KARL MAYER, 2010. KARL MAYER textile machines - Composite know-how straight from the fibre to the structural component [WWW Document]. Karl Mayer.
- Kawabata, S., Niwa, M., Kawai, H., 1973. FINITE-DEFORMATION THEORY OF PLAIN-WEAVE FABRICS - 1. THE BIAXIAL-DEFORMATION THEORY. *J. Text. Inst.* 64, 21–46.
- Khan, M. a., Mabrouki, T., Vidal-Sallé, E., Boisse, P., 2010. Numerical and experimental analyses of woven composite reinforcement forming using a hypoelastic behaviour. Application to the double dome benchmark. *J. Mater. Process. Technol.* 210, 378–388.
- Khondker, O.A., Leong, K.H., Herszberg, I., Hamada, H., 2005. Impact and compression-after-impact performance of weft-knitted glass textile composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 36, 638–648.
- Knapton, J.J., Truter, E.V., Aziz, A.K.M.A., 1975. The geometry, dimensional properties and stabilization of the cotton plain-jersey structure. *J. Text. Inst.* 12, 413–419.
- Knapton, J.J.F., 1969. Geometry of complex knitted structures. *Text. Res. J.* 39, 889–892.
- Knapton, J.J.F., 1974. Factors affecting the stable dimensions of double-jersey structures. *J. Text. Inst.* 32, 293–299.
- Knapton, J.J.F., Ahrens, F.J., Ingenthron, W.W., Fong, W., 1968a. The dimensional properties of knitted wool fabrics. Part 2: 1×1 , 2×2 rib, and half-cardigan structures. *Text. Res J* 38, 1013–1026.
- Knapton, J.J.F., Ahrens, F.J., Ingenthron, W.W., Fong, W., 1968b. Dimensional properties of knitted wool fabrics, part 1: The plain knitted structure. *Text. Res J* 38, 999–1012.
- Knapton, J.J.F., Munden, D.L., 1966. A study of the mechanism of loop formation on weft-knitting machinery. *Text. Res J* 36, 1072–1091.
- Kurbak, a., Alpyildiz, T., 2009. Geometrical Models for Balanced Rib Knitted Fabrics Part II: Applications of 1×1 Rib Model to Presser-Foot Knitted 1×1 Rib, Interlock and Half Milano Rib. *Text. Res. J.* 79, 495–505.

Kurbak, A., 1982. Some Effects of Substituting a Presser-foot for Take Down Tension in Weft Knitting. *Some Eff. Substituting Press.-Foot Take Tens. Weft Knitt.*

Kurbak, A., 2009. Geometrical Models for Balanced Rib Knitted Fabrics Part I: Conventionally Knitted 1×1 Rib Fabrics. *Text. Res. J.* 79, 418–435.

L

Lau, K.W., Dias, T., 1994. Knittability of high-modulus yarns. *J. Text. Inst.* 85, 173–190.

Launay, J., Hivet, G., Duong, A. V., Boisse, P., 2008. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements. *Compos. Sci. Technol.* 68, 506–515.

Lebrun, G., Bureau, M.N., Denault, J., 2003. Evaluation of bias-extension and picture-frame test methods for the measurement of intraply shear properties of PP/glass commingled fabrics. *Compos. Struct.* 61, 341 – 352.

Lee, J.S., Hong, S.J., Yu, W.-R., Kang, T.J., 2007. The effect of blank holder force on the stamp forming behavior of non-crimp fabric with a chain stitch. *Compos. Sci. Technol.* 67, 357–366.

Leong, K.H., Falzon, P.J., Bannister, M.K., Herszberg, I., 1998. An investigation of the mechanical performance of weft-knit Milano-rib glass/epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.* 58, 239–251.

Leong, K.H., Nguyen, M., Herszberg, I., 1999. Effects of deforming knitted glass fabrics on the basic composite mechanical properties. *J. Mater. Sci.* 34, 2377–2387.

Leong, K.H., Ramakrishna, S., Huang, Z.M., Bibo, G. a., 2000. The potential of knitting for engineering composites—a review. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 31, 197–220.

Lin, H., Wang, J., Long, a, Clifford, M., Harrison, P., 2007. Predictive modelling for optimization of textile composite forming. *Compos. Sci. Technol.* 67, 3242–3252.

Liu, X., Chen, N., Feng, X., 2008. Effect of Yarn Parameters on the Knittability of Glass Ply Yarn. *FIBRES Text. East. Eur.* 90–93.

Lomov, S., Barburski, M., Stoilova, T., Verpoest, I., Akkerman, R., Loendersloot, R., Thije, R., 2005. Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms. Part 3: Biaxial tension, picture frame and compression tests of the preforms. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 36, 1188–1206.

- Lomov, S., Boisse, P., Deluycker, E., Morestin, F., Vanclooster, K., Vandepitte, D., Verpoest, I., Willems, a, 2008. Full-field strain measurements in textile deformability studies. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 39, 1232–1244.
- Lomov, S. V, Belov, E.B., Bischoff, T., Ghosh, S.B., Chi, T.T., Verpoest, I., 2002. Carbon composites based on multiaxial multiply stitched preforms . Part 1 . Geometry of the preform. *Production* 33, 1171–1183.
- Long, A.C., 2007. *Composites forming technologies*. Woodhead, Cambridge.
- Long, A.C., Rudd, C.D., 1994. Simulation of reinforcement deformation during the production of preforms for liquid moulding processes. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 208, 269–278.
- Luo, Y., Verpoest, I., 2002. Biaxial tension and ultimate deformation of knitted fabric reinforcements. *Composites. Part A* 33, 197–203.

M

- Mack, C., Taylor, H.M., 1956. The fitting of woven cloth to surfaces. *J Text Inst* 47, 477–488.
- Manthey, D.W., Lee, D., 1995. Recent developments in a vision-based surface strain measurement system. *JOM* 47, 46–49.
- Mattsson, D., Joffe, R., Varna, J., 2007. Methodology for characterization of internal structure parameters governing performance in NCF composites. *Compos. Part B Eng.* 38, 44–57.
- McGuinness, G.B., ÓBrádaigh, C.M., 1997. Development of rheological models for forming flows and picture-frame shear testing of fabric reinforced thermoplastic sheets. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 73, 1 – 28.
- McIntyre, J.E., Textile Institute (Manchester, 2005. *Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin*. CRC Press ; Woodhead Pub., Boca Raton; Cambridge, England.
- Michaud, V., Mortensen, A., 2001. Infiltration processing of fibre reinforced composites: Governing phenomena. *Compos. - Part Appl. Sci. Manuf.* 32, 981–996.
- Milani, A.S., Nemes, J.A., Abeyaratne, R.C., Holzappel, G.A., 2007. A method for the approximation of non-uniform fiber misalignment in textile composites using picture frame test. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 38, 1493 – 1501.
- Miravete, A., 1999. *3-D textile reinforcements in composite materials*. Woodhead Publ. Ltd [u.a.], Cambridge.

- Mohammed, U., Lekakou, C., Dong, L., Bader, M.G., 2000. Shear deformation and micromechanics of woven fabrics. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 31, 299 – 308.
- Mouritz, a. P., Bannister, M.K., Falzon, P.J., Leong, K.H., 1999. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 30, 1445–1461.
- Munden, D.L., 1959. The geometry and dimensional properties of plain-knit fabrics. *J Text. Inst* 50, T448–T471.
- Munden, D.L., 1985. Objective measurement of knitted fabric parameters – Its importance to control of knitting process. *Text. Mach. Soc. Jpn.* 39–44.

N

- Najjar, W., 2012. Contribution à la simulation de l’emboutissage de préformes textiles pour applications composites (Doctorat en Mécanique-Matériaux). Arts et Métiers ParisTech d’Angers, Angers - France.
- Najjar, W., Legrand, X., Dal Santo, P., Soulat, D., Boude, S., 2013. Analysis of the Blank Holder Force Effect on the Preforming Process Using a Simple Discrete Approach. *Key Eng. Mater.* 554-557, 441–446.
- Najjar, W., Legrand, X., Pupin, C., Dal Santo, P., Boude, S., 2012. A Simple Discrete Method for the Simulation of the Preforming of Woven Fabric Reinforcement. *Key Eng. Mater.* 504-506, 213–218.
- Nemoz, G., 2003. Textures textiles tridimensionnelles. Tech. Ingénieur Text. Tradit. Text. Tech. base docum.
- NF EN 14970, 2006. Textiles - Étoffes à mailles - Détermination de la longueur de fil absorbée et de la masse linéique du fil dans les tricots à mailles cueillies.
- NF EN ISO 2062, 2010. Textiles - Fils sur enroulements - Détermination de la force de rupture et de l’allongement à la rupture des fils individuels à l’aide d’un appareil d’essai à vitesse constante d’allongement.
- NF EN ISO 5084, 1996. Textiles - Détermination de l’épaisseur des textiles et produits textiles.
- NF ISO 4606, 1996. Verre textile - Tissus - Détermination de la force de rupture en traction et de l’allongement à la rupture par la méthode de la bande.
- Nguyen, Q.T., 2011. Analyse expérimentale et numérique de la compaction des renforts fibreux : Application pour la perméabilité. INSA de Lyon.

Nodal Consultants, 2001. Industrie Française des matériaux composites - Des enjeux prioritaires pour un développement durable [WWW Document]. Dir. Générale Compétitivité Ind. Serv. DGCIS. URL <http://www.dgcis.gouv.fr/files/files/archive/www.industrie.gouv.fr/biblioth/docu/dossiers/sect/pdf/synthese.pdf> (accessed 10.2.13).

O

Ouagne, P., Bréard, J., Ouahbi, T., Saouab, A., Park, C.H., 2009. Hydro-mechanical loading and compressibility of fibrous media for resin infusion processes. *Int. J. Mater. Form.* 3, 1287–1294.

Ouagne, P., Soulat, D., Moothoo, J., Capelle, E., Gueret, S., 2013. Complex shape forming of a flax woven fabric; analysis of the tow buckling and misalignment defect. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 51, 1–10.

Ouagne, P., Soulat, D., Tephany, C., Duriatti, D., Allaoui, S., Hivet, G., 2012. Mechanical characterisation of flax-based woven fabrics and in situ measurements of tow tensile strain during the shape forming. *J. Compos. Mater.*

Ouagne, P., Soulat, D., Hivet, G., Allaoui, S., Duriatti, D., 2011a. Analysis of defects during the preforming of a woven flax reinforcement. *Adv. Compos. Lett.* 20, 105–108.

Ouagne, P., Soulat, D., Hivet, G., Allaoui, S., Duriatti, D., 2011b. Analysis of defects during the preforming of a woven flax reinforcement. *Adv. Compos. Lett.* 20, 105–108.

P

Padaki, N.V., Alagirusamy, R., Sugun, B.S., 2006. Knitted preforms for composite applications. *J. Ind. Text.* 35, 295–321.

Pandita, S.D., Falconet, D., Verpoest, I., 2002. Impact properties of weft knitted fabric reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.* 62, 1113–1123.

Parnas, R.S., 2000. Liquid composite molding. Hanser ; Hanser Gardner Publications, Munich : Cincinnati.

Peirce, F.T., 1930. The handle of cloth as a measurable quality. *J. Text. Inst.* 21, 377–416.

Peng, X., Cao, J., 2002. A dual homogenization and finite element approach for material characterization of textile composites. *Compos. Part B Eng.* 33, 45 – 56.

- Peng, X.Q., Cao, J., Chen, J., Xue, P., Lussier, D.S., Liu, L., 2004. Experimental and numerical analysis on normalization of picture frame tests for composite materials. *Compos. Sci. Technol.* 64, 11–21.
- Peters, S.T., 2001. *Handbook of composites*. Knovel, Norwich, NY.
- Postle, R., 2002. Structural mechanics of knitted fabrics for apparel and composite materials. *Int. J. Cloth. Sci. Technol.* 14, 257–268.
- Postle, R., Carnaby, G.A., De Jong, S., 1988a. Complex knitting-fabric structures, in: *The Mechanics of Wool Structures*. Ellis Horwood Limited, pp. 274–306.
- Postle, R., Carnaby, G.A., De Jong, S., 1988b. The plain-knitted structure, in: *The Mechanics of Wool Structures*. Ellis Horwood Limited, pp. 227–273.
- Postle, R., Munden, D.L., 1967a. Analysis of the dry relaxed knitted loop configuration - Part I: Two-dimensional analysis. *J Text. Inst* 58, 329–351.
- Postle, R., Munden, D.L., 1967b. Analysis of the dry-relaxed knitted loop configuration - Part II: Three-dimensional analysis. *J Text. Inst* 58, 352–365.
- Potluri, P., Parlak, I., Ramgulam, R., Sagar, T.V., 2006. Analysis of tow deformations in textile preforms subjected to forming forces. *Compos. Sci. Technol.* 66, 297–305.
- Potter, K., 2002. Bias extension measurements on cross-plyed unidirectional prepreg. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 33, 63 – 73.
- Potter, K.D., 1999. Early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 30, 619–621.
- Prodromou, A.G., Chen, J., 1997. On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 28, 491–503.
- Prodromou, A. G., Chen, J., 1997. On the relationship between shear angle and wrinkling of textile composite preforms. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 28, 491 – 503.

R

- Ramakrishna, S., 1997. Characterization and modeling of the tensile properties of plain weft-knit fabric-reinforced composites. *Compos. Sci. Technol.* 57, 1–22.
- Ramakrishna, S., Hamada, H., Cheng, K.B., 1997. Analytical procedure for the prediction of elastic properties of plain knitted fabric-reinforced composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 28, 25–37.

- Ray, S.C., 2012. *Fundamentals and advances in knitting technology*. Woodhead Publishing India Pvt. Ltd., New Delhi; Philadelphia.
- Risicato, J.-V., 2012. *Optimisation de l'architecture des fils dans une structure textile 3D pour le renforcement de pièces composites (Thèse de doctorat)*. Laboratoire de génie et matériaux textiles, GEMTEX, France.
- Rudd, C.D., Kendall, K.N., Mangin, C., Long, A.C., 1997. *Liquid moulding technologies: resin transfer moulding, structural reaction injection moulding and related processing techniques*. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge.
- Rudd, C.D., Owen, M.J., Middleton, V., 1990. Mechanical properties of weft knit glass fibre/polyester laminates. *Compos. Sci. Technol.* 39, 261–277.

S

- Savci, S., Curiskis, J.I., Pailthorpe, M.T., 2000. A study of the deformation of weft-knit preforms for advanced composite structures Part 1: Dry preform properties. *Compos. Sci. Technol.* 60, 1931–1942.
- Savci, S., Curiskis, J.I., Pailthorpe, M.T., 2001. Knittability of Glass Fiber Weft-Knitted Preforms for Composites. *Text. Res. J.* 14–21.
- Sciammarella, C.A., Sciammarella, F.M., Wiley InterScience (Online service), 2012. *Experimental mechanics of solids*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Skordos, A.A., Monroy Aceves, C., Sutcliffe, M.P.F., 2007. A simplified rate dependent model of forming and wrinkling of pre-impregnated woven composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 38, 1318–1330.
- Smith, P., Rudd, C.D., Long, A.C., 1997. The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of aligned reinforcements. *Compos. Sci. Technol.* 57, 327–344.
- Spencer, D.J., 2001. *Knitting technology: a comprehensive handbook and practical guide*. Woodhead, Cambridge.
- STOLL, 2012. *STOLL - Flachstrickmaschinen, CMS Flachstrickmaschinen, CMS, Flat knitting machines, CMS Flat knitting machines - Reutlingen, Deutschland [WWW Document]*. STOLL.
- Süle, G., 2012. Investigation of bending and drape properties of woven fabrics and the effects of fabric constructional parameters and warp tension on these properties. *Text. Res. J.* 82, 810–819.

T

- Taylor, E., 1990. Bring in the reinforcements. *Adv Comp Engng* 17.
- Taylor, J.R., Reynaud, L., Reynaud, P., 1999. *Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques: avec exercices corrigés*. Dunod, Paris.
- Tong, L., 2002. *3D fibre reinforced polymer composites*, 1st ed. Elsevier, Boston.
- Turner, D.Z., Hjelmstad, K.D., 2005. Determining the 3D permeability of fibrous media using the Newton method. *Compos. Part B Eng.* 36, 609–618.

V

- Van Der Ween, F., 1991. Algorithms for draping fabrics on doubly-curved surfaces. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 31, 1415–1426.

W

- Wang, J., Page, J.R., Paton, R., 1998. Experimental investigation of the draping properties of reinforcement fabrics. *Compos. Sci. Technol.* 58, 229 – 237.
- Wang, P., 2010. *Étude numérique et expérimentale de procédé d'élaboration des matériaux composites par infusion de résine*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Wang, P., Hamila, N., Boisse, P., 2013. Thermoforming simulation of multilayer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix. *Compos. Part B Eng.* 52, 127–136.
- Wang, Y., 2002. Mechanical properties of stitched multiaxial fabric reinforced composites from manual layup process. *Appl. Compos. Mater.* 9, 81–97.
- Weisstein, E., 2013. Spherical Coordinates [WWW Document]. MathWorld.
- Willems, a, Lomov, S., Verpoest, I., Vandepitte, D., 2008. Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements. *Compos. Sci. Technol.* 68, 807–819.
- Willems, A., Lomov, S.V., Verpoest, I., Vandepitte, D., 2009. Drape-ability characterization of textile composite reinforcements using digital image correlation. *Opt. Lasers Eng.* 47, 343 – 351.

Wilson, J., 2001. Handbook of textiles design: Principles, processes and practice. CRC Press/Woodhead Pub.

WJ, S., R, P., 1970. THEORETICAL ANALYSIS OF THE PLAIN-KNITTED STRUCTURE. Text. Res. J. 40, 656–665.

Wulfhorst, B., Gries, T., Veit, D., 2006. Textile technology. Hanser Publishers ; Distributed in the USA and in Canada by Hanser Gardner Publications, Munich; Cincinnati, Ohio.

Y

Youssef, M., 2005. Milieux fibreux tissés : modélisation et simulation de la mise en forme des CFRTF à géométrie non développable (Thèse de doctorat en mécanique). Université d'Orléans, Orléans, France.

Yu, W.R., Zampaloni, M., Pourboghrat, F., Chung, K., Kang, T.J., 2005. Analysis of flexible bending behavior of woven preform using non-orthogonal constitutive equation. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 36, 839–850.

Z

Zhu, B., Yu, T.X., Tao, X.M., 2007a. Large deformation and slippage mechanism of plain woven composite in bias extension. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 38, 1821 – 1828.

Zhu, B., Yu, T.X., Tao, X.M., 2007b. An experimental study of in-plane large shear deformation of woven fabric composite. Compos. Sci. Technol. 67, 252 – 261.

Zhu, B., Yu, T.X., Zhang, H., Tao, X.M., 2011. Experimental investigation of formability of commingled woven composite preform in stamping operation. Compos. Part B Eng. 42, 289–295.

Zouari, B., Daniel, J.-L., Boisse, P., 2006. A woven reinforcement forming simulation method. Influence of the shear stiffness. Comput. Struct. 84, 351–363.