Contribution à l'étude du comportement mécanique des carcasses textiles de bandes transporteuses : optimisation de la jonction

Daniel Roessner

▶ **To cite this version:**

Daniel Roessner. Contribution à l'étude du comportement mécanique des carcasses textiles de bandes transporteuses : optimisation de la jonction. Autre. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010. Français. NNT : 2010MULH4553 . tel-01236635

HAL Id: tel-01236635

https://theses.hal.science/tel-01236635

Submitted on 2 Dec 2015

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

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

Année 2010

THESE

Présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Discipline : Mécanique

par

Daniel ROESSNER

CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES CARCASSES TEXTILES DE BANDES TRANSPORTEUSES ; OPTIMISATION DE LA JONCTION

Soutenance le 19 novembre 2010 devant le jury composé de :

Pr. D. SOULAT	Polytech. Orléans	Rapporteur
Pr. J. RENAUD	INSA Strasbourg	Rapporteur
E. MANSOUR	Société Cobra Europe SA	Examinateur
Pr. E. AUBRY	Université de Haute Alsace	Président
Pr. J.-Y. DREAN	Université de Haute Alsace	Directeur de thèse
Dr. J.-F. OSSELIN	Université de Haute Alsace	Co-directeur de thèse
H. MATHIEU	Société Cobra Europe SA	Invité

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord la Région Alsace et la Société Cobra Europe SA, en particulier M. Edgar Mansour, pour leur financement sans lequel ce travail n'aurait pu voir le jour.

Par ailleurs, je tiens à remercier les membres du Jury qui ont pris de leur temps précieux pour porter un regard critique sur mon travail et suggérer de nouvelles pistes de réflexion.

Je remercie également tous les membres de l'ENSISA et du LPMT pour leur gentillesse, leurs conseils et leurs critiques.

J'exprime toute ma reconnaissance à mes directeurs et encadrants de thèse, M. Jean-Yves Drean, M. Jean-François Osselin et M. Hervé Mathieu, pour leur encadrement, leurs conseils, leur disponibilité et la confiance qu'ils m'ont témoignée pendant toute la durée de la thèse.

Je remercie mes collègues de bureau, Nicole, Nabyl, Seydou et Arman pour leur gaieté, leur soutien et leur présence pendant ces thèses que nous avons partagées.

Enfin, mes pensées vont à mes parents, à mes beaux-parents, à Virginie et à mes frères et sœurs qui m'ont soutenu et encouragé pendant ces longues années d'études.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS ..... **III**
TABLE DES MATIERES ..... **IV**
LISTE DES FIGURES ..... **VII**
LISTE DES TABLEAUX ..... **XIII**
GLOSSAIRE ..... **XIV**
INTRODUCTION **1**
CHAPITRE 1 : LA BANDE TRANSPORTEUSE **5**
1. Introduction *6*
2. Composition *7*
2.1. Renfort textile 7
2.2. Le PVC 8
2.3. Le caoutchouc 8
3. Fabrication de la bande *9*
3.1. Tissage 9
3.2. Imprégnation 11
3.3. Calandrage 11
3.4. 11
3.5. Vulcanisation 12
3.6. Acheminement 12
3.7. Assemblage 12
4. Fonctionnement de la bande transporteuse de mine de fond *13*
4.1. Environnement de la bande 13
4.2. Contraintes de fonctionnement 14
5. Conclusion *16*
CHAPITRE 2 : LA JONCTION DES BANDES TRANSPORTEUSES **17**
1. Introduction *18*
2. Jonction chimique *18*
2.1. Jonction par vulcanisation 18
2.2. Jonction par polymérisation 21
3. Jonction mécanique *22*
3.1. Jonction par agrafage 22
3.2. Jonction par vissage 24
4. Solutions technologiques non utilisées *27*
4.1. Soudure 27
4.2. Aiguilletage 27

4.3. Épissure 27
4.4. Harponnage 27
4.5. Velcro mécanique 27
4.6. Spirale 27

5. Conclusion 28

CHAPITRE 3 : COMPREHENSION DU COMPORTEMENT DES JONCTIONS MECANIQUES : ANALYSE EXPERIMENTALE 29

1. Introduction 30

2. Matière complexe 30

2.1. Échelle microscopique 31
2.2. Échelle mésoscopique 31
2.3. Échelle macroscopique 31
2.4. Comportement de la bande transporteuse 31

3. Montage expérimental 33

3.1. Objectifs 33
3.2. Cahier des charges 34
3.3. Description du montage 35
3.4. Principe de jonctionnement avec le montage spécifique 37
3.5. Procédure d'essai avec le montage expérimental 37
3.6. Choix de la matière 38

4. Expérimentation 39

4.1. Plan d'expérimentation 39
4.2. Étapes préliminaires 40
4.3. Tests d'influence 50
4.4. Autres configurations testées 63
4.5. Phénomènes observés 74
4.6. Conclusion 76
4.7. Perspectives 77

5. Photoélasticité 78

5.1. Principe 78
5.2. Objectifs 79
5.3. Étapes préliminaires 79
5.4. Protocole 81
5.5. Étude expérimentale 81
5.6. Conclusion 84
5.7. Perspectives 84

6. Optimisation de la jonction mécanique par agrafage 85

7. Conclusion 86

8. Perspectives 87

CHAPITRE 4 : LA COUTURE 89

1. Introduction 90

2. Couture 90

2.1. Historique 90
2.2. Description 90
2.3. Point de couture 96
2.4. Aiguille 97
2.5. Fil 99
2.6. Échauffement de la couture 99
2.7. Densité de la couture 100

3. Jonctionnement par couture 100

3.1. Étapes préliminaires 101
3.2. Machine à coudre 102
3.3. Forme de l'assemblage 104
3.4. Mode de revêtement 109
3.5. Paramètres de la couture 110
3.6. Conclusion 110

4. Réalisation de la jonction 111

4.1. Protocole 111
4.2. Plan d'expérience 1 114
4.3. Plan d'expérience 2 124
4.4. Essais sur bande complète 134
4.5. Étude du comportement à l'usage 137

5. Conclusion 141

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 143
BIBLIOGRAPHIE 149
REFERENCES INTERNET 153
ANNEXES 155
SOMMAIRE DES ANNEXES 156

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. La bande transporteuse. 7
Figure 1.2. Entrecroisement des fils de chaîne dans le tissu complexe, les fils de trame sont coupés. 7
Figure 1.3. Armure de la carcasse textile. 7
Figure 1.4. Carcasse textile. 7
Figure 1.5. Coupe de la bande transporteuse. 8
Figure 1.6. Processus de fabrication de la bande transporteuse. 9
Figure 1.7. Principe du tissage. 10
Figure 1.8. Schéma simplifié d'une machine à tisser. 10
Figure 1.9. Machine à tisser industrielle. 10
Figure 1.10. Tissage d'un tissu complexe. 11
Figure 1.11. Machine d'imprégnation textile. 11
Figure 1.12. Principe de calandrage. 11
Figure 1.13. Presse de vulcanisation. 12
Figure 1.14. Rouleaux de bande transporteuse. 12
Figure 1.15. Convoyeur à bande. 13
Figure 1.16. Schéma type du circuit de la bande transporteuse sur un convoyeur. 13
Figure 1.17. Description des sollicitations de la bande transporteuse. 14
Figure 2.1. Processus de jonctionnement à chaud. 18
Figure 2.2. Pelage de la bande. 19
Figure 2.3. Découpe des dents. 19
Figure 2.4. Découpe des étages. 19
Figure 2.5. Découpe de la bande multi-plis. 19
Figure 2.6. Étalement de la pâte PVC. 19
Figure 2.7. Pose du caoutchouc cru de réparation. 19
Figure 2.8. Presse de vulcanisation pour jonctionnement. 20
Figure 2.9. Presse industrielle de vulcanisation. 20
Figure 2.10. Progression de la température pour une jonction vulcanisée. 20
Figure 2.11. Processus de jonctionnement à froid. 21
Figure 2.12. Découpe d'une bande multi-plis pour polymérisation. 21
Figure 2.13. Encollage des étages avant polymérisation. 21
Figure 2.14. Moletage de la jonction. 21
Figure 2.15. Processus de jonctionnement par agrafage. 22
Figure 2.16. Découpe droite pour jonction mécanique. 23
Figure 2.17. Pelage du revêtement pour la jonction mécanique. 23
Figure 2.18. Vue de face de la jonction. 23
Figure 2.19. Vue de profil de la jonction. 23
Figure 2.20. Espace au centre des mâchoires pour insertion de l'axe. 23
Figure 2.21. Schéma de la jonction « Super-Screw ». 24
Figure 2.22. Processus de jonctionnement « Super-Screw » 24
Figure 2.23. Jonction « Super-Screw » 24
Figure 2.24. Bandes techniques. 24
Figure 2.25. Découpe en biais. 25

Figure 2.26. Bande transporteuse pelée. 25
Figure 2.27. Pelage avec outil vibrant. 25
Figure 2.28. Pelage par abrasion. 25
Figure 2.29. Pelage par bande à la main. 25
Figure 2.30. Vissage du premier côté. 25
Figure 2.31. Vissage de deuxième côté. 25
Figure 3.1. Composition multi échelle de la bande transporteuse. 30
Figure 3.2. Centre de l'haltère. 31
Figure 3.3. Comportement élastique de la bande transporteuse. 31
Figure 3.4. Comportement filament PET et PA 6.6. 32
Figure 3.5. Jonction avec le système d'agrafage classique. 33
Figure 3.6. Schéma de l'étude. 33
Figure 3.7. Montage expérimental. 35
Figure 3.8. Détails de la grille du montage spécifique d'agrafage. 36
Figure 3.9. Cas de flexion trois points. 36
Figure 3.10. Machine de traction. 37
Figure 3.11. Jonctionnement avec le montage spécifique. 37
Figure 3.12. Montage expérimental. 37
Figure 3.13. Protocole de mise en place d'échantillon. 38
Figure 3.14. Carcasse textile. 38
Figure 3.15. Échantillon de test. 39
Figure 3.16. Démarche d'expérimentation. 39
Figure 3.17. Extrémité de l'outil d'insertion. 40
Figure 3.18. Essai de perforation statique. 40
Figure 3.19. Essai de perforation dynamique. 40
Figure 3.20. Largeur effective de jonctionnement. 41
Figure 3.21. Configuration de jonction n°1. 42
Figure 3.22. Résultats de la configuration de jonction n°1. 42
Figure 3.23. Configuration de jonction n°2. 43
Figure 3.24. Résultats de la configuration de jonction n°2. 43
Figure 3.25. Configuration de l'essai Loi Normale. 44
Figure 3.26. Droite de Henry des valeurs obtenues avec le montage expérimental. 44
Figure 3.27. Allure de la force en fonction du serrage du montage spécifique. 46
Figure 3.28. Schéma de côté du serrage de la carcasse. 46
Figure 3.29. Schéma de serrage de la carcasse. 46
Figure 3.30. Résultats de la comparaison bande complète/carcasse seule. 48
Figure 3.31. Échantillon rompu de la bande complète. 49
Figure 3.32. Influence de l'humidité sur la JTSE. 50
Figure 3.33. Configuration de l'essai pour l'influence de la non-orthogonalité trame/chaîne. 51
Figure 3.34. Détails de l'outil d'insertion des tiges. 52
Figure 3.35. Configuration pour l'influence de la profondeur p des points d'attache. 53
Figure 3.36. JTSE en fonction de la profondeur des points d'attache. 54
Figure 3.37. Configuration pour l'influence du serrage. 55
Figure 3.38. JTSE en fonction du serrage de la jonction. 55
Figure 3.39. Configuration pour l'influence du nombre de tiges. 56
Figure 3.40. Effort transmis en fonction du nombre de tiges. 56

Figure 3.41. JTSE en fonction du nombre de tiges. 57
Figure 3.42. Influence du diamètre des tiges. 58
Figure 3.43. Tiges s'insérant par déformation entre les blocs et la carcasse. 58
Figure 3.44. JTSE en fonction du diamètre des tiges. 59
Figure 3.45. JTSE en fonction de la largeur de l'échantillon. 60
Figure 3.46. Schéma de la distance sans tige à respecter de chaque côté de la rangée. 60
Figure 3.47. Indicateur JTSE pour plusieurs rangées. 63
Figure 3.48. Configuration de l'essai de référence avec 8 tiges sur une rangée. 63
Figure 3.49. Échantillon de référence rompu. 64
Figure 3.50. Courbe de traction de la configuration de référence avec 8 tiges sur une rangée. 64
Figure 3.51. Configuration pour deux rangées de tiges espacées de 20mm. 65
Figure 3.52. Configuration pour deux rangées de tiges espacées de 40mm. 65
Figure 3.53. Résultat de l'échantillon cassé pour un espace de 20mm. 65
Figure 3.54. Résultat de l'échantillon cassé pour un espace de 40mm. 66
Figure 3.55. Courbes en traction des essais avec deux rangées espacées de 20 et 40mm. 66
Figure 3.56. Configuration de deux rangées espacées de 5mm. 67
Figure 3.57. Courbes de traction des essais avec deux rangées espacées de 5mm. 68
Figure 3.58. Échantillon cassé pour deux rangées espacées de 5mm. 68
Figure 3.59. Configuration de trois rangées espacées de 5mm. 69
Figure 3.60. Configuration de quatre rangées espacées de 5mm. 69
Figure 3.61. Courbes de traction pour trois rangées espacées de 5mm. 70
Figure 3.62. Échantillon cassé pour trois rangées espacées de 5mm. 70
Figure 3.63. Échantillon cassé pour quatre rangées espacées de 5mm. 71
Figure 3.64. Configuration de quatre rangées en diagonale. 71
Figure 3.65. Résultats quatre rangées en diagonale. 72
Figure 3.66. Échantillon cassé pour quatre rangées en diagonale. 72
Figure 3.67. Chaîne sectionnée. 74
Figure 3.68. Trame rompue. 74
Figure 3.69. Chaîne rompue. 74
Figure 3.70. Trame peignée. 75
Figure 3.71. Comparaison des phénomènes de rupture de la jonction. 75
Figure 3.72. Tiges d'une même ligne déformée. 76
Figure 3.73. Photoélasticimétrie par transmission. 78
Figure 3.74. Photoélasticimétrie par réflexion. 78
Figure 3.75. Presse. 80
Figure 3.76. Carcasse après passage sous presse. 80
Figure 3.77. Première couche de colle. 81
Figure 3.78. Deuxième couche avec la plaque. 81
Figure 3.79. Montage photoélastique. 81
Figure 3.80. Champ de déformations avec une tige. 82
Figure 3.81. Champ de déformations avec quatre tiges. 83
Figure 3.82. Distance sans tige à respecter de part et d'autre de la rangée. 83
Figure 3.83. Champ de déformations avec huit tiges. 83
Figure 4.1. Bâti de la machine à coudre. 91
Figure 4.2. Éléments mécaniques de la machine à coudre. 91
Figure 4.3. Tête de la machine à coudre. 92

Figure 4.4. Griffes de la machine à coudre. 92
Figure 4.5. Prise de boucle. 93
Figure 4.6. Agrandissement de la boucle. 93
Figure 4.7. Prise du fil de canette par la boucle. 93
Figure 4.8. Retenue de la boucle par l'archet. 94
Figure 4.9. Fin du tour. 94
Figure 4.10. Constituants du crochet rotatif. 94
Figure 4.11. Détails du passage du fil. 95
Figure 4.12. Canette. 95
Figure 4.13. Bloc tension. 95
Figure 4.14. Simple entraînement. 96
Figure 4.15. Double entraînement. 96
Figure 4.16. Triple entraînement 96
Figure 4.17. Point noué. 96
Figure 4.18. Point de chaînette. 97
Figure 4.19. Aiguille à coudre. 98
Figure 4.20. Courbe de force de rupture en fonction de la densité de la couture. 100
Figure 4.21. Vue d'ensemble de la machine Durkopp Adler 204. 102
Figure 4.22. Triple entraînement. 103
Figure 4.23. Commande manuelle de sens de couture. 103
Figure 4.24. Couture de la bande complète. 103
Figure 4.25. Couture de la jonction bout à bout. 104
Figure 4.26. Résultat de l'assemblage bout à bout. 104
Figure 4.27. Comparaison des essais avec l'assemblage bout à bout. 105
Figure 4.28. Couture de l'assemblage avec une dent. 106
Figure 4.29. Résultat de l'assemblage avec une dent. 106
Figure 4.30. Comparaison de l'assemblage avec une dent/carcasse seule. 106
Figure 4.31. Couture de l'assemblage à quatre dents. 107
Figure 4.32. Résultat de l'assemblage à quatre dents. 107
Figure 4.33. Comparaison de l'assemblage avec quatre dents/carcasse seule. 108
Figure 4.34. Cutter rotatif. 108
Figure 4.35. Carcasse découpée avec des dents. 108
Figure 4.36. Revêtement de la jonction cousue. 109
Figure 4.37. Paramètres quantifiables de la jonction cousue. 110
Figure 4.38. Représentation de la jonction par couture. 111
Figure 4.39. Haltère de carcasse en test. 114
Figure 4.40. Haltère de carcasse rompue. 114
Figure 4.41. Courbe de traction de la carcasse seule. 114
Figure 4.42. Exemple d'échantillons du plan d'expériences 1 découpés. 118
Figure 4.43. Échantillons du plan d'expériences 1 cousus. 119
Figure 4.44. Machine de traction hydraulique. 119
Figure 4.45. Traction des échantillons. 120
Figure 4.46. Courbes de traction de la configuration n°4. 121
Figure 4.47. Échantillon découpé de la configuration n°4. 123
Figure 4.48. Échantillon cousu de la configuration n°4. 123
Figure 4.49. Exemple d'échantillons du plan d'expériences 2 découpés. 126

Figure 4.50. Échantillons du plan d'expériences 2cousus. 127
Figure 4.51. Échantillons du plan d'expériences 2 rompus après traction. 128
Figure 4.52. Échantillon rompu au bout des dents. 128
Figure 4.53. Valeur de JTSE en fonction du numéro de l'expérience. 130
Figure 4.54. Courbes des meilleures configurations du plan 2 131
Figure 4.55. Échantillon de l'expérience n°28 découpé. 133
Figure 4.56. Échantillon de l'expérience n°28 cousu. 133
Figure 4.57. Pelage de l'échantillon de bande transporteuse. 134
Figure 4.58. Dents symétriques. 134
Figure 4.59. Dents décalées. 134
Figure 4.60. Échantillons de bande transporteuse cousus. 135
Figure 4.61. Machine de traction de COBRA. 135
Figure 4.62. Jonctions cousues rompues. 136
Figure 4.63. Courbe de traction des jonctions cousues. 136
Figure 4.64. Banc d'essai dynamique 138
Figure 4.65. Échantillons de bande transporteuse en haltère. 138
Figure 4.66. Échantillons de bande transporteuse cousus. 139
Figure 4.67. Couture enrobée de pâte PVC. 139
Figure 4.68. Jonction revêtue de caoutchouc. 139
Figure 4.69. Échantillon jonctionné mécaniquement pour essai sur la banc dynamique. 140
Figure A.1. Bande mono-pli. 158
Figure A.2. Bande multi-plis. 158
Figure A.3. Exemple de bande transporteuse à renfort acier. 159
Figure A.4. Exemples de bandes plates : tri de déchets et convoyage de marchandise. 159
Figure A.5. Exemples de bandes en auge : convoyage de pulpe et convoyage de charbon. 160
Figure A.6. Bande tubulaire. 160
Figure A.7. Armure toile. 161
Figure A.8. Armure sergé. 161
Figure A.9. Armure satin. 161
Figure A.10. Exemple de tissu d'armure toile (a), sergé (b) et satin (c). 162
Figure A.11. Image microscopique d'un tissu toile. 162
Figure A.12. Deux types de fils. 163
Figure A.13. Fils multi-filaments. 163
Figure A.14. Torsion des fils. 164
Figure A.15. Différence entre les fibres naturelles et les filaments : laine/polyamide. 165
Figure A.16. Exemple de fibre naturelle : laine. 165
Figure A.17. Exemple de conditionnement de fibre naturelle : le coton. 166
Figure A.18. Fabrication des fibres synthétiques. 167
Figure A.19. Filières pour filage des fibres synthétiques et filaments respectivement obtenus. 167
Figure A.20. Fabrication de la viscose. 168
Figure A.21. Voies du filage par extrusion. 169
Figure A.22. Dessins de tissus complexes 171
Figure A.23. Rouleaux de bande. 172
Figure A.24. Une seule bobine. 172
Figure A.25. Cassette de deux bobines avec la fin à l'intérieur. 172
Figure A.26. Cassette de bobines enroulées avec la fin à l'extérieur. 172

Figure A.27. Une bande enroulée d'une manière ovale. 172
Figure A.28. Cassettes de bobines avec deux bouts à l'extérieur. 172
Figure A.29. Une bande enroulée pour former quatre bobines 172
Figure A.30. Système de charnière de jonctionnement mécanique. 173
Figure A.31. Charnière plate avec agrafes. 173
Figure A.32. Système de charnière plate avec agrafage. 173
Figure A.33. Charnière plate avec rivets. 174
Figure A.34. Système de charnière plate avec rivetage. 174
Figure A.35. Charnière plate avec vis. 174
Figure A.36. Charnière plate avec crochets. 174
Figure A.37. Charnière à lacets en acier. 175
Figure A.38. Système de charnière à lacets. 175
Figure A.39. Charnière crochets. 175
Figure A.40. Système de charnière à crochets. 175
Figure A.41. Système rigide à rivets. 176
Figure A.42. Plaquettes pour système rigide à vis. 176
Figure A.43. Système rigide à vis. 176
Figure A.44. Charnière plates à agrafes. 177
Figure A.45. Outil d'insertion des agrafes pour jonctionnement mécanique. 177
Figure A.46. Charnière rigide à agrafes. 178
Figure A.47. Éléments d'agrafage lourd avec agrafes en quinconce. 178
Figure A.48. Éléments d'agrafage lourd avec agrafes en ligne. 178
Figure A.49. Charnière avec agrafes en ligne. 178
Figure A.50. Dessin de l'haltère normalisé pour essai de traction 180
Figure A.51. Carte de contrôle et de surveillance. 181
Figure A.52. Interaction angle de couture/ angle de dents. 188
Figure A.53. Interaction angle de couture/ longueur des dents. 188
Figure A.54. Interaction largeur de couture/ angle de couture. 189
Figure A.55. Interaction largeur de couture/longueur des dents. 189

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1. Comparatif des jonctions. 26
Tableau 3.1. Caractéristiques mécaniques de la bande transporteuse à retenir. 32
Tableau 3.2. Influence de la non-perpendicularité trame/chaîne sur la JTSE. 51
Tableau 3.3. Résultats des tests de l'influence du pré-perçage. 52
Tableau 3.4. Récapitulatif des tests effectués. 61
Tableau 3.5. Classement des paramètres en fonction de leur influence sur la JTSE. 62
Tableau 3.6. Récapitulatif des tests avec plusieurs rangées de tiges. 73
Tableau 3.7. Matériaux biréfringents. 79
Tableau 3.8. Essais de l'influence de la largeur de l'échantillon. 85
Tableau 4.1. Avantages et inconvénients des points noué et de chaînette. 97
Tableau 4.2. Comparatif de plusieurs matières de fil. 101
Tableau 4.3. Configuration de l'assemblage bout à bout. 104
Tableau 4.4. Configuration de l'assemblage avec une dent. 105
Tableau 4.5. Paramètres constitutifs des dents. 107
Tableau 4.6. Configuration n°2 de l'assemblage avec quatre dents. 107
Tableau 4.7. Domaine d'expérimentation d'un plan d'expériences. 112
Tableau 4.8. Domaine d'expérimentation du plan d'expériences 1. 115
Tableau 4.9. Matrice d'expériences du plan d'expériences 1 à deux répétitions. 116
Tableau 4.10. Plan d'expériences 1. 116
Tableau 4.11. Schéma de la découpe. 117
Tableau 4.12. Résultats en traction des essais. 120
Tableau 4.13. Influence des paramètres sur la JTSE et représentation graphique des coefficients. 121
Tableau 4.14. Configuration de l'essai n°4. 122
Tableau 4.15. Domaine d'expérimentation du plan d'expériences 2. 124
Tableau 4.16. Matrice en valeur du plan d'expériences 2. 125
Tableau 4.17. Résultats de la traction des jonctions obtenues. 129
Tableau 4.18. Détails de la combinaison 20fils/cm et la longueur de dent de 200mm. 130
Tableau 4.19. Influence des paramètres sur la JTSE et représentation graphique des coefficients. 132
Tableau 4.20. Configuration de l'expérience n°28. 132
Tableau 4.21. Configuration de couture. 134
Tableau 4.22. Configuration de couture. 138
Tableau A. 1. Spécification du renfort textile E-B-P/B 1400/1. 170
Tableau A. 2. Résistance à la traction de différents systèmes d'agrafage 179
Tableau A. 3. Classes des différents points de couture. 182
Tableau A. 4. Différents types de pointes des aiguilles. 184
Tableau A. 5. Caractéristiques des principales fibres. 185
Tableau A. 6. Propriétés techniques de fibres synthétiques. 186
Tableau A. 7. Matrice d'expérience du plan 2. 187

GLOSSAIRE

[1] Aiguilletage : consiste à entremêler plusieurs fibres les unes dans les autres en traversant plusieurs couches d'étoffes à assembler à l'aide d'une ou de plusieurs aiguilles.

[2] Armure : ordre d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame en tissage.

[3] Bande transporteuse : bande mobile pour le transport de marchandises.

[4] Bande mono-pli : bande transporteuse composée d'un seul pli de renfort textile.

[5] Bande multi-plis : bande transporteuse composée de plusieurs plis de renfort textile disposés les uns aux dessus des autres.

[6] Biréfringence : propriété d'un matériau dans lequel la lumière se propage de façon anisotrope, c'est-à-dire d'une manière non homogène : la lumière se divise en plusieurs rayons.

[7] Biréfringence accidentelle : phénomène de biréfringence présent dans des matériaux, normalement non biréfringents, lorsqu'ils sont soumis à des déformations ou des contraintes.

[8] Cadre : élément sur une machine à tisser qui permet de prendre ou de laisser les fils de chaîne.

[9] Carcasse : renfort textile de la bande transporteuse.

[10] Chaîne : nappe de fils disposée dans le sens longitudinal d'un tissu.

[11] Compte : nombre de fils de chaîne contenus dans une dimension donnée de tissu.

[12] Duite : fil déposé par un passage de trame.

[13] Duitage : nombre de trames dans une dimension donnée de tissu.

[14] Imprégnation : opération de dépôt d'une matière spécifique à l'intérieur d'une étoffe afin de lui conférer des caractéristiques particulières.

[15] Étoffe : terme générique pour désigner les surfaces textiles (tissus, tricots…) formées par l'enchevêtrement de matières textiles, ayant une certaine cohésion, et généralement destinées à un usage d'habillement ou d'ameublement.

[16] Fibre : élément de matière textile de faible longueur susceptible d'être filé ou utilisé dans la réalisation de non-tissés.

[17] Fil : élément textile de grande longueur constitué de fibres ou de filaments continus, susceptible d'être tissés ou tricotés.

[18] Foule : sur la machine à tisser, espace créé par la séparation des fils de chaîne dans lequel le fil de trame va être inséré.

[19] Jonction : lien entre deux morceaux de bande transporteuse.

[20] Liquid Crystal Polymer : polymère rigide même à son état liquide. Il est dans un état mésomorphe (entre l'état amorphe et cristallin).

[21] Matelas : rajout de fil de coton en surface du renfort textile de la bande transporteuse pour lui favoriser son imprégnation.

[22] Mine de fond : carrière souterraine d'extraction de minerai.

[23] Mine aérienne : carrière à ciel ouvert d'extraction de minerai.

[24] Peigne : sur une machine à tisser, organe qui permet de tasser la trame et de définir la densité des fils de chaîne.

[25] Photoélasticimétrie : technique expérimentale qui sert à mesurer les contraintes par photoélasticité.

[26] Photoélasticité : en physique, c'est la science qui étudie les effets sur la lumière des contraintes ou déformations appliquées à des corps élastiques.

[27] Renfort textile : renfort en tissu contenu dans une bande transporteuse.

[28] Satin : armure créant une surface constituée de flottés dissimulant les liages pour faire apparaître un effet de surface brillant et lisse.

[29] Sergé : armure présentant en diagonale des côtes et des sillons de largeurs variées.

[30] tex : unité de masse linéique d'un fil valant 1mg/m.

[31] Tissage : ensemble des opérations consistant à entrecroiser des fils pour réaliser des tissus.

[32] Tissu : surface souple formée par l'entrecroisement souvent perpendiculaire de deux ensembles de fils (chaîne et trame), et réalisée sur machine appelée métier ou machine à tisser.

[33] Tissu complexe : tissu composé de plusieurs couches de fils entrecroisés ensemble.

[34] Titre : en textile, c'est la masse linéique d'un fil en tex.

[35] Toile : armure de base des tissus dont le croisement des fils s'opère par moitié, au rapport 2 fils de chaîne et 2 fils de trame.

[36] Trame : en tissage, ensemble des fils perpendiculaires à la chaîne.

[37] Vulcanisation : réaction chimique de polymérisation des élastomères qui augmente le nombre de liaisons entre les macromolécules.

INTRODUCTION

L'homme a toujours eu besoin d'utiliser des récipients pour transporter sa nourriture et ses biens. Il a très vite utilisé des os, des pierres ou de la terre cuite pour se fabriquer des réceptacles. Ces contenants pouvaient avoir une forme et une capacité multiples. On pouvait alors trouver des bols, des bassines, des cuves, des amphores, etc. Par ailleurs, dans le cas d'objets plus encombrants, les contenants devaient être de taille conséquente afin de les transporter. C'est ainsi que des chariots apparurent pour le transport du bois, des pierres ou tout objet ayant un poids ou un encombrement certain.

Le portage répété de marchandise d'un point à un autre était réalisé à l'aide de main d'œuvre. Il a fallu attendre l'année 1878 pour que W. Stanton invente une bande composée de petits bols pour le transport de grains [50] permettant ainsi un transport de la marchandise plus rapide et à main d'œuvre réduite. En 1892, Jesse W. Reno adapta ce système de convoyage pour le transport de personnes [31]. Par la suite, la concurrence croissante a obligé l'industrie à augmenter sa production. C'est pourquoi, elle n'a cessé de développer et d'améliorer les convoyeurs à bande communément appelés « bandes transporteuses » pour le transport des matières solides ou liquides. Nous trouvons ainsi des convoyeurs à bande dans la plupart des industries, car ils permettent un transport de marchandises ou de personnes rapide et à un coût réduit.

Il existe deux types de convoyeurs à bande : les bandes continues et les bandes discontinues. Les bandes continues sont composées de morceaux de bandes mesurant 100 à 300m assemblés pour former une bande de plusieurs kilomètres de longueur. Les bandes discontinues [55] en revanche sont composées d'éléments de faible longueur (quelques cm) assemblés telle une chaîne. La longueur de la bande est proportionnelle au nombre de maillons qui la composent. La longueur du convoyeur à bande dépend exclusivement de son utilisation. Cela peut varier de quelques centaines de mètres à une centaine de kilomètres de long. Dans le cas des mines, il n'y a que quelques dizaines de kilomètres en moyenne de convoyage.

La bande continue est un composite constitué de deux éléments : la partie qui transmet l'effort et celle qui est en contact avec l'extérieur. La partie transmettant l'effort est soit un renfort textile (tissu complexe), soit des câbles d'acier en toron. Le revêtement dépend beaucoup de l'environnement de fonctionnement ainsi que de la marchandise à transporter. Nous pouvons ainsi trouver des bandes résistantes au feu, à l'abrasion, aux chocs, à l'huile, à de fortes températures ou aux conditions spécifiques des mines de fond.

Il y a aujourd'hui plusieurs milliards de tonnes qui transitent ainsi chaque jour dans le monde via un système de convoyage. La vitesse la plus élevée de convoyage est de l'ordre de 15m/s [url 1]. La bande la plus longue est de l'ordre de 17km de long entre l'Inde et le Bangladesh [url 2]. La plus grande série de bandes transporteuses est installée dans le Sahara occidental entre Boukraa et le sud de Laâyoune et mesure 96km [url 3] et transporte du calcaire. La bande la plus résistante a été installée au Chili en 1999 et transmet 8500N/mm [url 4]. Enfin, la capacité de convoyage la plus importante est de 40 000t/h avec une bande 3200mm de largeur et une épaisseur de 45mm [url 5].

Notre intérêt s'est porté sur les bandes transporteuses de mines de fond qui transmettent un effort de l'ordre de 1400N/mm avec une largeur de 1200mm. La bande étudiée est une bande continue avec un renfort textile et une partie souple servant à protéger le renfort textile qui transmet l'effort.

Les bandes transporteuses de mines de fond ont des contraintes particulières de fonctionnement et d'acheminement. En effet, la bande a une longueur de 100 à 300m et est conditionnée en rouleaux de 10 à 20 tonnes en raison des contraintes de manutention et d'acheminement vers les mines. Ces contraintes nécessitent deo jonctionner les morceaux de bandes sur site. Le jonctionnement est obtenu par l'ajout de vis, de renforts ou en découpant des profils de raccord.

Le jonctionnement apporte une souplesse pour la longueur finale de la bande et permet une réparation rapide de la bande. En revanche, la bande transporteuse est rigidifiée à l'endroit de la jonction, ce qui favorise la fatigue de la bande. La jonction est par conséquent considérée comme le point faible du convoyeur. La résistance des jonctions représente dans certains cas 50% seulement de la force de rupture nominale de la bande. La bande transporteuse nécessite par conséquent d'être surdimensionnée à cause de la faible résistance de la jonction. Par ailleurs, il y a une réelle perte d'efficacité dans le fonctionnement de la bande transporteuse, notamment en fatigue. La durée de vie de la bande peut être réduite de moitié en fonction de son utilisation, ce qui pose de réels problèmes en termes de satisfaction des clients.

L'objectif de ce travail est de comprendre les mécanismes de rupture dans la jonction mécanique par agrafage utilisée couramment dans les mines, d'apporter des solutions pour améliorer son efficacité et proposer une nouvelle manière de joindre deux morceaux de bande.

Ce travail est effectué en collaboration avec la société COBRA EUROPE, spécialiste reconnu dans le domaine de la bande transporteuse. Ainsi, l'étude pourra s'appuyer sur les ressources techniques de l'entreprise tant d'un point de vue matériaux que de certains essais spécifiques. L'étude sur la jonction innovante portera sur une jonction mécanique, car ce système est rapide et nécessite moins d'attente avant la remise en route du convoyeur après le jonctionnement établi. La jonction innovante devra prendre en compte le caractère textile du renfort que contient la bande transporteuse et nous pouvons d'ores et déjà dire qu'une solution par couture pourrait être envisageable.

La présentation de ce travail s'articule en plusieurs parties distinctes qui décrivent ainsi les travaux menés.

Nous allons, dans un premier chapitre, examiner en détails la bande transporteuse. Les différents éléments qui la composent seront considérés : le renfort textile, le PVC et le caoutchouc. La fabrication de la bande transporteuse sera détaillée et ses conditions de fonctionnement en mine de fond seront examinées afin de comprendre le contexte de l'étude qui sera menée.

Dans le deuxième chapitre, nous allons décrire les différents types de jonctions utilisées pour assembler les morceaux de bandes dites continues. Les jonctions chimiques et les jonctions mécaniques seront détaillées. Nous pourrons notamment les comparer et apprécier leurs avantages et inconvénients en termes d'efficacité de la jonction, de durée de vie, de la complexité de mise en œuvre, de temps d'arrêt du convoyeur et de coût.

Le chapitre 3 comprend le cœur de la partie expérimentale pour la compréhension du comportement de la jonction mécanique par agrafage. Le chapitre est scindé en deux parties : une étude expérimentale et une observation par photoélasticimétrie.

Dans un premier temps, nous étudierons les différentes échelles de la matière et ses caractéristiques mécaniques. Nous utiliserons un montage expérimental original pour reproduire la jonction mécanique par agrafage. Ce montage permettra de comprendre les mécanismes de rupture de la jonction et le comportement de la jonction. Nous évaluerons l'influence des différents paramètres de la jonction : le serrage de la jonction, la profondeur d'insertion des agrafes, le nombre d'agrafes, le diamètre des agrafes et la largeur de l'échantillon. L'étude sera d'abord limitée à une rangée d'agrafes. Ensuite, des configurations à plusieurs rangées vont être testées. Leur comportement et leur efficacité pourront être observés. Finalement, les différents phénomènes de ruptures seront analysés.

Dans un second temps, une étude par photoélasticimétrie permettra d'avoir un aperçu global du comportement de la matière jonctionnée. Nous étudierons différentes configurations pour observer les gradients de déformations de la matière. Cette étude sera utile pour comprendre les phénomènes de rupture de la jonction mécanique.

Ce troisième chapitre permet de mettre en évidence les différents paramètres essentiels pour garantir une performance raisonnable dans une jonction mécanique afin d'orienter le développement de la nouvelle jonction mécanique dans le chapitre quatre.

Le dernier chapitre présentera un nouveau système de jonctionnement mécanique par couture. La couture a été choisie en raison de sa souplesse et de son faible endommagement du renfort face à la jonction mécanique par agrafage. Par ailleurs, la jonction par couture est cohérente avec le caractère textile du renfort. La couture sera d'abord détaillée afin de comprendre le défi que cette jonction représente. Nous analyserons notamment les éléments propres à la couture : le type de points, le type d'aiguilles et le type de fils.

Ensuite, une étude sera réalisée pour définir les paramètres de la jonction par couture. Un cahier des charges de la jonction cousue sera établi. Le mode d'assemblage, le type de revêtements nécessaire après la couture et les paramètres de la couture devront être définis pour réaliser la jonction par couture.

Nous réaliserons finalement une étude sur la jonction cousue. Nous utiliserons des plans d'expériences pour réduire le nombre des essais et déterminer l'influence des paramètres de la jonction cousue. Le premier plan d'expériences servira à déterminer les paramètres les plus importants sur la jonction. Le deuxième plan nous permettra d'affiner les paramètres pour obtenir une jonction cousue répondant au cahier des charges. Des essais seront menés sur la bande complète et une étude du comportement à l'usage sera réalisée.

Enfin, une conclusion générale présentera une synthèse des travaux réalisés ainsi que les perspectives destinées à compléter les différentes études. Elles concerneront des améliorations à apporter au montage expérimental et l'approfondissement du développement de la jonction cousue.

CHAPITRE 1 : LA BANDE TRANSPORTEUSE

1. Introduction

La bande transporteuse est utilisée dans l'industrie pour l'acheminement de matière ou d'objets. Les domaines d'applications des bandes transporteuses sont les mines, les carrières, l'industrie alimentaire, l'industrie agricole, les supermarchés, etc. Ces nombreuses et diverses applications obligent les fabricants de bandes transporteuses à construire plusieurs types (Annexe 1) de bandes transporteuses. On peut trouver des bandes mono-pli, des bandes multi-plis, des bandes fonctionnant à plat ou en auge et des bandes tubulaires. Cependant, notre étude sera réduite aux bandes de mines de fond de type mono-pli (Annexe 1) résistant à 1400N/mm de largeur de bande.

La bande transporteuse (Figure 1.1) [url 6] est un composite hétérogène avec des propriétés mécaniques qui lui sont propres et qui sont difficiles à déterminer. En effet, le renfort textile qui compose la bande transporteuse est un tissu complexe dont le comportement mécanique est très peu connu. De longs travaux de recherche ont été réalisés pour déterminer le modèle de comportement de la toile. Plusieurs méthodes ont été utilisées : la discrétisation [7], les éléments finis [54], ou l'étude énergétique [49]. D'autres travaux ont été réalisés pour comprendre les phénomènes rencontrés dans les tissus complexes : modèle numérique de préformes pour composites [11] et [6], approche par éléments finis pour l'étude du comportement de tissus pour composites [20], [21], modèle pour la compréhension de la stabilité et du drapage d'une toile [7], modélisation des phénomènes internes dans un tissu [18], modélisation géométrique de tissu 3D [56], modélisation de tissus complexes pour une étude en traction [28], modélisation de composite à renfort 3D [48], modélisation géométrique de tissu 3D [37], etc. Toutefois, il n'existe aujourd'hui aucun logiciel qui permet de modéliser le comportement de tous les types de tissus ; le champ d'application des outils existants est limité à la modélisation géométrique de tissus et tricots (par exemple Texgen). Dans le cas de la bande faisant l'objet de notre étude, il a fallu de puissants outils informatiques et d'importantes ressources matérielles afin d'obtenir la modélisation du comportement du tissu complexe multicouche de la bande transporteuse. Ce travail a été effectué par Benoît PIEZEL [40]. Cependant, la modélisation d'un tissu complexe reste difficile, car les différentes échelles de la matière interagissent ensemble. En effet, le comportement des fils dépend des filaments qui les composent, celui du tissu complexe dépend des fils et de l'armure.

La bande transporteuse est aussi composée de caoutchouc et de PVC, lesquels permettent l'absorption des chocs et protègent la partie textile de l'abrasion. La bande ainsi obtenue peut travailler dans des conditions extrêmement difficiles grâce aux caractéristiques du tissu complexe. En effet, l'allongement de la bande, sa rigidité, sa résistance à la fatigue ainsi que sa résistance à la traction sont des paramètres intrinsèques du renfort textile.

Ce chapitre va permettre de comprendre ce qu'est une bande transporteuse, comment elle est fabriquée et quelles sont les contraintes qu'elle doit supporter.

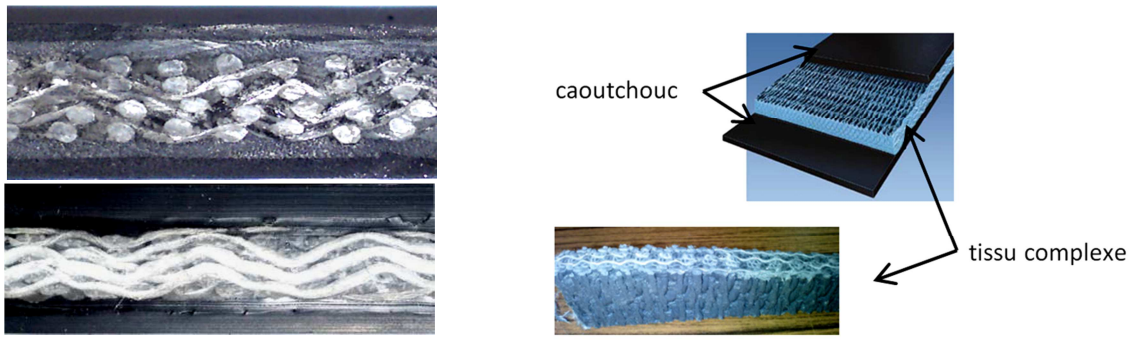

Figure 1.1. La bande transporteuse.

2. Composition

2.1. Renfort textile

Le tissu complexe utilisé est une nappe textile composée de 4 couches de fils de trame entrecroisés par des fils de chaîne (Figure 1.2) [40]. Cette nappe est caractérisée par son armure, motif géométrique élémentaire d'entrecroisement des fils qui est reproduit périodiquement pour former le tissu. Les trois principaux types d'armures sont détaillés en Annexe 2. L'armure de la bande est représentée sur les Figure 1.2 et Figure 1.3. L'armure est formée de fils de chaîne (Figure 1.3 et Figure 1.4) et de fils de trame (Figure 1.3 et Figure 1.4). Les numéros de la Figure 1.3 représentent les fils de chaîne.

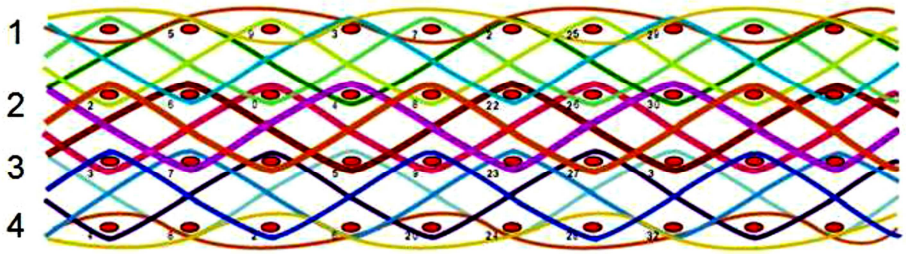

Figure 1.2. Entrecroisement des fils de chaîne dans le tissu complexe, les fils de trame sont coupés.

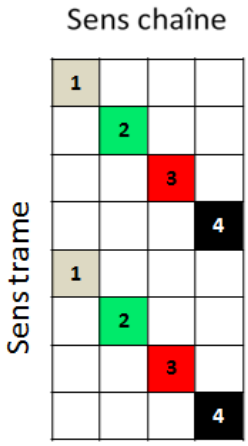

Figure 1.3. Armure de la carcasse textile.

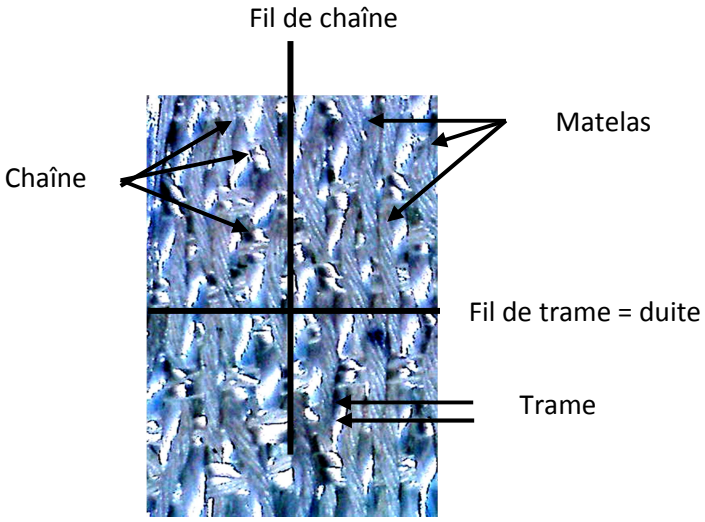

Figure 1.4. Carcasse textile. Chaîne

Les fils de chaîne vont transmettre l'effort principal en traction. Ils sont placés dans le sens axial de la bande (Figure 1.4). Ils sont composés de multi-filaments (Annexe 3) de Polyester (PET) dont les caractéristiques sont mentionnées en Annexe 4.

2.1.1. Trame

Les fils de trame vont permettre le blocage des fils de chaîne. Ils sont placés dans le sens transversal de la bande (Figure 1.4). Ils sont composés de multi-filaments (Annexe 3) de Polyamide 6.6 (PA 6.6) dont les caractéristiques sont présentées en Annexe 4.

2.1.2. Matelas

Des fils composés de fibres de coton ont été insérés au dessus et en dessous du tissu. Ils vont protéger le tissu complexe des impacts, des coupures et des dommages. Ils ne participent pas à la résistance à la rupture de la bande. Les fibres de coton vont également renforcer la cohésion entre la carcasse en PET et l'imprégnation PVC. Ils sont placés en surface de la carcasse textile et forment le matelas (Figure 1.4).

2.2. Le PVC

Le PVC est un polymère amorphe de la famille des thermoplastiques. Le tissu complexe est imprégné de PVC (Figure 1.5) afin de le rigidifier et de lui donner une bonne cohésion. En effet, le tissu complexe n'a aucune tenue après tissage. Le PVC est aussi employé soit pour revêtir le tissu (cas de bandes sans caoutchouc), soit pour faire le lien avec le caoutchouc (cas de bandes avec caoutchouc).

2.3. Le caoutchouc

Un élastomère de type caoutchouc est utilisé pour recouvrir le renfort textile (Figure 1.5) et le protéger de toutes les agressions du milieu de fonctionnement. Il existe un grand nombre de types de caoutchoucs en fonction des contraintes du domaine d'utilisation. Il pourra par exemple résister à la chaleur, à l'huile, à l'abrasion, à la déchirure, aux chocs, etc. Son épaisseur pourra aussi varier suivant les contraintes de fonctionnement. De manière générale, on peut dire que la couche supérieure en contact avec la matière est plus épaisse que l'autre.

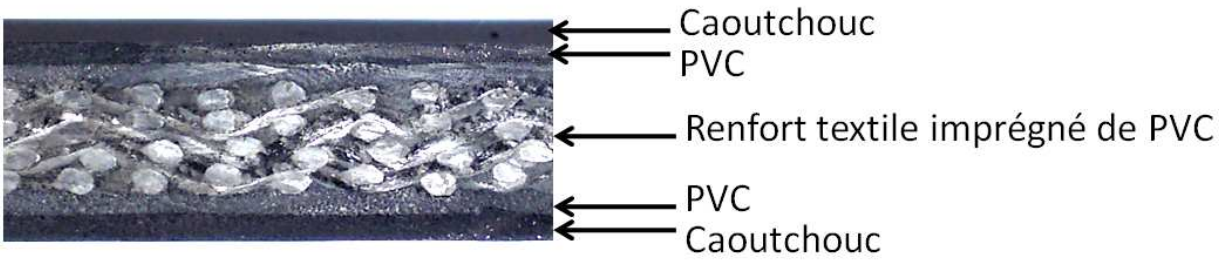

Figure 1.5. Coupe de la bande transporteuse.

3. Fabrication de la bande

Le processus de fabrication de la bande dure plusieurs jours. Il y a d'abord le tissage du renfort textile, puis l'imprégnation de ce dernier et finalement il est recouvert d'un revêtement PVC ou PVC-Nitrile (Figure 1.6). La bande ainsi obtenue va être acheminée pour être assemblée sur site en raison de son poids final.

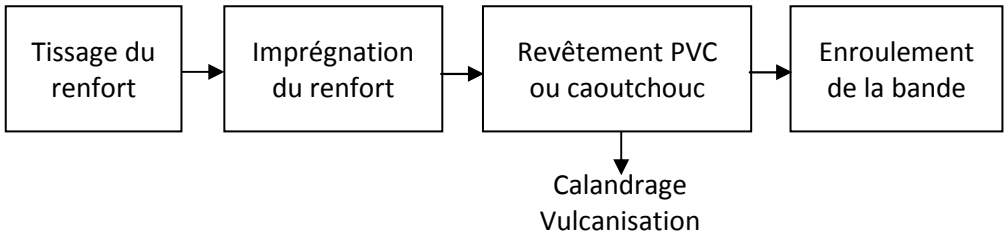

Figure 1.6. Processus de fabrication de la bande transporteuse.

3.1. Tissage

Le tissage d'un tissu consiste à entrecroiser sur une machine à tisser les fils de chaîne et les fils de trame suivant l'armure souhaitée [33]. Le tissage peut être réalisé avec plusieurs types de fils : les fils composés de filaments continus et les fils composés de fibres (Annexe 3).

3.1.1. Matière des fils

La matière des fils (Annexe 4) peut être très diverse suivant l'application finale du tissu. Il existe deux grandes familles de fils : les fils composés de fibres naturelles et ceux composés de fibres chimiques. Les fibres naturelles [url 7] sont des fibres qui sont issues des animaux ou des végétaux. Ces fibres peuvent être utilisées dans des applications techniques [4], [29] comme dans l'habillement [10], [51]. Les fibres chimiques [42] dont font partie les fibres synthétiques sont celles qui sont fabriquées à l'aide de la chimie. Elles sont obtenues par polymérisation de monomères spécifiques et sont fabriquées pour obtenir des propriétés techniques particulières. Dans les matériaux composites tels que la bande transporteuse, on va privilégier l'utilisation de fils composés de multi-filaments d'origine chimique pour la transmission de l'effort, car ils ont de meilleures propriétés mécaniques [22]. Dans notre cas, les fils sont en PET, PA 6.6 et coton pour le matelassage, mais d'autres matières techniques peuvent être utilisées pour la même application telles que les aramides.

3.1.2. Machine à tisser

La machine à tisser est une machine sur laquelle les fils de trame sont insérés entre les fils de chaîne alignés sur une ensouple afin de créer le tissu (Figure 1.7). Son principe consiste à lever ou baisser les fils de chaîne avec les cadres (Figure 1.8) et faire passer le vecteur qui tire le fil de trame dans la foule ainsi obtenue [1]. Le peigne (Figure 1.8) va venir plaquer le fil de trame inséré contre le tissu déjà formé. Le tissu se forme en répétant cette opération. Pour un tissu plus complexe comme dans notre cas, certains des fils des 4 couches de fils vont être levés et d'autres baissés afin d'y insérer le fil de trame, mais le même principe reste le même. Une machine à tisser industrielle qui tisse un tissu complexe est présentée sur la Figure 1.9 [url 8].

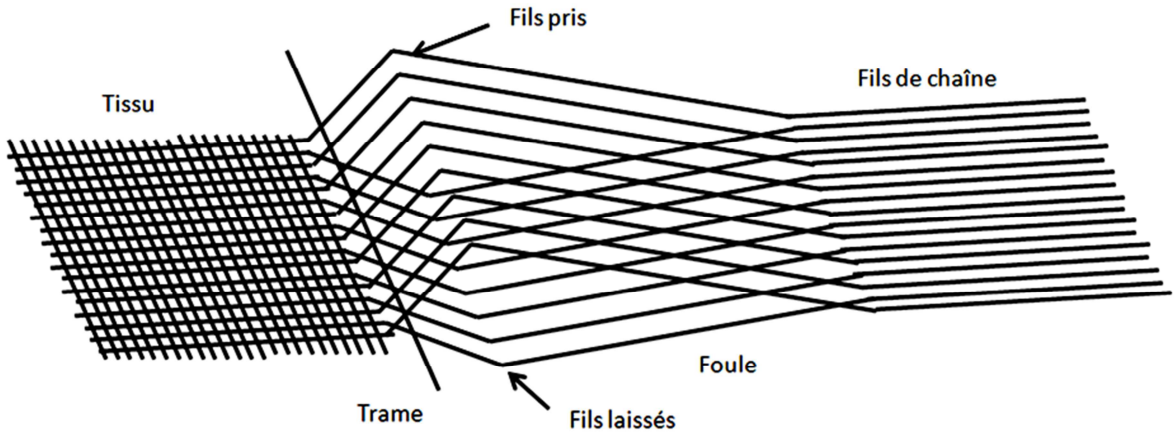

Figure 1.7. Principe du tissage.

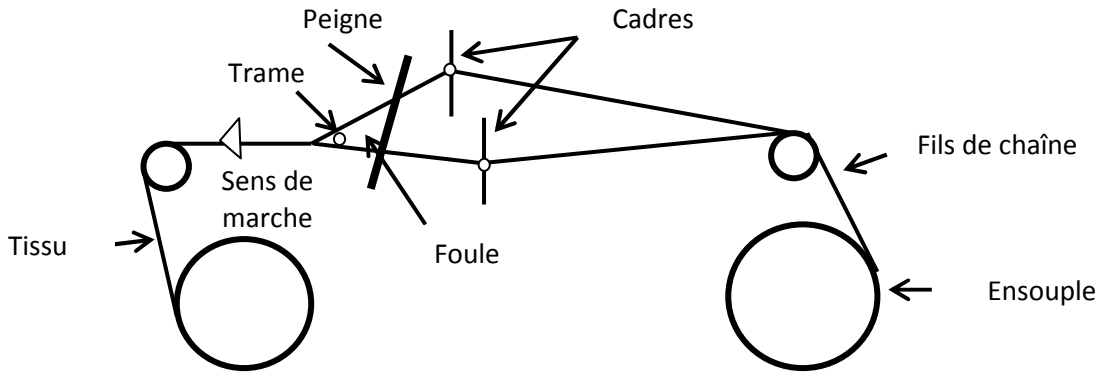

Figure 1.8. Schéma simplifié d'une machine à tisser.

Figure 1.9. Machine à tisser industrielle.

3.1.3. Les tissus complexes

Les tissus complexes sont composés de plusieurs couches de fils de chaîne entrecroisés avec des fils de trame (Figure 1.10) [9], [32] (cela peut être l'inverse). Il existe autant de configurations de tissus complexes que d'armures possibles [46], [38]. Cependant, on parle de tissus complexes lorsque le nombre de couches est supérieur ou égal à 2. Plusieurs formes de tissus complexes sont décrites en Annexe 6.

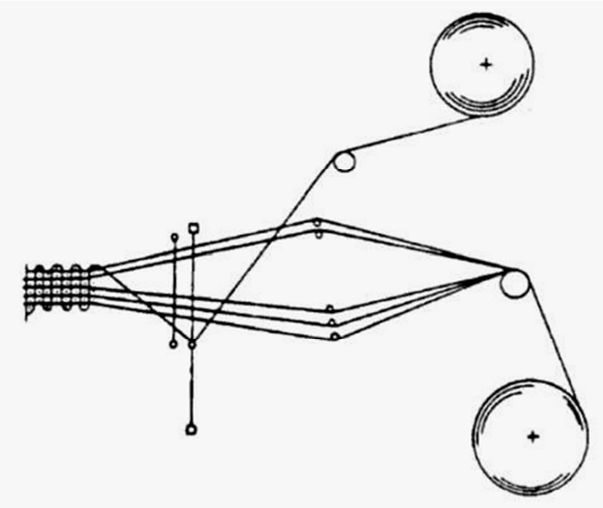

Figure 1.10. Tissage d'un tissu complexe.

3.2. Imprégnation

Figure 1.11. Machine d'imprégnation textile.

L'imprégnation d'un tissu (Figure 1.11) [url 9] peut être effectuée par contact avec des rouleaux, par trempage ou par raclage [47], [24], [45]. L'imprégnation va permettre au tissu complexe d'obtenir une tenue et une cohésion optimales, dans le but d'avoir un comportement dynamique correspondant à son utilisation finale. L'imprégnation PVC va aussi permettre une bonne adhésion du revêtement de la bande transporteuse lors du calandrage et de la vulcanisation.

3.3. Calandrage

3.4.

Le calandrage (Figure 1.12) est une étape pendant laquelle le caoutchouc présenté en feuille calibrée est assemblé par pression avec le tissu imprégné avant d'être vulcanisé.

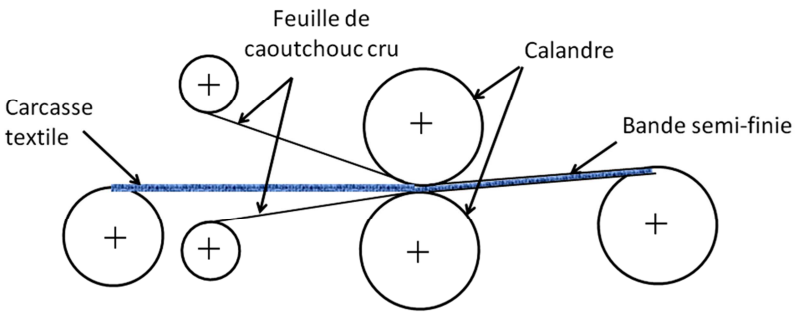

Figure 1.12. Principe de calandrage.

3.5. Vulcanisation

Après calandrage, le caoutchouc est cru et sa cohésion est assurée grâce à des liaisons faibles. Il est peu utilisable dans cet état. Il faut créer des ponts (liaisons fortes) entre les macromolécules pour assurer les propriétés mécaniques souhaitées. Afin de créer ces ponts, on utilise du souffre ou des peroxydes [39], [15]. Ces liaisons fortes apparaissent par pression et par chauffage de la matière. Cette opération chimique est appelée vulcanisation (Figure 1.13). On dit aussi que la bande nécessite une « cuisson ».

Le cycle de chauffe et de refroidissement doit être contrôlé afin d'obtenir une vulcanisation homogène de la matière et les propriétés mécaniques souhaitées.

Figure 1.13. Presse de vulcanisation.

3.6. Acheminement

Figure 1.14. Rouleaux de bande transporteuse.

La bande en sortie de presse est conditionnée en rouleaux (Figure 1.14). Elle est transportée sur palette pour être acheminée jusqu'aux sites du client. Il existe plusieurs manières d'enrouler les bandes transporteuses en fonction de la longueur de la bande et de la situation du site du client (Annexe 7).

3.7. Assemblage

Les tronçons de bande acheminés sur le site du client vont être assemblés pour former une bande allant jusqu'à plusieurs kilomètres de longueur. On va les assembler en faisant une jonction. Il existe plusieurs types de jonctions : les jonctions chimiques et les jonctions mécaniques. Elles seront détaillées dans le chapitre 2.

4. Fonctionnement de la bande transporteuse de mine de fond

Les conditions de fonctionnement des bandes transporteuses sont très variables suivant leur domaine d'utilisation. En effet, une industrie alimentaire et une mine de charbon n'auront pas du tout la même influence sur la bande. Seront détaillés ici les éléments qui environnent la bande dans les mines et les sollicitations qui en découlent.

4.1. Environnement de la bande

4.1.1. Convoyeur

Figure 1.15. Convoyeur à bande.

Le convoyeur est le système qui supporte la bande transporteuse. Il peut être assimilé à un châssis sur lequel la bande va se déplacer. Il est composé d'une structure métallique et de rouleaux espacés tous les 1,5m. Le convoyeur doit supporter tout le poids de la bande ainsi que la charge de marchandise transportée. Le convoyeur est représenté sur la Figure 1.15 [url 8].

4.1.2. Tambours

Les tambours sont de grands rouleaux qui vont imposer un changement de direction à la bande. Ils vont également permettre l'entraînement de la bande en rotation grâce à de puissants moteurs. Un schéma représentant un circuit d'une bande transporteuse est exposé sur la Figure 1.16 [url 8]. Les tambours A et I sont les tambours de tête et représentent le début et la fin du convoyage. Les tambours B, C et F représentent des tambours de tension. Le tambour G est statique et sert de référence pour la réserve de bande gérée grâce au tambour H. La bande est entraînée grâce aux moteurs D et E.

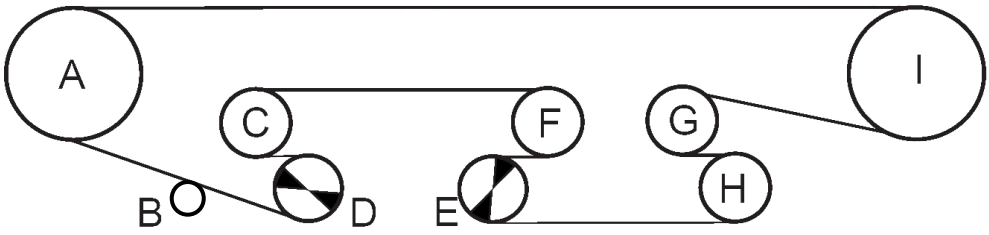

Figure 1.16. Schéma type du circuit de la bande transporteuse sur un convoyeur.

4.1.3. Matière transportée

Dans les mines, la bande est utilisée pour le transport de charbon, de minerai ou de matière pondéreuse. La matière va jouer un rôle dans le choix du type de revêtements et son épaisseur.

4.1.4. Racleurs

Les racleurs sont utilisés pour racler la bande après déchargement de la matière transportée.

4.2. Contraintes de fonctionnement

Les contraintes de fonctionnement des bandes transporteuses des mines de fond peuvent être classées en deux catégories : les sollicitations mécaniques et les contraintes environnementales. Les contraintes de fonctionnement de la bande sont extrêmement importantes dans le problème du jonctionnement, car la partie jonctionnée est souvent plus rigide que la bande, donc moins encline à endurer les sollicitations mécaniques imposées à la bande.

4.2.1. Sollicitations mécaniques

4.2.1.1. Traction

Comme décrit sur la Figure 1.16, la bande transporteuse réalise des cycles de rotation suivant les trajectoires imposées par les tambours. Cependant, ce fonctionnement nécessite que la bande soit sous une tension représentant 10% de sa traction nominale, donc 140N/mm de largeur. Cette sollicitation a pour conséquence un allongement de l'ordre de 1 à 2% sur la bande en fonctionnement. De plus, la bande subit un allongement supplémentaire de 1 à 1,5% appelé allongement permanent après ses premières heures d'utilisation. La traction de la bande est représentée sur la Figure 1.17. Cette tension initiale va intervenir dans le dimensionnement du tissu complexe, car c'est ce dernier qui doit transmettre l'effort.

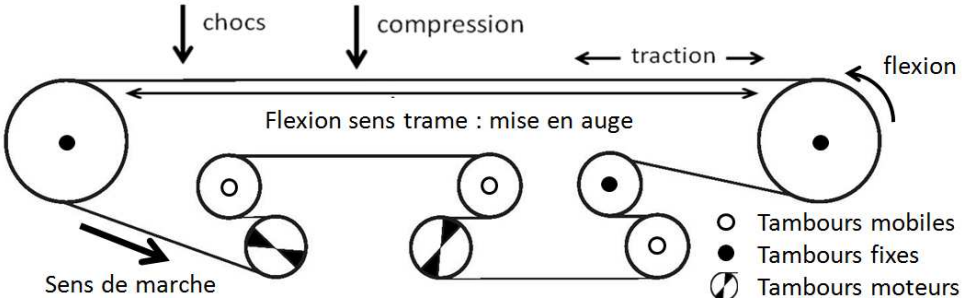

Figure 1.17. Description des sollicitations de la bande transporteuse.

4.2.1.2. Flexion sens chaîne

La flexion dans le sens de la chaîne est due au passage sur les tambours. Cette flexion est présente sur les bandes fonctionnant à plat ou en auge (Annexe 1). Le diamètre de tambour couramment utilisé dans le cas d'une bande 1400N/mm est de 400mm. Le passage sur ces tambours s'effectue plusieurs fois par cycle et environ toutes les 250s (Figure 1.17). Cette sollicitation sera prise en compte pour concevoir les jonctions mécaniques et pour dimensionner le tissu complexe.

4.2.1.3. Flexion sens trame

La flexion dans le sens de la trame ou de la bande est présente lorsque la bande fonctionne en auge ou dans le cas d'une bande transporteuse tubulaire (Annexe 1). Cette sollicitation interviendra dans la conception des jonctions mécaniques et dans celui du tissu complexe. (Figure 1.17)

4.2.1.4. Compression

La compression de la bande est provoquée par la matière que cette dernière transporte. Elle va dépendre du poids, de la granulométrie et de la quantité de matière transportée. (Figure 1.17)

4.2.1.5. Chocs

Les chocs sont provoqués principalement par le chargement vertical de la marchandise. Ces chocs sont extrêmement contraignants pour la bande transporteuse car s'ils sont trop importants, ils peuvent provoquer des déchirures de la bande et une détérioration du renfort. (Figure 1.17)

4.2.1.6. Usure

L'usure concerne principalement le revêtement : la marchandise ne doit pas être en contact avec le tissu complexe, seul garant de la résistance de la bande. L'usure est provoquée par le transport de la marchandise qui va éroder le caoutchouc. Cependant elle peut également être provoquée par les tambours et les racleurs de nettoyage. Dans le cas où le renfort est visible, une réparation importante est possible pour recouvrir le renfort.

4.2.2. Conditions environnementales

Les contraintes imposées par l'environnement sont nombreuses, mais dépendent directement de l'application finale de la bande. Dans le cas des mines de fond, la bande transporteuse fonctionne dans une atmosphère potentiellement explosive du fait des poussières et gaz inflammables. Ces contraintes de fonctionnement concernent principalement le revêtement de la bande. Elles peuvent être différentes suivant les pays d'utilisation, car les normes de sécurité diffèrent d'un pays à l'autre.

4.2.2.1. Antistatique

Cette propriété est nécessaire au transport de produits inflammables. Elle oblige les fabricants ainsi que les clients à faire très attention dans le choix des matériaux utilisés pour le convoyeur mais aussi pour le revêtement de la bande.

4.2.2.2. Température

La température est une contrainte, surtout dans les mines de fond, car elle est en moyenne de 50°C au fond des mines (le PVC ramollit à partir de 65°C).

4.2.2.3. Feu

La résistance au feu est normalisée pour l'utilisation en mine de fond, mais les normes ne sont pas les mêmes suivant les pays.

5. Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser les différents composants de la bande transporteuse, son mode de fabrication ainsi que ses conditions de fonctionnement. Nous avons pu constater que la bande est un élément complexe. Elle est composée d'une partie textile qui transmet les efforts et d'une partie souple en PVC ou en un composite PVC-caoutchouc qui sert à protéger le renfort textile des chocs ainsi que de l'abrasion produits par la marchandise transportée.

L'analyse de la fabrication de la bande nous a permis d'apprécier les différentes étapes de la fabrication. Nous avons notamment pu découvrir les différents paramètres qui rentrent en considération pour le tissage du renfort textile et considérer les étapes de la fabrication de la bande transporteuse.

Par ailleurs, nous avons examiné les conditions de fonctionnement de la bande transporteuse. Nous avons d'une part étudié l'environnement de la bande qui nous a permis de comprendre les conditions dans lesquelles la bande doit fonctionner. Nous avons d'autre part examiné les contraintes de fonctionnement de la bande. Les différentes contraintes environnementales (résistance au feu, à la température et la propriété d'antistatisme) définissent principalement les caractéristiques du revêtement de la bande. En revanche, les chocs que la bande doit subir, la traction, les flexions et la compression sollicitent sévèrement le renfort de la bande transporteuse. Nous avons pu conclure que les sollicitations mécaniques et les conditions environnementales imposées à la bande font d'elle un composite à haute performance.

En outre, le conditionnement et l'acheminement des bandes transporteuses jusqu'aux mines induisent la découpe des morceaux de bandes fabriqués en usine, limitant leur longueur à 300m. Il s'en suit un assemblage des différents morceaux de bandes sur le site final de l'utilisateur. Cet assemblage, appelé jonction, fragilise considérablement la bande sans fin obtenue, ce qui implique de nombreux problèmes de longévité et de résistance du produit. Le prochain chapitre présente les différents types de jonctions existants et leurs avantages et inconvénients.

CHAPITRE 2 : LA JONCTION DES BANDES TRANSPORTEUSES

1. Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la bande est un composite à haute performance dont les conditions de fonctionnement peuvent être extrêmement sévères. Par ailleurs, la fabrication du renfort textile doit être minutieuse afin de garantir une performance optimale du produit final.

Pour favoriser l'acheminement, la bande conditionnée sur rouleau ne mesure pas plus de 300m. Elle est alors jonctionnée afin de créer une bande de plusieurs kilomètres de long. Ce jonctionnement apporte beaucoup de problèmes pour le fonctionnement et la durée de vie de la bande. En effet, le renfort textile de la bande est fragilisé lors du jonctionnement, quel que soit le type de jonctions. Par conséquent, le jonctionnement est le point critique de la bande transporteuse. Les fabricants de bandes transporteuses veulent limiter au maximum cet endommagement, car les bandes nécessitent d'être surdimensionnées pour palier la faible résistance de la jonction par rapport à la résistance nominale de la bande.

Il existe plusieurs types de jonctions pour bandes transporteuses, mais ils peuvent être classés en deux familles : la jonction chimique et la jonction mécanique. Chacune d'elles offrent des avantages en termes de mise en œuvre, de longévité ou de résistance à la traction. Ce chapitre va permettre de comprendre les différences entre tous les types de jonctions.

2. Jonction chimique

2.1. Jonction par vulcanisation

La vulcanisation est un procédé décrit dans le chapitre 1 au point 3.5 p. 12. La jonction par vulcanisation consiste à réaliser des dents sur le renfort après quoi il est revêtu à nouveau avec du caoutchouc cru. La vulcanisation sert alors à cuire le caoutchouc et à donner à la jonction un aspect lisse et net. On appelle cette jonction la jonction à chaud. Elle peut être réalisée sur une bande mono-pli ou multi-plis.

2.1.1. Description

La jonction par vulcanisation comporte plusieurs étapes essentielles à la réussite de cette jonction. Ces étapes sont le pelage du revêtement, la découpe du renfort textile, la préparation et la vulcanisation (Figure 2.1). Ces étapes sont décrites dans des méthodes constructeur afin d'assurer la reproductibilité de la jonction. Des normes existent pour des cas spécifiques.

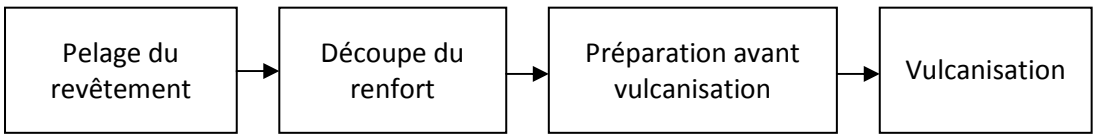

Figure 2.1. Processus de jonctionnement à chaud.

2.1.1.1. Pelage

Le pelage du revêtement caoutchouc ou PVC est nécessaire pour mettre à nu le renfort textile (Figure 2.2) [35]. Le pelage est réalisé avec des outils coupants ou vibrants avec ou sans chauffage de la matière. Le chauffage jusqu'à 70°C permet le ramollissement de la couche de PVC.

Figure 2.2. Pelage de la bande.

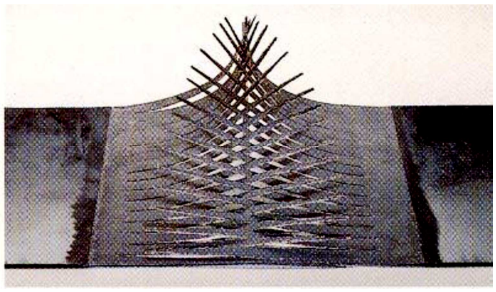

Figure 2.3. Découpe des dents.

2.1.1.2. Découpe

Dans le cas d'une bande mono-pli, le renfort textile est découpée en dents de scie afin d'accroître la surface de contact entre les deux morceaux de bandes (Figure 2.3) [url 8], [url 18]. Les dents mesurent environ 1,2m de longueur et peuvent atteindre jusqu'à 2m de long suivant le type de la bandes.

Dans le cas d'une bande multi-plis (Annexe 1), la bande est découpée sous forme étagée afin de multiplier la surface de contact (Figure 2.4 [35] et Figure 2.5). La longueur totale de la jonction peut atteindre 1,40m de longueur dans le cas de 5 plis.

Figure 2.4. Découpe des étages.

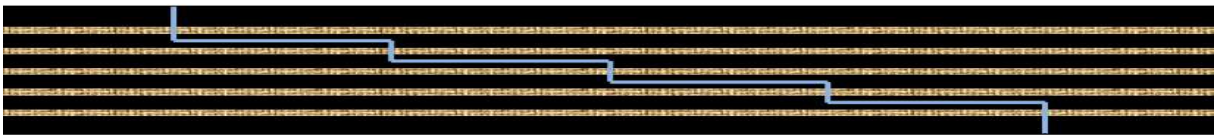

Figure 2.5. Découpe de la bande multi-plis.

2.1.1.3. Préparation

Après avoir découpé les dents, de la pâte PVC est insérée entre les dents et un tissu technique est posé sur les deux faces de la bande (Figure 2.6) [34]. Du caoutchouc non cuit est ensuite posé sur la bande (Figure 2.7) [34].

Figure 2.6. Étalement de la pâte PVC.

Figure 2.7. Pose du caoutchouc cru de réparation.

2.1.1.4. Vulcanisation

La vulcanisation [44] donne à l'ensemble une bonne cohésion et de bonnes caractéristiques mécaniques. La vulcanisation est faite grâce à une presse spécifique permettant le contrôle de la température (Figure 2.8 [34], [url 14] et Figure 2.9). Le cycle de chauffe et de refroidissement est représenté sur la Figure 2.10 [34].

Figure 2.8. Presse de vulcanisation pour jonctionnement.

Figure 2.9. Presse industrielle de vulcanisation.

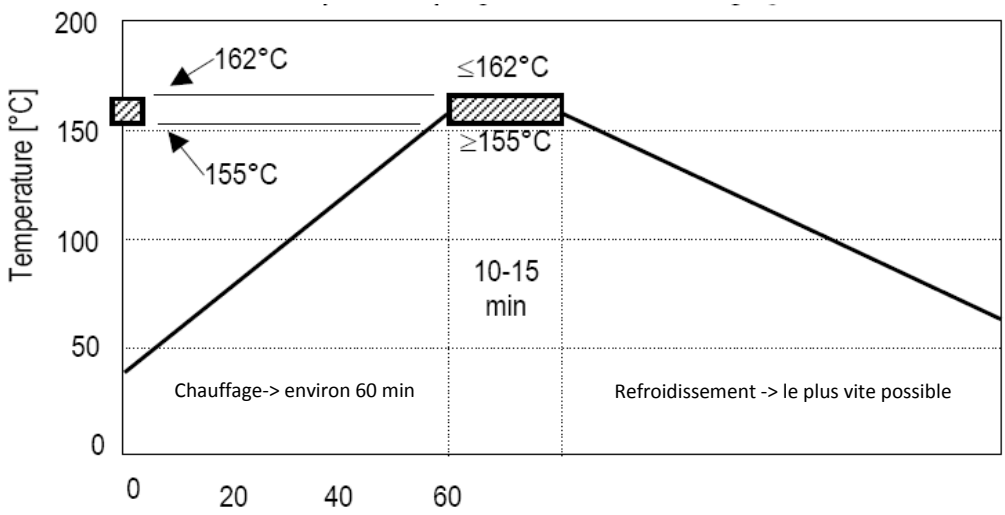

Figure 2.10. Progression de la température pour une jonction vulcanisée.

2.1.2. Avantages et inconvénients

Les avantages et inconvénients de cette jonction sont présentés dans la colonne A du Tableau 2.1 p. 26. Les principaux avantages sont sa résistance à la traction, sa durée de vie et sa faible rigidité.

En revanche, ses inconvénients sont le temps d'arrêt de la bande, son prix, l'importance du facteur humain dans la réussite de la jonction et la quantité importante de matériel nécessaire à la jonction.

2.2. Jonction par polymérisation

La jonction par polymérisation est une jonction par collage. On utilise une colle à froid qui polymérise en 4 à 6h. Cette jonction est utilisée dans le cas des bandes transporteuses à renfort multi-plis (Annexe 1).

2.2.1. Description

La position des différents plis de renfort est utilisée pour en faire des étages. La longueur de ces étages est variable en fonction du nombre de plis et du type de bandes. La longueur de la jonction peut néanmoins atteindre 1400mm.

La jonction suit aussi plusieurs étapes : la découpe des différents étages, l'encollage, le moletage et la polymérisation (Figure 2.11).

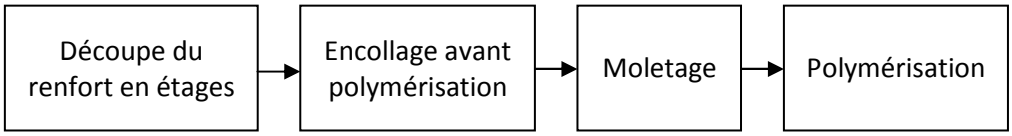

Figure 2.11. Processus de jonctionnement à froid.

2.2.1.1. Découpe

La découpe se fait entre les plis de la bande et en créneau pour avoir une grande surface de contact avec la colle. [35]

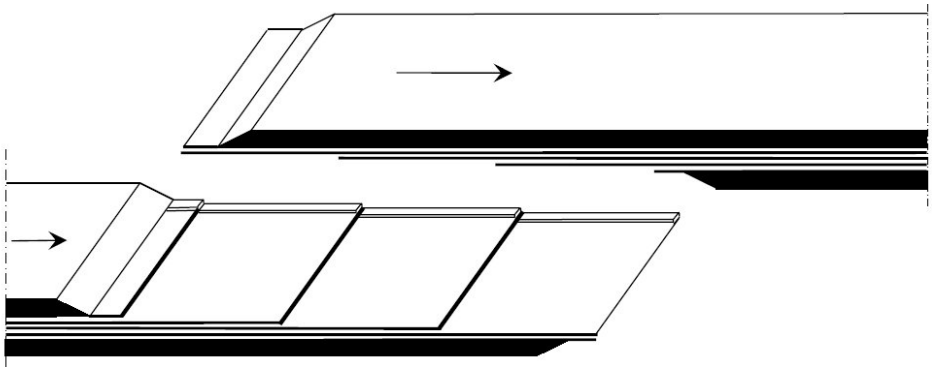

Figure 2.12. Découpe d'une bande multi-plis pour polymérisation.

2.2.1.2. Encollage

L'encollage consiste à mettre de la colle entre les deux morceaux de bande [35].

Figure 2.13. Encollage des étages avant polymérisation.

Figure 2.14. Moletage de la jonction.

2.2.1.3. Moletage et polymérisation

Les deux parties sont assemblées et on applique une molette pour chasser l'air. Ceci favorise la polymérisation de la colle et permet d'obtenir une épaisseur homogène de la bande à l'endroit de la jonction. Le moletage est essentiel pour la réussite de la jonction (Figure 2.14) [35].

2.2.1. Avantages et inconvénients

Les avantages et inconvénients sont présentés dans la colonne B du Tableau 2.1 p. 26. Les principaux avantages de la jonction sont sa résistance à la traction, sa durée de vie et sa faible rigidité.

Ses inconvénients sont le temps d'arrêt du convoyeur, son prix, l'importance du facteur humain dans la réussite de la jonction et la faible température d'utilisation, car la jonction ne supporte pas une température supérieure à 60°C.

3. Jonction mécanique

La jonction mécanique est caractérisée par l'ajout de pièces mécaniques pour effectuer la jonction. Ces pièces peuvent être des agrafes, des inserts, des vis, des rivets … La jonction est par conséquent obtenue indirectement entre les renforts des deux morceaux à joindre. Ce type de jonctions est très utilisé pour des bandes de faible largeur et transmettant de faibles efforts. Seront traités dans cette partie seulement les jonctionnements par agrafage et par vissage.

3.1. Jonction par agrafage

Le jonctionnement par agrafage [52], [53] est très utilisé si une réparation rapide de la bande transporteuse est nécessaire, car c'est un système simple qui est plus rapide que les jonctions chimiques. Il doit sa rapidité à l'absence de découpe complexe, de chauffage et de l'utilisation d'une presse. Ce jonctionnement peut être utilisé dans le cas de bandes de 6 à 18mm d'épaisseur.

3.1.1. Description

Il faut en premier lieu couper les deux morceaux à joindre, ensuite enlever le revêtement sur une faible longueur, puis insérer les agrafes, et enfin assembler les deux morceaux en insérant l'axe métallique (Annexe 8). Il existe plusieurs types de jonctions mécaniques par agrafage (Annexe 8).

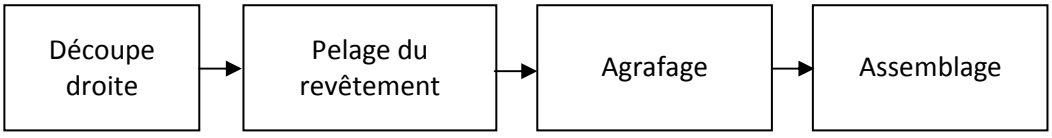

Figure 2.15. Processus de jonctionnement par agrafage.

3.1.1.1. Découpe

La découpe est très simple dans les jonctions mécaniques. Elle consiste à couper les deux bouts de bande perpendiculairement au sens longitudinal de la bande (Figure 2.16).

Figure 2.16. Découpe droite pour jonction mécanique.

3.1.1.2. Pelage du revêtement

Le pelage du revêtement est identique à celui décrit pour le jonctionnement par vulcanisation. Il consiste à enlever le revêtement du renfort afin d'éviter d'avoir une surépaisseur trop importante au passage sur les tambours et les racleurs (Figure 2.17). L'épaisseur libérée sera occupée par les charnières d'agrafage.

Figure 2.17. Pelage du revêtement pour la jonction mécanique.

3.1.1.3. Agrafage

L'agrafage consiste à placer les mâchoires sur les bouts dévêtus et d'insérer les agrafes. L'insertion des agrafes s'effectue par force. Plusieurs solutions peuvent être utilisées : un marteau, un outil pneumatique ou un outil hydraulique. Il existe un grand nombre de systèmes d'agrafage qui sont décrits en Annexe 8.

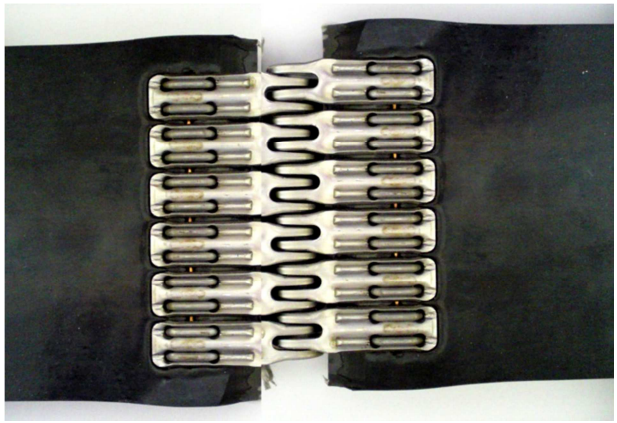

Figure 2.18. Vue de face de la jonction.

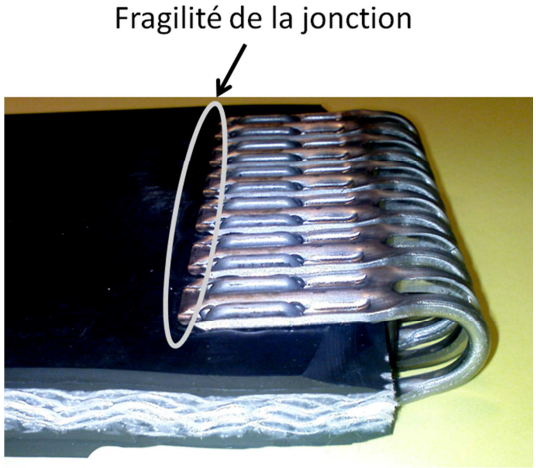

Figure 2.19. Vue de profil de la jonction.

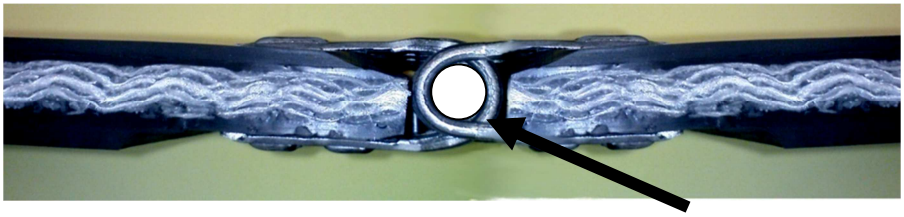

Figure 2.20. Espace au centre des mâchoires pour insertion de l'axe.

3.1.1.4. Assemblage

La jonction de deux morceaux de bande est obtenue par l'insertion de l'axe central dans l'espace entre les griffes des mâchoires (Figure 2.20).

3.1.2. Avantages et inconvénients

Les avantages et inconvénients de cette jonction sont présentés dans la colonne C du Tableau 2.1 p. 26. Les principaux avantages sont le faible temps de préparation, le temps d'arrêt réduit du convoyeur, la faible influence du facteur humain et son faible coût.

Cependant, ses inconvénients sont sa résistance à la traction, sa durée de vie et sa très grande rigidité.

3.2. Jonction par vissage

La jonction par vissage est une jonction mécanique particulière qui, en raison de ses nombreux avantages, mérite d'être détaillée.

3.2.1. Description

La jonction par vissage est appelée « Super-Screw » (Figure 2.21 et Figure 2.23 [url 15]). C'est une jonction brevetée qui consiste à ajouter un morceau de bande technique au-dessus et au-dessous des deux morceaux à joindre. Les bandes techniques (Figure 2.24 [url 15]) sont formées de caoutchouc et d'un renfort mono-pli ou multi-plis en textile haute performance comme de l'aramide. Ces bandes sont fixées avec des vis auto-taraudeuses. Le nombre de vis peut aller de 110 à 240 par jonction. Ce jonctionnement contient plusieurs étapes qui sont présentées sur la Figure 2.22. On peut utiliser ce type de jonctions sur des bandes de 3,5 à 20,5mm d'épaisseur. Elle peut transmettre un effort jusqu'à 2500N/mm.

Figure 2.21. Schéma de la jonction « Super-Screw ».

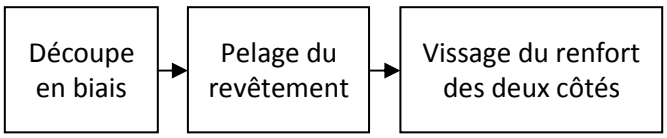

Figure 2.22. Processus de jonctionnement « Super-Screw ».

Figure 2.23. Jonction « Super-Screw ».

Figure 2.24. Bandes techniques.

3.2.1.1. Découpe

La découpe de la bande est la première étape du jonctionnement. Il est conseillé de découper la bande en biais, pour favoriser le passage sur les tambours et sous les racleurs (Figure 2.25) [url 10].

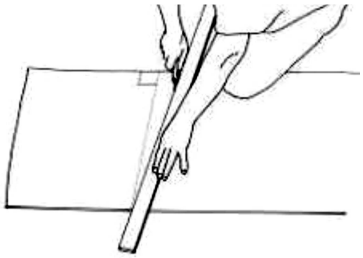

Figure 2.25. Découpe en biais.

3.2.1.2. Pelage du revêtement

Afin d'éviter une surépaisseur de la bande avec l'ajout de ces bandes techniques, il s'agit de peler la partie mâle (Figure 2.26) qui accueillera les bandes techniques. Il existe plusieurs manières pour peler le revêtement : l'usage d'un outil vibrant (Figure 2.27 [url 10]), l'abrasion par rotation (Figure 2.28 [35]) et la découpe de bandes au cutter (Figure 2.29 [url 10]).

Figure 2.26. Bande transporteuse pelée.

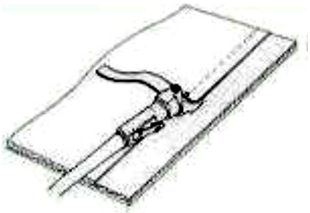

Figure 2.27. Pelage avec outil vibrant.

Figure 2.28. Pelage par abrasion.

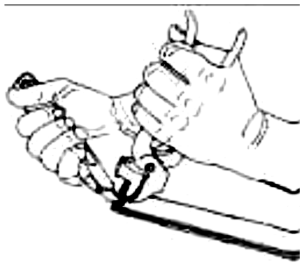

Figure 2.29. Pelage par bande à la main.

3.2.1.3. Vissage du renfort

Dans un premier temps, il s'agit de visser le renfort sur le premier bout de bande à joindre (Figure 2.30 [url 10]).

Dans un second temps, il s'agit de mettre bout à bout les deux morceaux à joindre. Enfin, le vissage du renfort doit être effectué sur le côté qui vient d'être rabouté (Figure 2.31 [url 10]).

Figure 2.30. Vissage du premier côté.

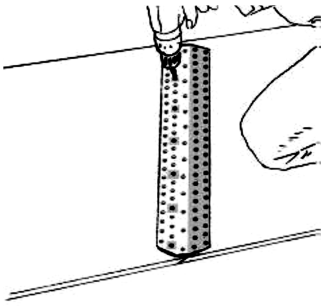

Figure 2.31. Vissage de deuxième côté.

3.2.2. Avantages et inconvénients

Les avantages et inconvénients de cette jonction sont présentés dans la colonne D du Tableau 2.1 p. 26.

Les principaux avantages de la jonction sont le faible temps de préparation, le temps d'arrêt réduit du convoyeur et la faible influence du facteur humain.

En revanche, le principal inconvénient de cette jonction est son prix très élevé.

Tableau 2.1. Comparatif des jonctions.

	A	B	C	D
	Jonction vulcanisée	Jonction polymérisée	Jonction agrafée	Jonction vissée
Matériel nécessaire	Encombrant - -	Réduit +	Réduit +	Réduit +
Environnement particulier	Sans poussière -	Néant +	Néant +	Néant +
Temps de préparation	4-8h - -	4-8h - -	1h +	1h +
Attente pour démarrage de la bande après jonctionnement	1-3h -	4-6h - -	Non +	Non +
Arrêt du convoyeur	12-24h - -	12-16h +/-	4-6h +	4-6h +
Facteur humain sur la réussite de la jonction	Élevé -	Élevé -	Négligeable +	Négligeable +
Utilisation zone explosive	Difficile -	Facile +	Facile +	Facile +
Surépaisseur	Non +	Non +	Oui -	Non +
T°C maximale de fonctionnement	130°C +	60°C -	130°C +	130°C +
Démontage possible de la jonction ?	Non +/-	Non +/-	Oui +/-	Non +/-
Résistance à la traction par rapport à la bande seule	75% +	75% +	60% -	75% +
Durée de vie	2-5 ans +	2-4ans +	0,5-2ans -	1-2ans +/-
Rigidité de la jonction par rapport à la bande seule	Très faible +	Très faible +	Très élevée - -	Moyenne +/-
Étanchéité de la matière	Parfaite +	Parfaite +	Moyenne -	Parfaite +
Coût	Très élevé - -	Élevé -	Faible +	Très élevé - -

4. Solutions technologiques non utilisées

4.1. Soudure

La soudure ne convient pas dans ce domaine, car il faudrait souder les filaments l'un après l'autre dans chaque fil que comprend le renfort textile. Cela serait bien trop long et trop difficile à mettre en œuvre (il y a plusieurs dizaines de milliers de filaments par fil).

4.2. Aiguilletage

L'aiguilletage est utilisé dans l'assemblage de non-tissé. Il consiste à entremêler plusieurs fibres les unes dans les autres en traversant plusieurs couches d'étoffes à assembler. Dans le cas des bandes transporteuses, ce procédé n'est pas adapté, car les efforts à transmettre sont bien trop importants.

4.3. Épissure

L'épissure semble apporter des avantages en termes de résistance et de fatigue. Cependant, afin de créer une épissure, il faudrait détisser le renfort qui est rigide car imprégné de PVC, ensuite tisser avec l'autre bout détissé au préalable. Ce jonctionnement semble impossible.

4.4. Harponnage

Le harponnage consisterait à insérer des inserts sous forme de harpon à l'intérieur des renforts des bouts à joindre. Ce jonctionnement pose le problème du retour. En effet, le retour jusqu'à la tenue des harpons dans le renfort engendrerait un espace entre les deux bouts à joindre donc la jonction ne serait pas étanche, ce qui pose des problèmes pour certaines matières.

4.5. Velcro mécanique

Le velcro mécanique serait un jonctionnement par blocage de fibres dans d'autres. Le problème dans ce cas réside dans l'effort transmis par ce système, la résistance à la fatigue ainsi que l'assemblage des parties velcro sur les deux bouts de bandes transporteuses à joindre.

4.6. Spirale

La spirale consiste à insérer une spirale métallique entre les deux bouts pour former comme un cahier ouvert. Le problème réside dans la mise en place d'un tel système et dans la résistance à la traction de cette spirale. L'inconvénient serait aussi le manque d'étanchéité d'un tel système.

5. Conclusion

Le jonctionnement des bandes transporteuses est un problème complexe. Les contraintes de fonctionnement ainsi que les contraintes de mise en œuvre sont la préoccupation majeure d'un usage à long terme d'une bande transporteuse dans une mine de fond.

Nous avons vu dans ce chapitre qu'il existe les jonctions chimiques et les jonctions mécaniques. Elles se différencient par leur mode d'exécution. Dans le cas des jonctions chimiques, la transmission des efforts est effectuée via des voies chimiques, tandis que dans le cas des jonctions mécaniques, elle est obtenue à l'aide de pièces mécaniques qui ont été ajoutées.

Nous avons pu constater que les jonctions chimiques offrent de meilleurs résultats en fatigue et en résistance à la traction. Cependant, elles nécessitent beaucoup de temps pour être mises en place. Leur durée de vie est de l'ordre de deux à cinq ans. Les jonctions mécaniques quant à elles nécessitent moins de temps pour être effectuées, mais ont une durée de vie raccourcie. Nous pouvons néanmoins différencier la jonction mécanique par agrafage dont la résistance est plus faible que les jonctions chimiques et la jonction « Super-Screw » qui concurrence les jonctions chimiques en termes de résistance.

Malgré les progrès apportés au jonctionnement, le type de jonctionnements utilisé reste le choix du client en fonction de son budget et de ses besoins (rapidité ou longévité).

Dans le but de développer une nouvelle jonction mécanique, il s'agit d'abord de comprendre les phénomènes de rupture de la jonction mécanique et déterminer quels sont les paramètres essentiels d'une jonction mécanique fiable. Pour ce faire, nous présenterons dans le chapitre trois un montage expérimental reproduisant la jonction mécanique par agrafage qui nous permettra d'évaluer l'influence des paramètres de la jonction, de comprendre les phénomènes de rupture de la jonction et ainsi bien préparer le développement de la jonction innovante.

CHAPITRE 3 : COMPREHENSION DU COMPORTEMENT DES JONCTIONS MECANIQUES : ANALYSE EXPERIMENTALE

1. Introduction

Comme évoqué dans le chapitre deux, la bande transporteuse arrive chez le client par morceaux enroulés de 300m maximum. Ces morceaux sont ensuite assemblés par jonction pour former une bande sans fin. Cependant, la jonction endommage la bande transporteuse et diminue la durée de vie de cette dernière. Afin de comprendre les phénomènes de rupture des jonctions et d'améliorer les jonctions, on se propose d'en étudier le comportement. Étant donné le grand nombre de jonctions différentes, l'étude sera réduite à la jonction mécanique par agrafage, la plus utilisée dans le cas des mines de fond sur les bandes de 1200mm de largeur.

Parmi les jonctions mécaniques par agrafage, les systèmes d'agrafages sont nombreux et se différencient en fonction de la charge à transmettre, l'épaisseur de la bande et l'application de la bande. Les différences entre ces systèmes d'agrafage existants se distinguent au niveau de la taille des agrafes, du nombre des agrafes, de leur positionnement et du serrage appliqué sur la jonction. Pour étudier correctement le comportement de la jonction mécanique par agrafage et déterminer quelle est l'influence des différents paramètres de la jonction, il serait nécessaire de tester en traction une jonction avec chaque type de système d'agrafage et d'en analyser les dissemblances. Cette démarche ne nous permet malheureusement pas de comparer l'influence des paramètres, mais uniquement la résistance à la rupture de la jonction. Il est donc nécessaire de concevoir un montage spécifique permettant de faire varier les différents paramètres séparément et d'en étudier l'influence.

Nous allons d'abord examiner les différentes échelles de la matière. Ensuite, nous allons utiliser un montage spécifique original reproduisant la jonction mécanique par agrafage pour déterminer quelle est l'influence des différents paramètres de la jonction sur l'efficacité de cette dernière. Une étude par photoélasticimétrie complétera ce travail. Il faut toutefois prendre en compte la complexité de la matière à ses différentes échelles, c'est pourquoi, pendant l'étude, nous nous limiterons à une seule constitution de bande.

2. Matière complexe

L'étude du comportement de la bande transporteuse est difficile parce que la matière est complexe. Effectivement, ses composants interagissent à des échelles différentes. Sur la Figure 3.1, les différents éléments de la bande transporteuse sont présentés avec leur échelle respective.

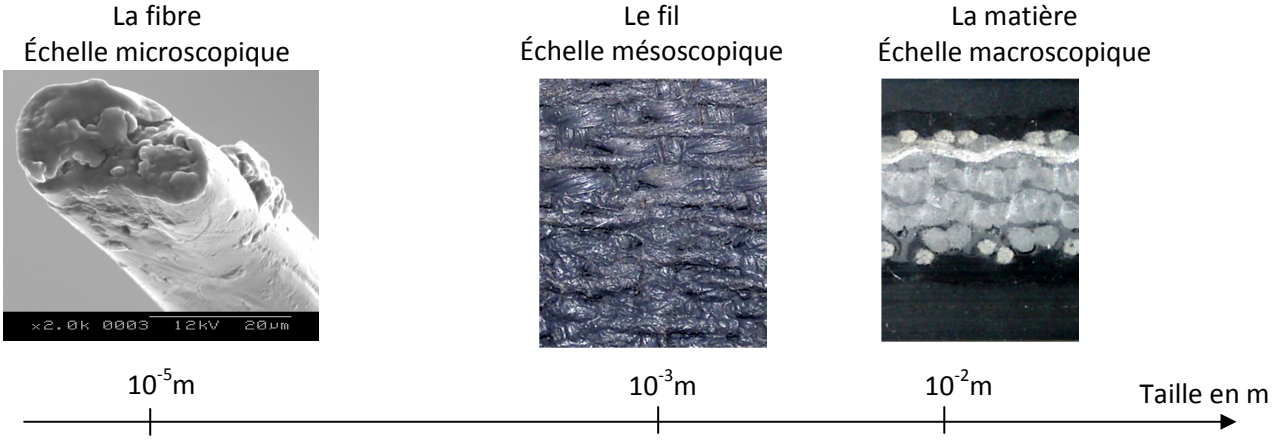

Figure 3.1. Composition multi échelle de la bande transporteuse.

2.1. Échelle microscopique

L'échelle microscopique correspond à l'échelle des filaments (Figure 3.1) qui composent un fil. Cette échelle va de un à une centaine de micromètres. Les filaments ont une taille de l'ordre de 25 micromètres. À cette échelle, les caractéristiques suivantes du filament peuvent être considérées: allongement, force à rupture, élasticité, compressibilité, matière, taille, etc. Il est important de relever qu'un fil comprend souvent plusieurs milliers de filaments.

2.2. Échelle mésoscopique

L'échelle mésoscopique correspond à l'échelle du fil (Figure 3.1). Elle va de 100 micromètres à quelques millimètres. À cette échelle, les caractéristiques suivantes du fil peuvent être considérées : le titre du fil, la torsion, le nombre de filaments, l'imprégnation de PVC, le glissement et le frottement inter-filaments, etc. Le comportement du fil dépendra également des propriétés des filaments qui le composent.

2.3. Échelle macroscopique

L'échelle macroscopique correspond à l'échelle de la bande entière (Figure 3.1). Elle va de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres. À cette échelle, on considère les différents éléments qui composent la bande : l'épaisseur de la carcasse, l'armure de la carcasse, le type de PVC de liaison, le type de caoutchoucs et les dimensions de la bande.

2.4. Comportement de la bande transporteuse

Le comportement élastique à l'échelle de la bande transporteuse, soit macroscopique, est évalué avec des essais de traction monotone dans le sens chaîne et le sens trame. Ce test permet de déterminer le module d'élasticité, la résistance à rupture, la déformation à rupture ainsi que le comportement élastique de la matière. Sur la Figure 3.3 [40], le graphique présente la contrainte nominale appliquée à l'éprouvette en fonction de la déformation nominale.

Les éprouvettes sont découpées au jet d'eau en haltère normalisée présentée en Annexe 10. Les dimensions importantes sont celles au centre de l'éprouvette (Figure 3.2), soit 40 sur 25mm.

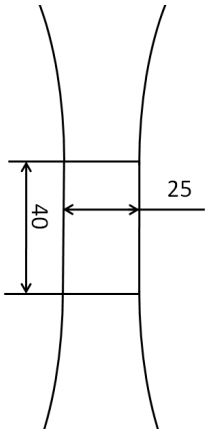

Figure 3.2. Centre de l'haltère.

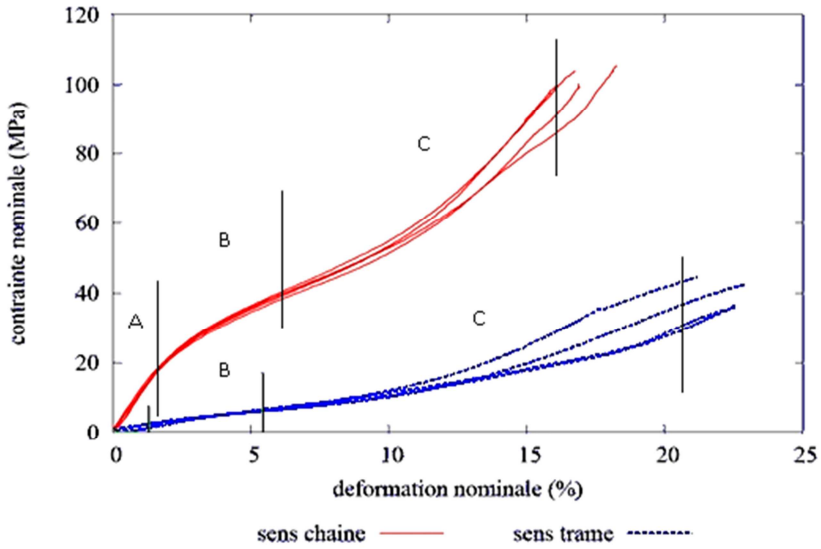

Figure 3.3. Comportement élastique de la bande transporteuse.

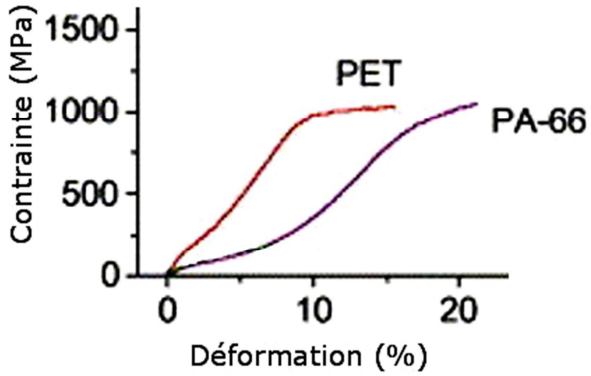

Figure 3.4. Comportement filament PET et PA 6.6.

En observant le graphique sur la Figure 3.3, on peut voir qu'il y a un domaine élastique (A), un domaine visqueux (B) et un domaine plastique (C). Le domaine visqueux caractérise un « écoulement » de la matière avec une diminution du module de Young tandis que la plastification traduit un durcissement de la matière avec un module de Young qui augmente. Cependant, en général, les domaines B et C n'en forment qu'un, appelé domaine visco-élasto-plastique. On peut également noter la forte anisotropie du matériau, car la chaîne et la trame n'ont pas la même matière. En comparaison, on peut voir sur la Figure 3.4 [12] les comportements des fils de PET et PA 6.6 seuls, respectivement les principaux composants de la chaîne et de la trame. Nous pouvons ainsi considérer l'influence du comportement des filaments sur le comportement final de la bande transporteuse.

Les principales caractéristiques de la bande transporteuse à retenir sont décrites dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Caractéristiques mécaniques de la bande transporteuse à retenir.

Dimensions 14×25mm	Chaîne	Trame
Module de Young (MPa)	1100	160
Résistance à la traction nominale (MPa) (N/mm de largeur)	100 1400	40 560
Déformation à rupture (%)	17	22
Résistance à la fin de la zone A (MPa)	18	3
Déformation à la fin de la zone A (%)	2	1,2
Résistance à la fin de la zone B (MPa)	40	7
Déformation à la fin de la zone B (%)	6	5,5
Résistance à la fin de la zone C (MPa)	100	40
Déformation à la fin de la zone C (%)	17	22

3. Montage expérimental

3.1. Objectifs

Les jonctions mécaniques par agrafage peuvent être définies par plusieurs paramètres (Figure 3.5 et Figure 3.6) : le nombre d'agrafe (n), la position par rapport au bord (p), l'espace entre deux agrafes (e), le serrage de la matière (s) et leur diamètre (d). En étudiant les différentes configurations existantes chez plusieurs fabricants (Annexe 9), on se rend compte que ces paramètres ont une influence sur la résistance à la traction de la jonction.

Afin de comprendre les phénomènes de rupture, le comportement du renfort en fonction des différents paramètres et l'influence de ces paramètres, il est nécessaire de concevoir un montage qui permet de faire varier indépendamment ces paramètres tout en mesurant l'effort transmis avant de rompre.

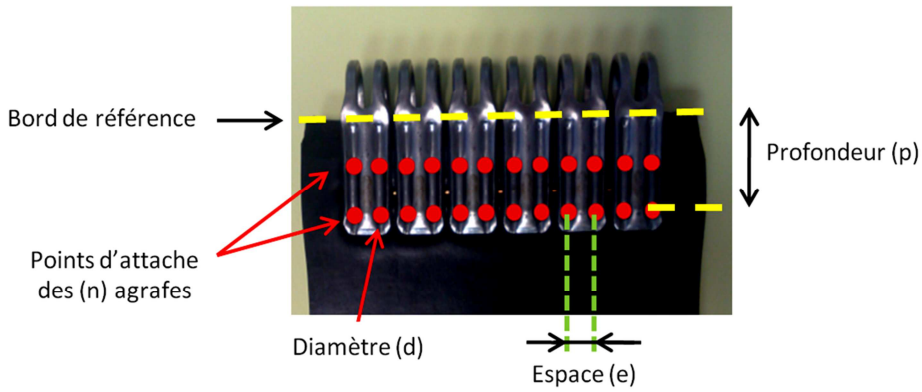

Figure 3.5. Jonction avec le système d'agrafage classique.

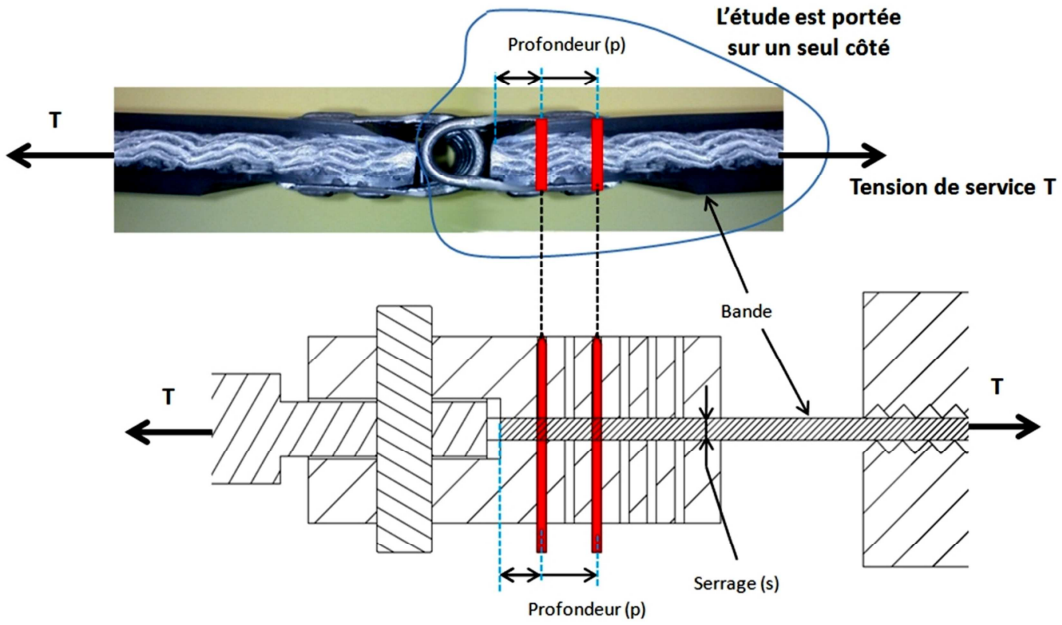

Figure 3.6. Schéma de l'étude.

3.2. Cahier des charges

Le cahier des charges a été réalisé d'après les jonctions existantes et suivant la matière que nous allons tester.

3.2.1. Jonctions existantes

Les jonctions existantes (Annexe 9) nous permettent de définir la profondeur (p) d'insertion des agrafes, leur nombre (n), leur diamètre ainsi que l'espace (e) entre chaque d'elles. Les intervalles d'étude sont définis comme suit :

- Le diamètre (d) des agrafes utilisées doit être compris entre 2 et 3mm.
- La profondeur (p) d'insertion des agrafes par rapport au bord doit pouvoir être modifiée de 5 à 65mm.
- L'espace (e) entre deux agrafes est fixé à 7,5mm (espace moyen entre les agrafes).
- Le nombre (n) des agrafes doit pouvoir être modifié.

3.2.2. Matière utilisée

La matière utilisée nous impose des dimensions pour les échantillons. En effet, le motif élémentaire de l'armure de la bande transporteuse 1400N/mm mesure 21mm dans le sens de la chaîne et 7mm dans celui de la trame.

Afin de pouvoir négliger les effets de bord, la largeur doit être supérieure à cinq fois la largeur du motif élémentaire de l'armure du tissu complexe. La largeur maximale est limitée par l'effort maximal admissible par la machine de traction, soit 100kN.

De plus, la longueur active minimale de l'échantillon doit correspondre à cinq fois la longueur du motif élémentaire de l'armure. La longueur totale de l'échantillon devra comporter la longueur active plus les longueurs nécessaires aux pinces qui tiendront la matière.

En ce qui concerne l'épaisseur de la matière, nous nous sommes basés sur les dimensions de la bande transporteuse : 8-9mm d'épaisseur pour la carcasse textile et 11mm pour la bande complète. Nous testerons des échantillons de carcasse et de bande complète.

Nous obtenons par conséquent les intervalles d'étude suivants :

- La largeur de la bande devra aller de 35mm à 100mm.
- Le montage expérimental devra être conçu pour résister à 100kN.
- L'épaisseur de la bande définie par le serrage (s) devra être de 6 à 16mm.
- La longueur de l'échantillon est fixée à 250mm (230mm minimum).

3.2.3. Caractéristiques du montage

Les autres caractéristiques que doit avoir le montage sont les suivantes :

- Le montage doit pouvoir être compatible à une atmosphère de 65%HR (atmosphère normalisée pour les essais textiles)
- Le montage doit être léger pour favoriser le montage et démontage de ce dernier.

3.3. Description du montage

Le montage expérimental comporte plusieurs parties : un montage spécifique d'agrafage (1) et une pince (2) (Figure 3.7). Le montage spécifique d'agrafage est le moyen qui va être utilisé pour étudier le comportement de la jonction mécanique par agrafage.

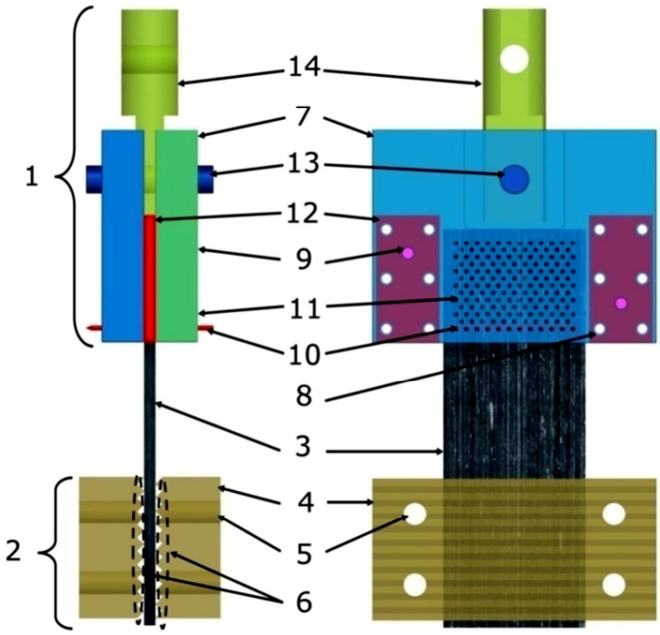

Figure 3.7. Montage expérimental.

3.3.1. Vue d'ensemble

Sur la Figure 3.7, on peut voir les deux ensembles qui composent le montage expérimental. La pince (2) et le montage spécifique (1) sont les deux parties du montage qui permettront de tester l'échantillon (3).

3.3.2. Pince inférieure

La pince inférieure (2) est composée de deux mors en acier (4) serrés ensemble par des vis (5). Les deux mors maintiennent l'échantillon grâce à des dents usinées sur leur face intérieure (6). Ce système permet un montage/démontage simple et rapide. L'inconvénient de ce système est que le serrage est statique. Dans le cas d'une matière très déformable, il peut arriver que cette dernière glisse des mors pendant l'essai, car la traction fait diminuer l'épaisseur de la matière. Un système plus performant aurait été un système de serrage hydraulique.

3.3.3. Montage spécifique d'agrafage

Le montage spécifique a comme indice (1) sur la Figure 3.7.

Les deux pièces maîtresses du montage spécifique sont les blocs (7). Ces deux blocs sont usinés dans un alliage d'aluminium à haute résistance mécanique appelé FORTAL qui permet un usinage facile et un poids divisé par trois par rapport à l'acier pour une résistance identique (450Mpa), ce qui est non négligeable pour la manutention du montage. Le serrage des deux blocs est assuré par serrage mécanique à l'aide de vis (8). L'épaisseur du serrage est contrôlée par les cales d'épaisseur (12). Par conséquent, ce système de serrage apporte l'avantage d'obtenir un serrage et une compression de la bande reproductibles. Le positionnement d'un bloc par rapport à l'autre est assuré par les piges de positionnement (9). Les deux blocs sont conçus pour supporter une charge de 50kN chacun. Cette charge leur impose une épaisseur de 30mm.

Le système d'agrafage va être reproduit par l'insertion de tiges (10) dans la grille (11). Les tiges sont en acier poli STUB pour assurer une reproductibilité sur le diamètre. Elles vont reproduire l'attache des agrafes sur l'échantillon. La grille (11) permet de modifier le nombre, la distance par rapport au bord et le positionnement relatif des points d'attache effectués par les tiges (Figure 3.8).

Le système d'attache rapide du montage spécifique comprend une goupille (13) et un outil d'assemblage (14).

3.3.3.1. Grille de trous

La grille de trous est composée de 13 rangées de 12 et 11 trous (Figure 3.8). Ces trous sont organisés en quinconce. Il y a 7,5mm entre chaque trou de 3,4mm de diamètre. L'espacement entre les trous est choisi suivant la moyenne observée sur les systèmes d'agrafage existants (de 7 à 8mm). L'espacement entre les lignes était limité par la charge maximale à supporter par le montage.

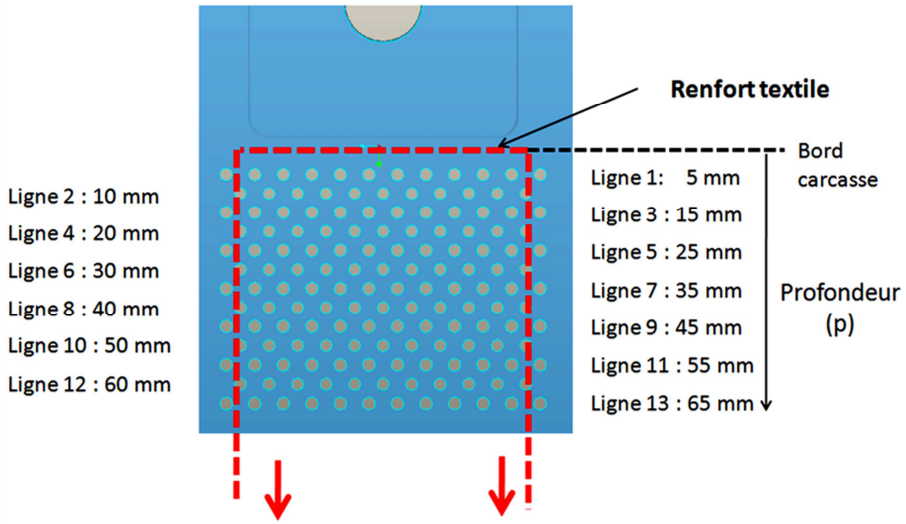

Figure 3.8. Détails de la grille du montage spécifique d'agrafage.

3.3.3.2. Flexion trois points

Pendant l'essai, les tiges sont soumises à une flexion 3 points (Figure 3.9). Cette flexion 3 points est obtenue grâce au diamètre des trous de 3,4mm qui est supérieur au diamètre des tiges. En effet, les tiges testées auront un diamètre allant de 2,2 à 3mm. La Figure 3.9 présente la coupe locale autour d'un trou du montage spécifique. La tige (1) est sollicitée par la bande (2) et maintenue en dessous par les deux blocs (3).

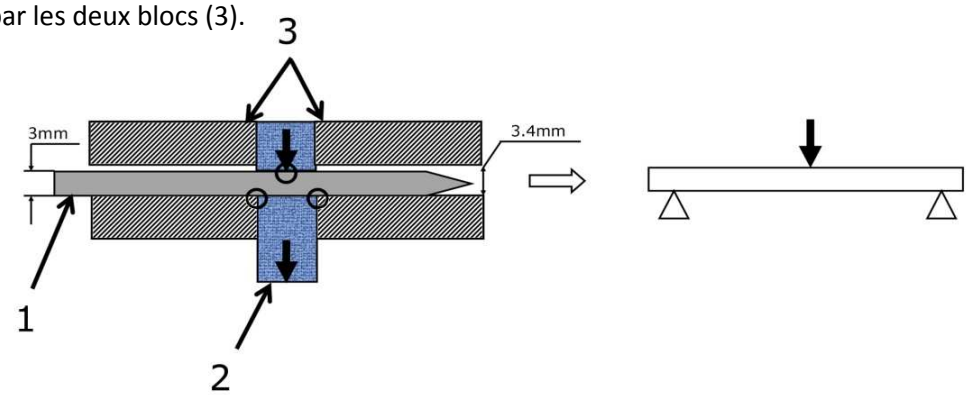

Figure 3.9. Cas de flexion trois points.

3.3.4. Machine de traction

La machine de traction est une machine MTS 20/M. Elle est équipée d'un capteur de force traction compression de 100kN. Le montage et démontage du montage expérimental sont effectués par goupillage (entouré sur la Figure 3.10). Les essais sont réalisés dans un laboratoire à atmosphère contrôlée (20±2°C et 65±2%HR).

Figure 3.10. Machine de traction.

3.4. Principe de jonctionnement avec le montage spécifique

Le « jonctionnement » est obtenu par l'insertion de tiges dans la grille de trou pour créer des points d'attache sur la carcasse textile reproduisant ainsi la jonction par agrafage.

La Figure 3.11 présente le détail de ce jonctionnement. L'échantillon est représenté en pointillé.

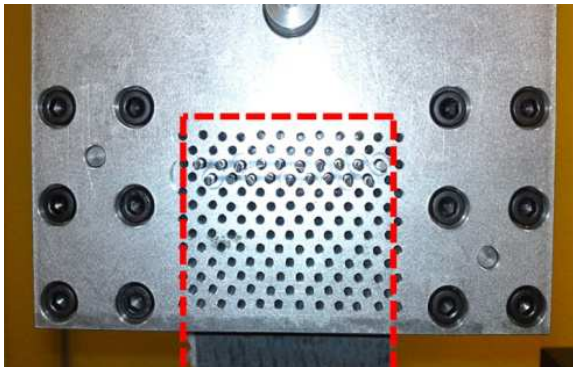

Figure 3.11. Jonctionnement avec le montage spécifique.

3.5. Procédure d'essai avec le montage expérimental

Sur la Figure 3.12 se trouvent le montage spécifique (1) et la pince (3) qui maintient l'échantillon de carcasse (2) pendant l'essai. Les essais avec le montage expérimental suivent un protocole présenté sur la Figure 3.13. Effectivement, le montage spécifique (1) est démonté à chaque essai et la pince (3) est desserrée et resserrée à chaque essai également.

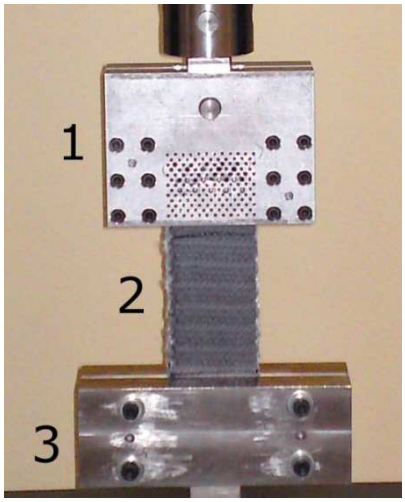

Figure 3.12. Montage expérimental.

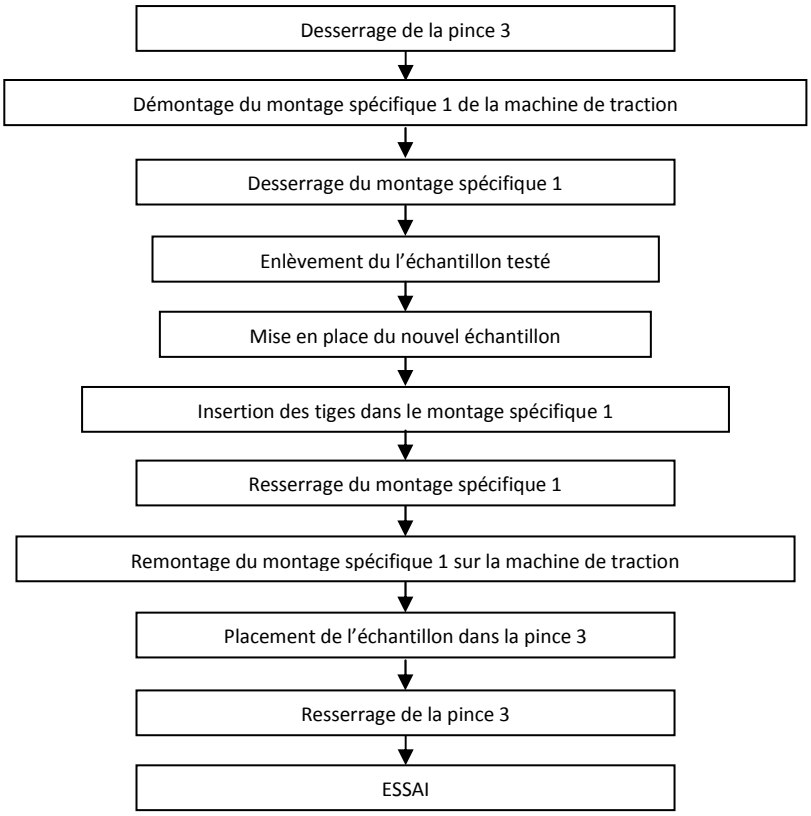

Figure 3.13. Protocole de mise en place d'échantillon.

3.6. Choix de la matière

Pour correspondre à la configuration industrielle de jonctionnement par agrafage où le revêtement de la bande est enlevé, les échantillons sont découpés d'une plaque de carcasse non revêtue de caoutchouc (Figure 3.14). Cela facilite l'insertion des tiges qui reproduisent les agrafes.

Une étude sera néanmoins menée afin de déterminer l'influence du calandrage et de la vulcanisation sur la bande en termes de résistance de la jonction en comparant un test sur la bande complète et un essai sur la carcasse seule. La carcasse textile étant de 9mm d'épaisseur à l'état brut, elle devra être comprimée afin de se retrouver dans la configuration d'une carcasse après vulcanisation. L'épaisseur de la cale d'épaisseur sera de 8mm.

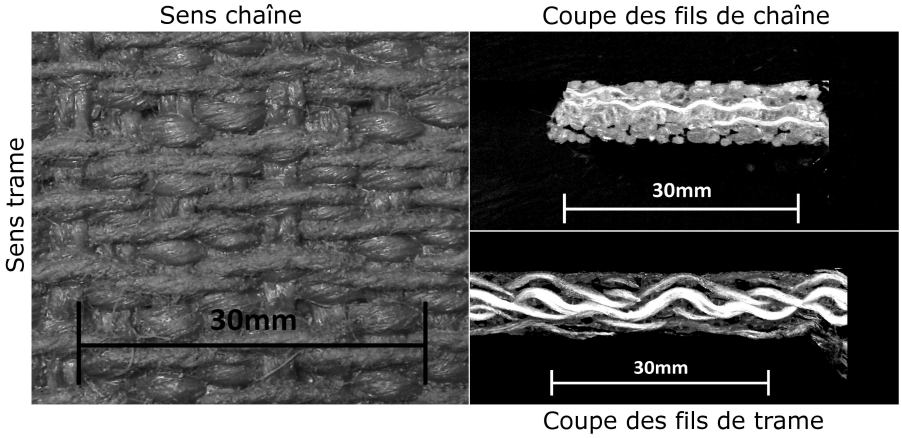

Figure 3.14. Carcasse textile.

Les échantillons sont découpés à la cisaille. Comme décrit précédemment, l'échantillon mesure 80mm en largeur et 250mm en longueur (Figure 3.15).

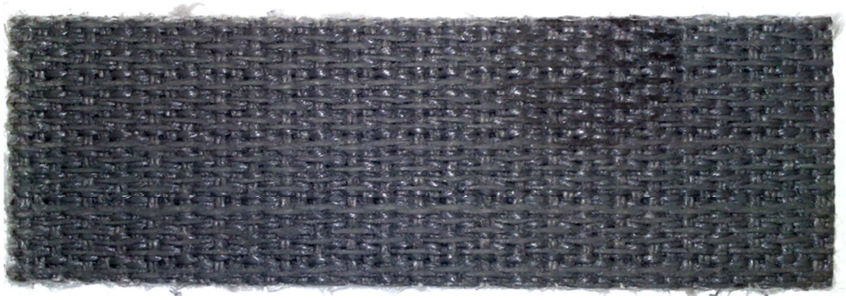

Figure 3.15. Échantillon de test.

4. Expérimentation

4.1. Plan d'expérimentation

L'étude du comportement des jonctions mécaniques nécessite beaucoup d'essais. Avant de démarrer l'évaluation de l'influence des différents paramètres sur l'efficacité de la jonction, il est important de dégrossir le travail en réalisant des essais préliminaires pour sonder l'efficacité du montage expérimental. Dans un second temps, l'influence des paramètres de l'environnement de test et de la jonction mécanique par agrafage va être évaluée en faisant varier les différents paramètres séparément. Pour ce faire, nous déterminerons d'abord par l'expérience la configuration nominale avec la profondeur d'attache la plus efficace afin de mettre en évidence d'une manière plus précise l'influence des autres paramètres. Dans un troisième temps, il s'agira d'évaluer l'influence de plusieurs rangées ainsi que celle de l'espace entre deux rangées. Enfin, l'utilisation de la photo élasticité permettra d'observer les déformations de la matière au niveau de la jonction, ce qui nous permettra de mieux comprendre les mécanismes de rupture de la jonction.

La démarche d'expérimentation est présentée sur la Figure 3.16.

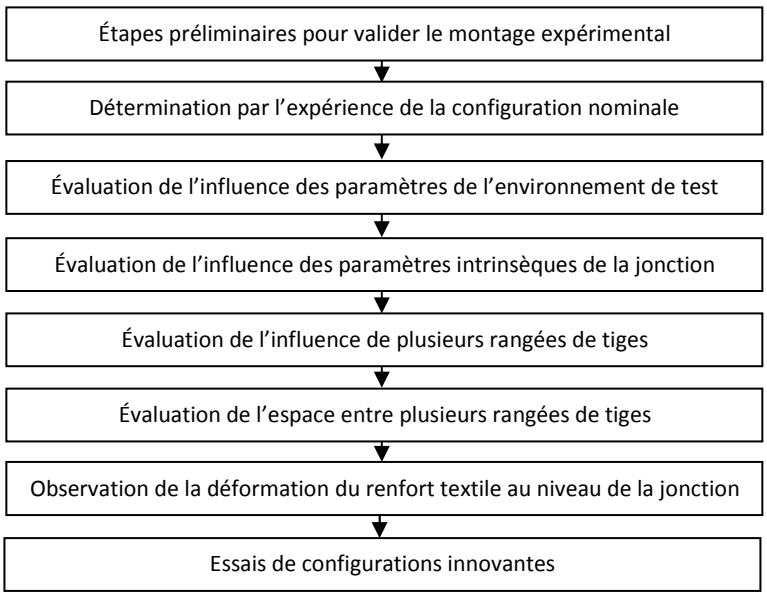

Figure 3.16. Démarche d'expérimentation.

4.2. Étapes préliminaires

Les différents essais à réaliser sont multiples. D'abord, il faut évaluer l'effort nécessaire pour perforer la carcasse. Ensuite, il est nécessaire de définir un indicateur qui évalue l'efficacité d'une jonction. Par la suite, il est intéressant de voir si la distribution des tests suit une loi normale. En effet, si le cas est avéré, nous pourrons nous limiter dans le nombre de répétitions d'essais. Puis, la variation sur les mesures est aussi à apprécier. Après, la vitesse de sollicitation est à déterminer. Enfin, l'essai sur la bande complète nous permet de faire une comparaison avec la carcasse testée seule.

4.2.1. Perforation carcasse

La perforation de la carcasse est un test qui a permis de déterminer l'effort à exercer pour traverser la carcasse avec une tige biseautée (Figure 3.17). Dans un premier temps, une perforation statique a été évaluée (Figure 3.18). La carcasse est maintenue dans un étau et la tige est poussée par la machine de traction. L'effort relevé est de l'ordre de 800N en phase statique.

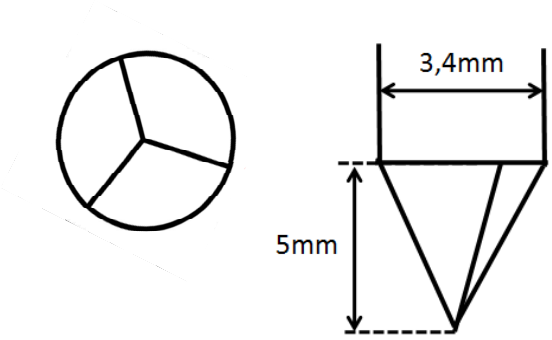

Figure 3.17. Extrémité de l'outil d'insertion.

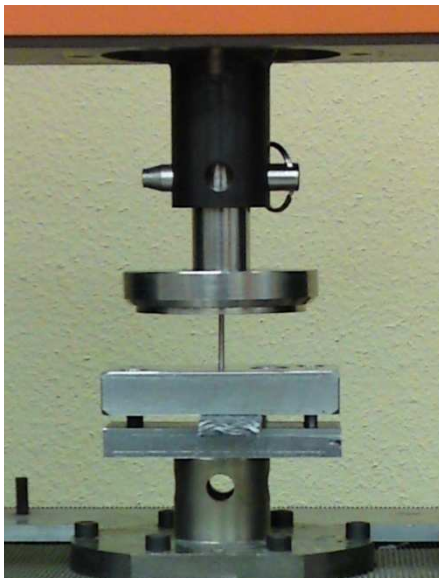

Figure 3.18. Essai de perforation statique.

Dans un second temps, les tiges ont été insérées dans la carcasse au marteau après avoir pré-percé cette dernière à l'aide d'un outil biseauté de 3,4mm de diamètre. Le pré-perçage a été réalisé à l'aide d'une visseuse électrique (Figure 3.19). L'effort nécessaire pour perforer la carcasse dépend de la vitesse de rotation de la visseuse.

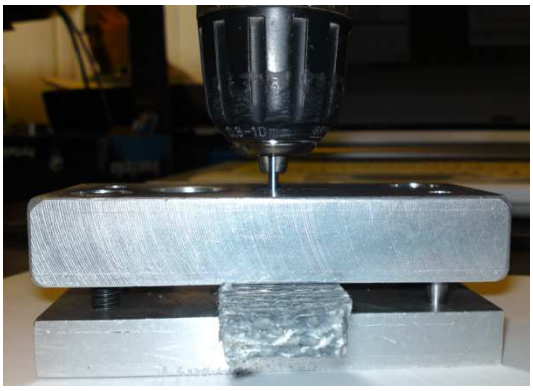

Figure 3.19. Essai de perforation dynamique.

A l'issue de ces tests, nous avons préféré utiliser l'insertion des tiges par rotation avec un pré-perçage des trous avec un outil de 3,4mm de diamètre.

Il faudra néanmoins évaluer l'influence du pré-perçage pour l'insertion des tiges sur la résistance de la jonction par rapport à une insertion par percussion avec un marteau où la tige serait biseautée.

4.2.2. Indicateur d'efficacité de la jonction

Dans le but de comparer les différents tests sur la matière, il est important de définir un indicateur suffisant pour caractériser l'efficacité d'une jonction, qu'elle soit mécanique ou non.

Cet indicateur a été défini comme étant :

$$JTSE\ [\%] = \frac{R\ [N]}{L\ [mm] * N\ [N/mm]}$$

JTSE = Junction Tensile Strength Efficiency = Efficacité en Résistance à la Traction de la Jonction

R = Résistance à la Traction de la Jonction (RTJ)

L = Largeur Effective de Jonctionnement (LEJ), distance entre les deux tiges d'extrémités (Figure 3.20)

N = Résistance à la Traction Nominale de la Bande (RTNB) = 1400N/mm

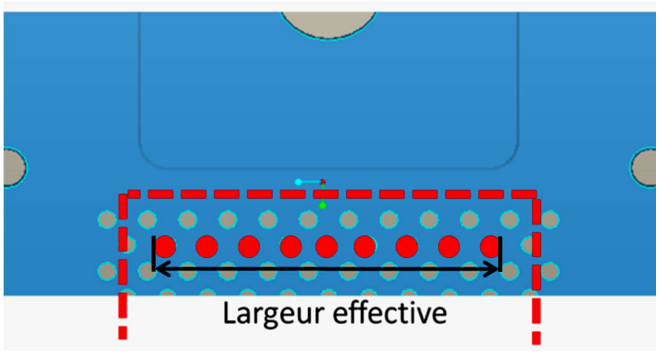

Figure 3.20. Largeur effective de jonctionnement.

4.2.3. Configurations de jonction

Le jonctionnement est effectué avec le montage expérimental. Ces configurations ont été choisies arbitrairement pour évaluer le comportement global du montage afin de permettre une éventuelle amélioration. Ces configurations nous permettent également de mettre en évidence la présence de phénomènes particuliers.

4.2.3.1. Configuration de jonction n°1

La première configuration (Figure 3.21) consiste à insérer deux rangées de tiges centrées à 25 et 30mm du bord de la carcasse. L'échantillon est serré préalablement. Le serrage de 8mm correspond à l'épaisseur de la carcasse après le cycle de vulcanisation de la bande complète.

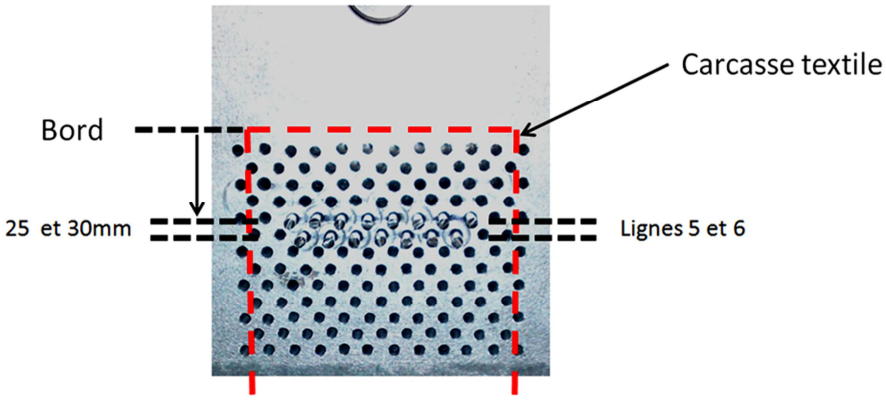

Figure 3.21. Configuration de jonction n°1.

La configuration de test est la suivante :

- Nombre de tiges (n) : 15
- Numéro des lignes (ligne) : 5 et 6
- Profondeur (p) : 25 et 30mm
- Espace en deux tiges (e) : 7,5mm
- Diamètre des tiges (d) : 3mm
- Épaisseur de la cale pour le serrage (s) : 8mm
- Pré-perçage (pp) : oui
- Largeur échantillon (L) : 80mm
- Vitesse du test de traction (vit) : 10mm.min^{-1}

La configuration sera écrite de la manière suivante :

n=15tiges/ligne=5-6/p=25-30mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=10mm.min^{-1}

Résultats

- La carcasse textile paraît comme sectionnée à l'endroit des tiges (Figure 3.22).
- L'effort transmis ne dépasse pas les 22,9kN. Théoriquement, la jonction devrait transmettre 69,4kN. L'efficacité de la jonction caractérisée par le paramètre JTSE est de 33% seulement.
- La partie arrachée est déformée. Ses bords semblent avoir été peignés, c'est-à-dire que les fils de trame ont été tirés du tissu.
- **L'insertion des tiges devra s'effectuer sans serrage préalable de l'échantillon** pour que les fils puissent se déplacer lors du pré-perçage à la place d'être sectionnés comme nous l'avons vu ici.

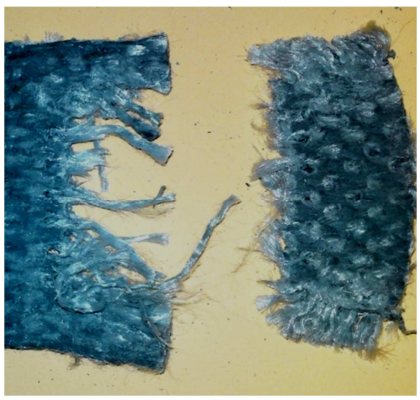

Figure 3.22. Résultats de la configuration de jonction n°1.

4.2.3.2. Configuration de jonction n°2

La deuxième configuration (Figure 3.23) consiste à insérer deux rangées de tiges à 30 et 40mm du bord de la carcasse en quinconce. L'échantillon est serré après l'insertion des tiges.

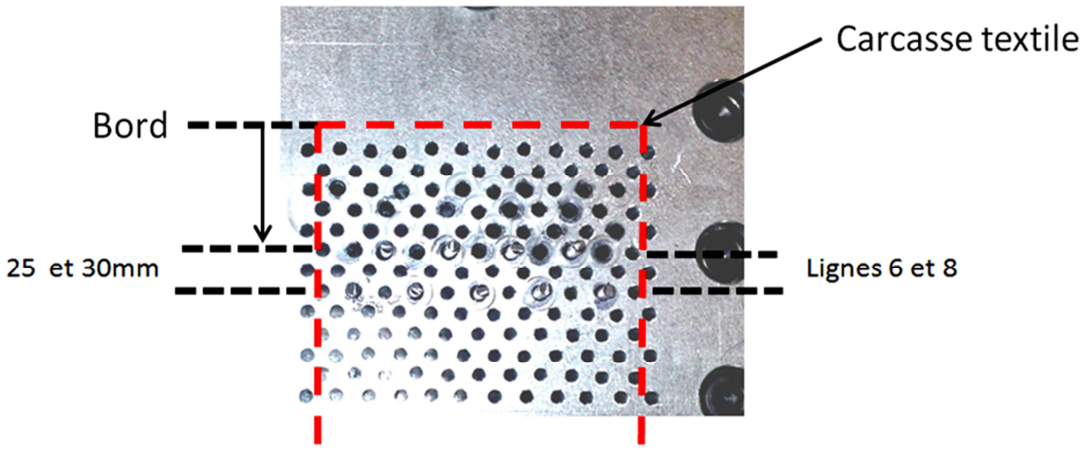

Figure 3.23. Configuration de jonction n°2.

La configuration de test est la suivante :

n=9tiges/ligne=6-8/p=30-40mm/ e=15mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/ vit=10mm.min^{-1}

Résultats

- La carcasse textile n'est pas sectionnée. La matière semble être disloquée. Le PVC est transformé en poudre et on peut voir des fils de trame sortis du tissu. Les fils de trame ont cassé pendant l'essai, tandis que les fils de chaîne semblent eux intacts.
- L'effort transmis ne dépasse pas les 40,3kN. Théoriquement, la jonction devrait transmettre 78.75kN. L'efficacité de la jonction caractérisée par le paramètre JTSE est de 51%.
- Il n'y a pas de partie arrachée pour cet essai.

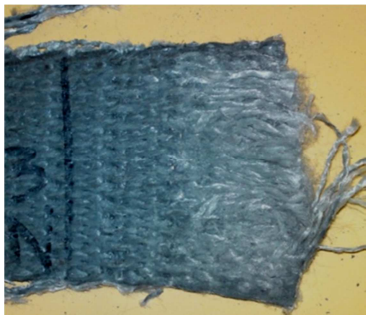

Figure 3.24. Résultats de la configuration de jonction n°2.

4.2.3.3. Conclusions

A l'issue de ces tests préliminaires sur certaines configurations, nous pouvons dire que l'échantillon de carcasse ne doit pas être serré avant l'insertion des tiges afin de permettre le déplacement des fils lors de l'insertion de ces dernières dans le montage spécifique.

De plus, lorsque les tiges sont trop rapprochées dans le cas d'un diamètre de 3mm, l'échantillon est très endommagé par l'insertion des tiges. Pour remédier à ce problème, il s'agit soit de diminuer les diamètres des tiges, soit d'espacer les tiges dans le montage. Par ailleurs, étant donné le nombre de paramètres modifiables, il serait judicieux d'isoler chacun d'eux afin d'en étudier l'influence. Finalement, les essais seront réalisés avec une rangée de tiges.

4.2.4. Vitesse de sollicitation

Afin de rester en condition quasi-statique, nous avons choisi de faire les essais à 20mm/min. Nous évitons ainsi tout phénomène de dissipation thermique pendant l'essai.

4.2.5. Loi normale

Le but de cet essai est de déterminer si la distribution des valeurs obtenues avec le montage expérimental suivent une loi normale. La population testée est de 35 échantillons. Nous tracerons la droite de Henry.

4.2.5.1. Configuration de l'essai

La configuration testée (Figure 3.25) contient les paramètres suivants :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

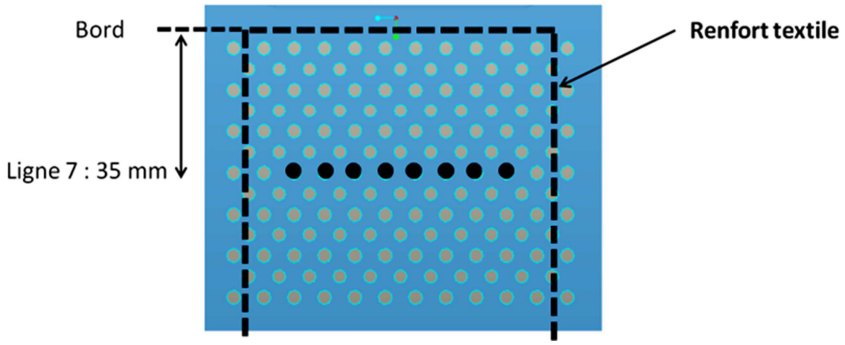

Figure 3.25. Configuration de l'essai Loi Normale.

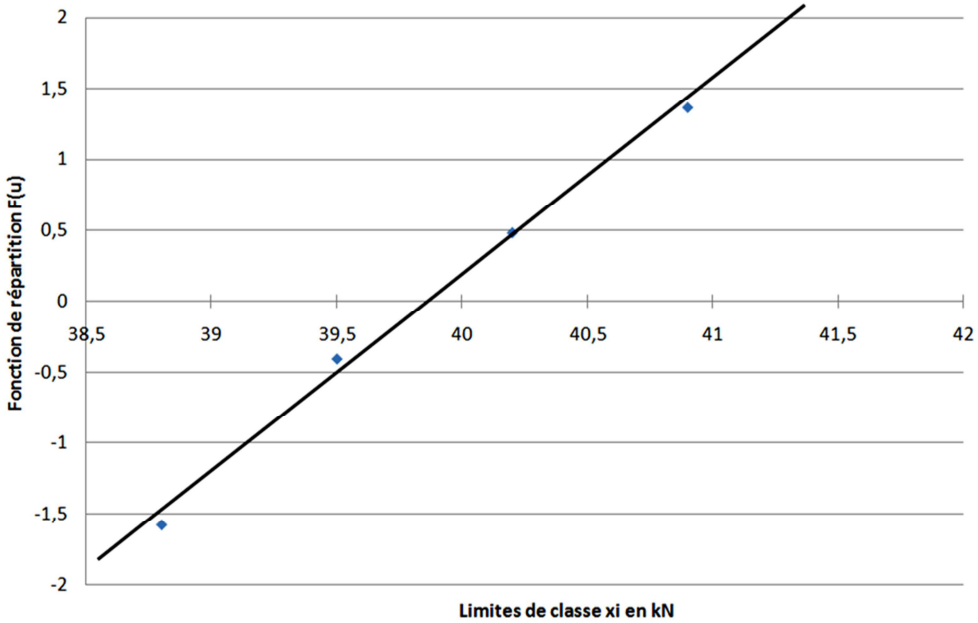

Figure 3.26. Droite de Henry des valeurs obtenues avec le montage expérimental.

4.2.5.2. Résultats

- Une moyenne de 39,9kN (écart type de 0.7kN), contre 78,4kN en théorie (largeur effective = 56mm) donc une JTSE de 50,9%
- d'après la droite de Henry (Figure 3.26), nous pouvons admettre l'hypothèse que la distribution des mesures suit une loi normale.
- Pour réduire le temps de l'expérimentation, les séries d'essais ne comprendront que 5 essais.

4.2.6. Variation sur les mesures

Les variations sur les mesures sont relativement faibles. En effet, l'écart type des 35 essais réalisés pour vérifier l'hypothèse de la distribution gaussienne est de 1,8%. Cette variation sur les résultats est la conséquence de plusieurs éléments :

1. Variation sur les échantillons.
2. Placement de la carcasse dans le montage expérimental : erreur sur la profondeur p=2mm.
3. Orthogonalité carcasse/montage expérimental : erreur de 2°.
4. Orthogonalité carcasse/pinces : erreur de 2°.
5. Mesure de la longueur active de l'échantillon : erreur de 1mm.
6. Variation sur le serrage des pinces : variation de 10mm sur l'allongement de la carcasse.

Le point 2 sera pris en compte pour l'étude de l'influence de la profondeur, les points 3 et 4 seront utilisés lors de l'étude de l'influence de l'orthogonalité trame/chaîne et enfin les points 5 et 6 seront à prendre en considération lors de l'interprétation de la déformation des échantillons pendant les essais.

4.2.7. Influence du serrage du montage spécifique

Le montage spécifique permet de reproduire une jonction réelle. Par conséquent, il permet non seulement de positionner des points d'attache, mais aussi de comprimer la matière testée. La compression est obtenue par le serrage des vis et contrôlée par les cales d'épaisseur insérées entre les deux blocs du montage spécifique de jonctionnement. Cette compression va empêcher la dislocation du tissu complexe. C'est pourquoi, la compression de la carcasse est importante dans le jonctionnement.

Il est important de contrôler le comportement de la traction sans tiges insérées à travers le montage spécifique pour évaluer l'effort transmis avec le serrage seul de la carcasse.

4.2.7.1. Configuration de l'essai

Nous avons effectué deux tests pour trois épaisseurs de cale de réglage : 8 ; 8,5 et 9mm. La largeur de l'échantillon est de 80mm. La vitesse de test est de 20mm/min.

4.2.7.2. Résultats

La Figure 3.27 montre que l'effort est décroissant. Cela s'explique par la diminution de la contrainte imposé à la matière en comprimant cette dernière. D'autre part, les courbes présentent un aspect sinusoïdal, qui correspond au passage du relief d'armure de la carcasse sur les différents trous de la grille du montage spécifique. On peut notamment remarquer leur pseudo-périodicité (5mm qui correspond à la distance entre deux trous) en fonction du déplacement de la carcasse pendant la traction.

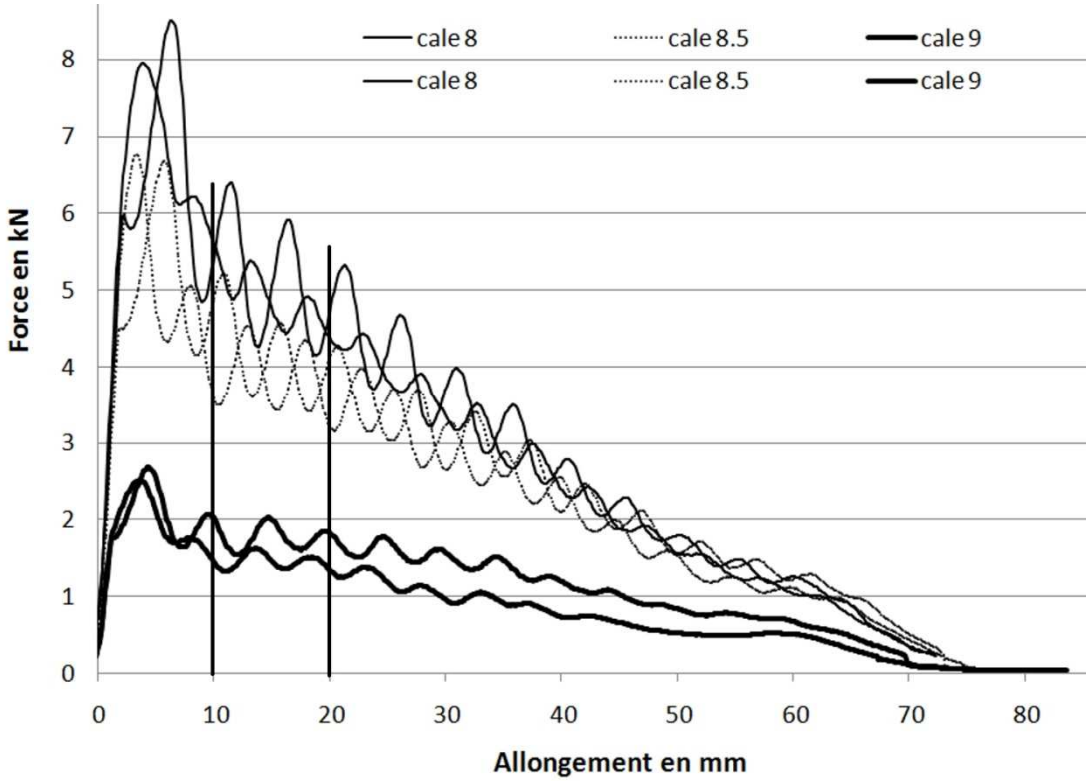

Figure 3.27. Allure de la force en fonction du serrage du montage spécifique.

Explication du phénomène

La matière est comprimée entre les deux blocs eux-mêmes serrés ensemble par les vis (Figure 3.28 et Figure 3.29). L'explication présentée ci-dessous est théorique.

On impose alors une déformation à la matière.

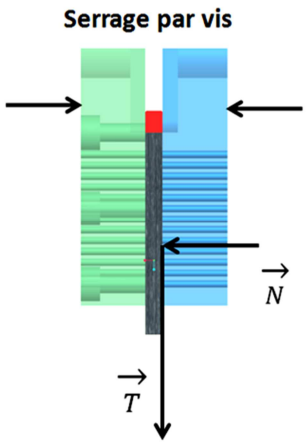

Figure 3.28. Schéma de côté du serrage de la carcasse.

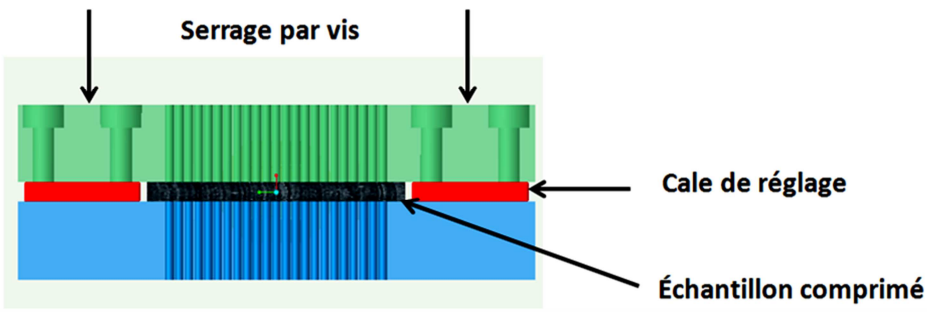

Figure 3.29. Schéma de serrage de la carcasse.

$\overrightarrow{N}$ = effort normal

$\overrightarrow{T}$ = effort transversal mesuré par la machine de traction

- $\sigma = E \times \varepsilon$

Avec σ = la contrainte appliquée

ε = la déformation appliquée

E = le module de Young ou d'élasticité de la matière.

- $Or\ \sigma = \frac{N}{S}$

Avec N la Force appliquée

S la surface

$dN = \sigma \times dS$

- Or σ= cste car ε=cste, imposée par la cale d'épaisseur

$dT = f \times dN$

Avec f = le coefficient de frottement considéré comme constant dans notre cas de glissement.

- Finalement :

$dT = f \times \sigma \times dS$

$dT = cste \times dS$

Donc l'effort T mesuré sur la machine de traction est directement proportionnel à la surface contenue entre les deux blocs. Quand la surface diminue, la force tangentielle T décroît aussi.

La courbe présentée sur la Figure 3.27 est donc correcte.

À la suite de cette étude, nous pouvons remarquer que le serrage de la carcasse représente 20% de l'effort transmis dans le cas du serrage maximum de notre étude (cale de 8mm). Nous pouvons ainsi affirmer que la carcasse approche une épaisseur de 8mm sous 8kN d'effort, de 8,5mm sous 6,5kN et 9mm sous 2,5kN. Cela s'explique par le fait que la traction sur le tissu le fait s'allonger et par conséquent sa section diminue.

4.2.8. Essai avec bande complète

Nous avons choisi de travailler avec la carcasse seule pour des raisons de simplicité. Il faut néanmoins vérifier l'influence de la vulcanisation sur les résultats obtenus avec le montage expérimental. Ce test permettra aussi de vérifier la différence de comportement sur la jonction entre la carcasse seule et la bande complète.

4.2.8.1. Configuration de l'essai

Cette série de test comprend 6 essais. La configuration de test est la suivante :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/**s=10mm**/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

L'épaisseur du serrage est adaptée à celle de la bande complète.

4.2.8.2. Résultats

- Une moyenne de 52,8kN, contre 78,4kN en théorie (largeur effective = 56mm) donc une JTSE de 67% (Figure 3.30)
- La Figure 3.30 montre la différence de comportement entre la bande complète et la carcasse pour une même configuration de jonction. On peut constater que la bande complète a un module plus élevé, tandis que la déformation à la rupture est plus faible (20% pour la bande contre 25% pour la carcasse). De plus, la résistance est plus élevé (67% en JTSE pour la bande complète contre 51% pour la carcasse)
- L'échantillon rompu présenté sur la Figure 3.31 nous permet de dire que la rupture s'est produite sur les fils de chaîne principalement.
- Sur le morceau arraché, on peut distinguer des excroissances de caoutchouc formées par les trous de la grille du montage spécifique.

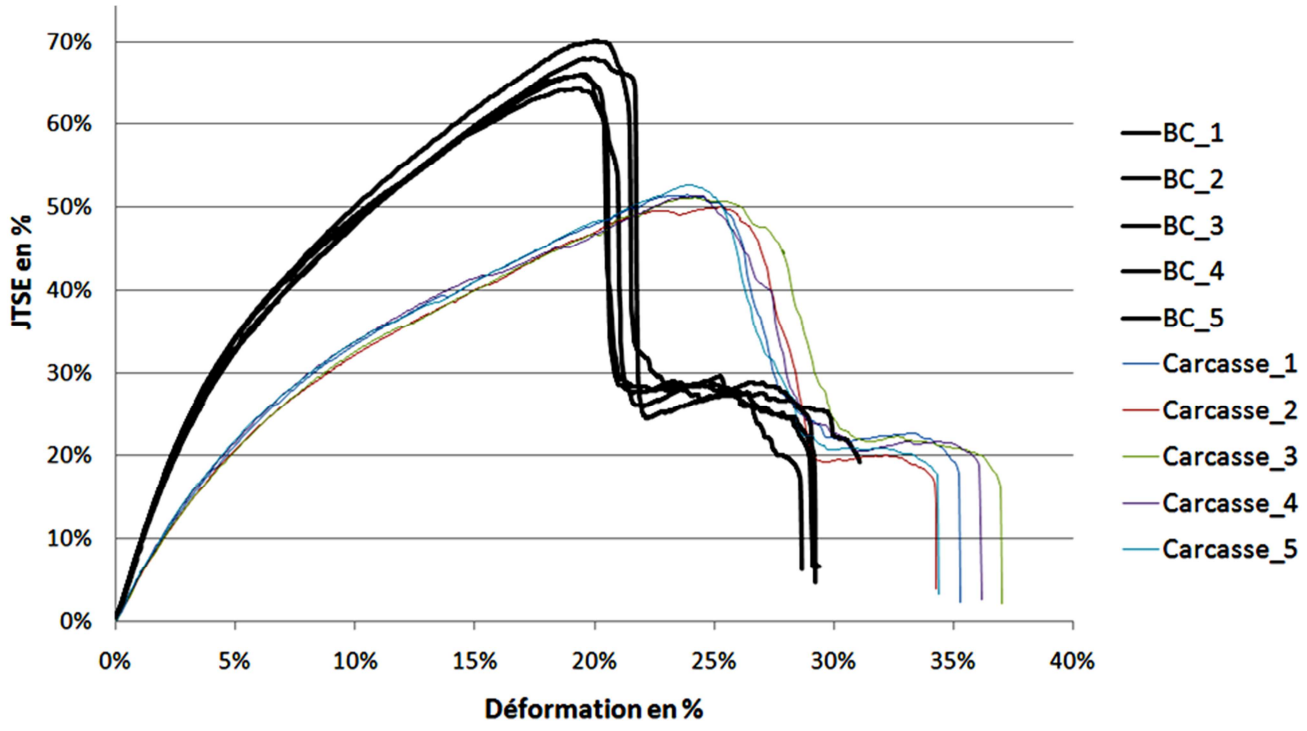

Figure 3.30. Résultats de la comparaison bande complète/carcasse seule.

Figure 3.31. Échantillon rompu de la bande complète.

4.2.9. Conclusion sur les tests préliminaires

Les tests effectués nous ont permis de nous familiariser avec le montage expérimental. Nous avons pu nous rendre compte des difficultés de mise en œuvre de chaque essai.

Les tests préliminaires sur les configurations de jonction nous permettent de dire que l'échantillon de carcasse ne doit pas être serré avant l'insertion des tiges afin de permettre le déplacement des fils lors de l'insertion de ces dernières dans le montage spécifique.

De plus, lorsque les tiges sont très rapprochées les unes des autres, l'échantillon est très endommagé par l'insertion des tiges. Pour remédier à ce problème, il faut soit diminuer les diamètres des tiges, soit espacer les tiges dans le montage.

Par ailleurs, étant donné le nombre de paramètres modifiables, nous allons isoler chacun d'eux afin d'en étudier l'influence.

Pour cela, on se propose de limiter les points d'attache à une seule rangée de tiges en modifiant les paramètres de cette dernière : le nombre de tiges, le diamètre des tiges, la profondeur des points d'attache, le serrage de la jonction et enfin la largeur de l'échantillon.

Il faudra également évaluer l'influence de l'environnement comme l'humidité et la température, des défauts de la matière (perpendicularité trame/chaîne), du pré-perçage, de la profondeur des points d'attaches, du serrage de la jonction, du nombre de tiges, du diamètre des tiges et de la largeur de l'échantillon sur l'efficacité de la jonction.

4.3. Tests d'influence

Ce sous-chapitre présente les méthodes et les résultats de l'étude de l'influence des paramètres sur l'efficacité de la jonction tels que : l'humidité de l'air, l'orthogonalité trame/chaîne, la température, le pré-perçage pour l'insertion des tiges, le serrage du montage spécifique, la profondeur d'insertion des tiges, le serrage de la jonction, le nombre de tiges, leur diamètre et la largeur de l'échantillon. L'influence de chaque paramètre sera comparée à la variation des essais du point 4.2.5 qui représentait 0,9% de l'efficacité JTSE.

4.3.1. Influence de l'humidité sur les tests

L'atmosphère du laboratoire d'essai étant à 65% d'humidité relative, il était important de vérifier que l'humidité n'influe pas sur les valeurs. En effet, l'eau peut agir comme lubrifiant dans la matière, car drainée par le coton.

4.3.1.1. Configuration de l'essai

Les échantillons sont placés dans l'atmosphère contrôlée (65±2%HR et 20±2°C) pendant trois semaines. Cette série de test comprend 10 essais.

La configuration de test est la suivante :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

4.3.1.2. Résultats

- Une moyenne de 38,7kN (écart type de 0,87kN) et une JTSE de 49% (Figure 3.32)
- On a vérifié que les données provenant du test de l'influence de l'humidité et celles des 35 appartiennent à la même population à partir d'une comparaison de moyennes où l'hypothèse est acceptée. On peut considérer le paramètre comme non influent.

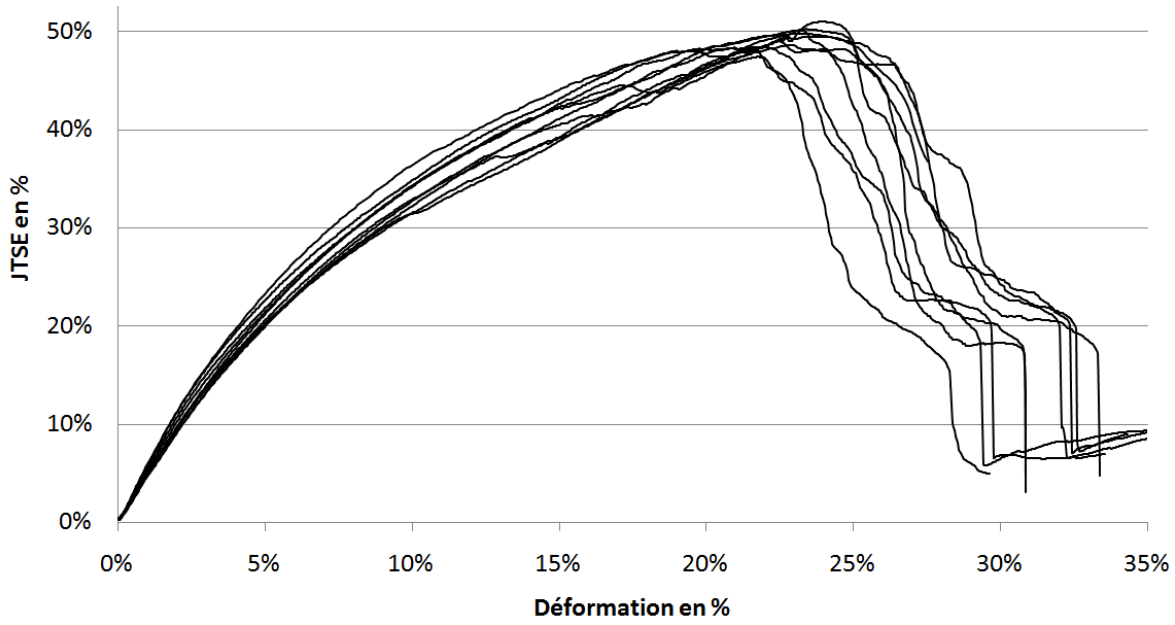

Figure 3.32. Influence de l'humidité sur la JTSE.

4.3.2. Influence de la non-orthogonalité trame/chaîne

Après plusieurs vérifications, nous nous sommes aperçus que les échantillons présentaient des fils de chaîne et de trame non perpendiculaires. En effet, nous avons remarqué une différence de 5mm sur une longueur de 80mm, soit un angle de 3,6° entre la chaîne et la trame. Nous nous sommes alors intéressés à l'étude de l'influence de cette perpendicularité présente sur tous les échantillons à plus ou moins forte amplitude.

4.3.2.1. Configuration de l'essai

Nous avons effectué 4 séries de test avec respectivement des angles de 0,7 ; 1,4 ; 2,1 et 4,2° par rapport à la droite orthogonale au fil de chaîne (Figure 3.33).

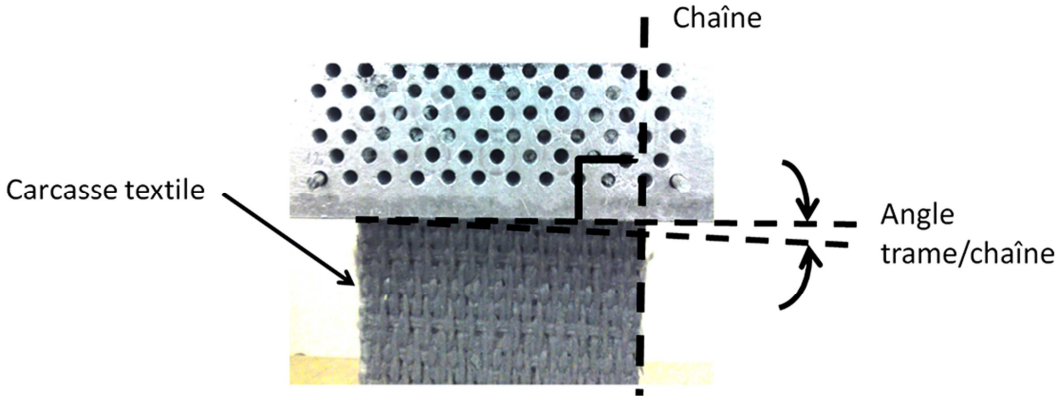

Figure 3.33. Configuration de l'essai pour l'influence de la non-orthogonalité trame/chaîne.

La configuration de test est la suivante :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

4.3.2.2. Résultats

Les résultats sont résumés dans le Tableau 3.2.

En considérant que les 35 échantillons représentent la population de référence, un tracé d'une carte de surveillance (Annexe 11) et de contrôle nous montre que les résultats obtenus sont inférieure aux limites de contrôle. On considérera par conséquent l'influence de ce paramètre comme négligeable.

Tableau 3.2. Influence de la non-perpendicularité trame/chaîne sur la JTSE.

Angle trame/chaîne en °	Efforts moyens en kN	JTSE en %
0,7°	39,9	50,9
1,4°	40,4	51,5
2,1°	39,8	50,8
4,2°	39,7	50,6

4.3.3. Influence de la température

Il était aussi important de vérifier si la température du laboratoire avait une influence sur les résultats. Rappelons que la bande transporteuse fonctionne dans une atmosphère avec une température allant jusqu'à 50°C. Étant donné que la matière est imprégnée de PVC, on peut admettre que les propriétés du renfort ne changent pas suivant la température d'essai. En effet, le PVC ne commence à se ramollir qu'à partir d'une température de 65°C. Les essais étant effectués dans une atmosphère de 21°C et stockés dans un local avec une température maximale de 35°C, la température peut être considérée comme non influente sur les essais réalisés au laboratoire.

4.3.4. Influence du pré-perçage pour l'insertion des tiges

L'insertion des tiges est faite par pré-perçage avec un outil usiné sur trois faces à son extrémité (Figure 3.34). Il s'agit de vérifier que ce mode d'insertion ne fragilise pas excessivement la carcasse.

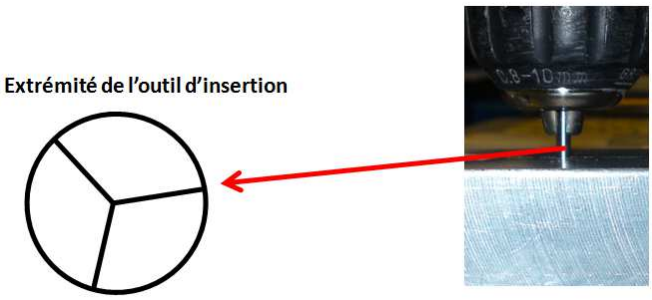

Figure 3.34. Détails de l'outil d'insertion des tiges.

4.3.4.1. Configuration de l'essai

Nous avons effectué plusieurs séries de tests. Tout d'abord deux séries avec la configuration de 8 tiges de 3mm insérées à 35mm du bord avec puis sans pré-perçage. Ensuite, nous avons essayé avec un diamètre plus petit : 2,6mm.

La configuration de test est la suivante :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/**d=3 puis 2,6mm**/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

4.3.4.2. Résultats

- En nous basant sur la carte de contrôle et de surveillance des 35 échantillons de référence (Annexe 11), nous pouvons considérer que le pré-perçage est un paramètre influent dans le cas d'un diamètre de 3mm. les résultats sont présentés dans le Tableau 3.3.
- La variation de la JTSE observée est de 7% ((54,5-50,9)/50,9 : 50,9 la limite basse).

Tableau 3.3. Résultats des tests de l'influence du pré-perçage.

	Effort moyen (kN) Tige d = 3mm	JTSE (%) Tige d = 3mm	Effort moyen (kN) Tige d = 2,6mm	JTSE (%) Tige d = 2,6mm
Avec pré-perçage	39,9kN	50,9	39,5kN	50,4
Sans pré-perçage	42,7kN	54,5	39,7kN	50,6

4.3.5. Influence de la profondeur d'insertion des tiges

La profondeur des points d'attache par rapport au bord de la bande transporteuse est un paramètre qui a une grande influence sur l'efficacité de la jonction. En effet, on peut affirmer par déduction que plus le point d'attache est profond, meilleur sera l'effort transmis. L'étude de cette influence va nous permettre de déterminer la profondeur à partir de laquelle l'effort transmis ne croît plus. En revanche, il est nécessaire de remarquer que dans la pratique, les points d'attache ne peuvent pas être trop profonds à cause du passage sur les tambours lors du fonctionnement de la bande transporteuse. En effet, une grande profondeur implique des systèmes d'agrafage longs, ce qui favorise la fatigue de la jonction.

4.3.5.1. Configurations de l'essai

Nous avons effectué 6 séries de 5 tests avec respectivement des profondeurs de 15, 20, 25, 30, 35 et 50mm (Figure 3.35). En dessous de 15mm, les résultats montrent que l'effort transmis est dérisoire. Le reste des paramètres a été fixé comme décrit ci-dessous.

La configuration de test est la suivante :

n=8tiges/**ligne=3,4,5,6,7 et 10/p=15,20,25,30,35 et 50mm**/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/ L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

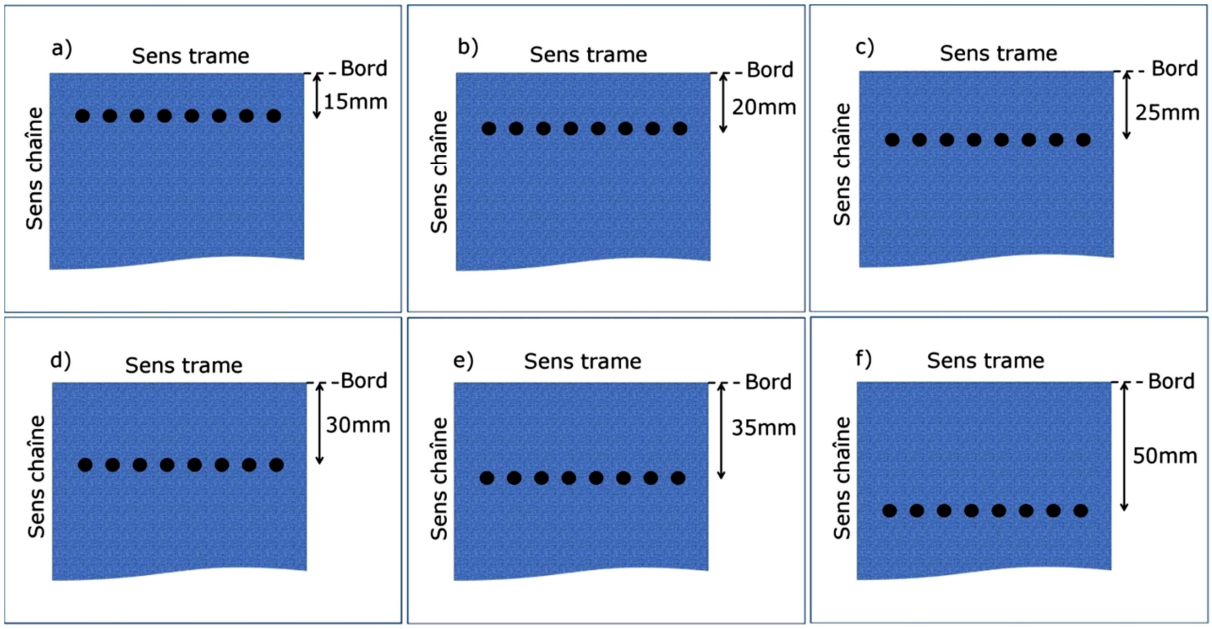

Figure 3.35. Configuration pour l'influence de la profondeur p des points d'attache.

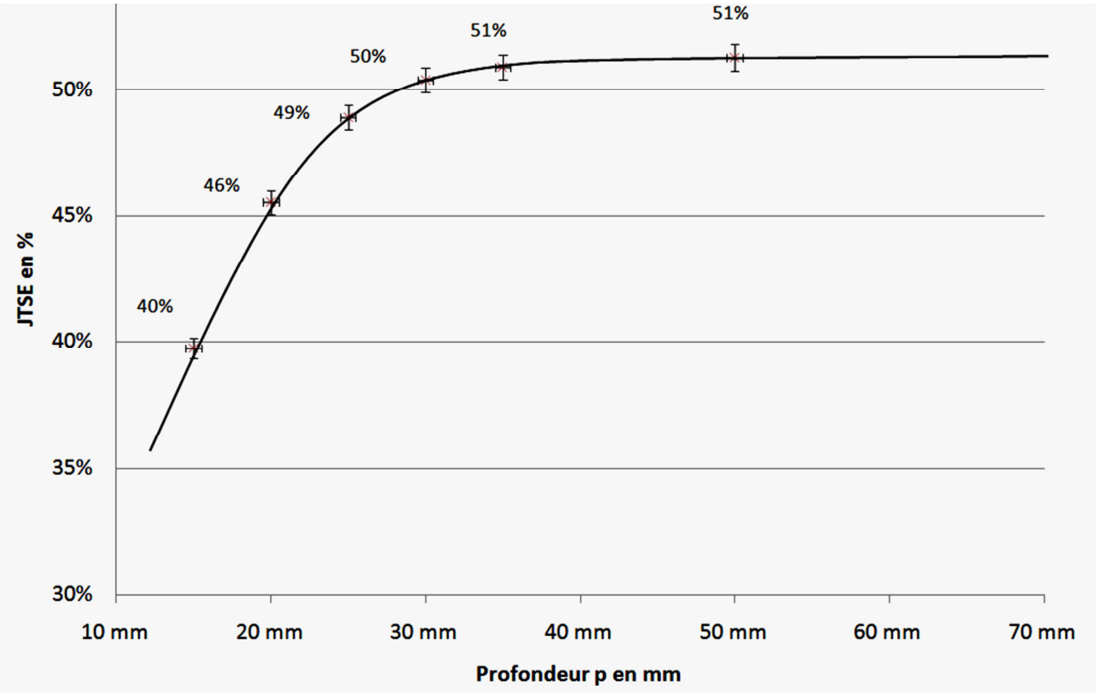

Figure 3.36. JTSE en fonction de la profondeur des points d'attache.

4.3.5.2. Résultats

- Le graphique de la Figure 3.36 nous montre que l'effort transmis maximal est atteint pour une profondeur de l'ordre de 35mm. En effet, l'efficacité augmente jusqu'à atteindre une asymptote après 35mm de profondeur des points d'attache.
- Cette configuration de test offre une efficacité maximale de la jonction de 51% à partir d'une profondeur de 35mm du bord de la carcasse. Si l'on regarde les résultats des tests effectués sur la bande complète (4.2.8 p. 47), on peut observer que l'effort transmis dans la même configuration est correspond à une efficacité de 67%.
- Ce paramètre est considérablement influent sur l'efficacité de la jonction.

4.3.5.3. Perspectives

Ce test nous a permis de définir la profondeur à partir de laquelle l'effort transmis est stable. Il a aussi montré l'importance de ce paramètre sur l'efficacité de la jonction.

Il serait intéressant de poursuivre ces tests avec plusieurs rangées ou d'autres configurations.

4.3.6. Influence du serrage de la jonction

Le serrage de la jonction a une influence sur la cohésion de la nappe textile. En effet, plus la nappe textile est comprimée, plus sa dislocation est difficile. C'est pourquoi, le serrage de la jonction influe sur l'efficacité de la jonction. Dans le cas d'un jonctionnement classique, la jonction est comprimée en insérant les agrafes. Dans notre cas, le serrage de la jonction est reproduit pas les vis de serrage et contrôlé par les cales de réglage interposées entre les deux blocs du montage (Figure 3.37).

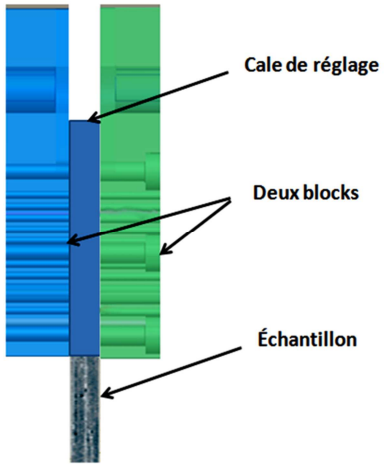

Figure 3.37. Configuration pour l'influence du serrage.

4.3.6.1. Configurations de l'essai

Nous avons effectué 5 séries de 5 tests avec respectivement des épaisseurs de cale de 8 ; 8,5 ; 9 ; 9,5 et 10mm. Le reste des paramètres a été fixé comme décrit ci-dessous.

La configuration de test est la suivante :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/**s=8 ; 8,5 ; 9 ; 9,5 et 10mm**/pp=oui/
L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

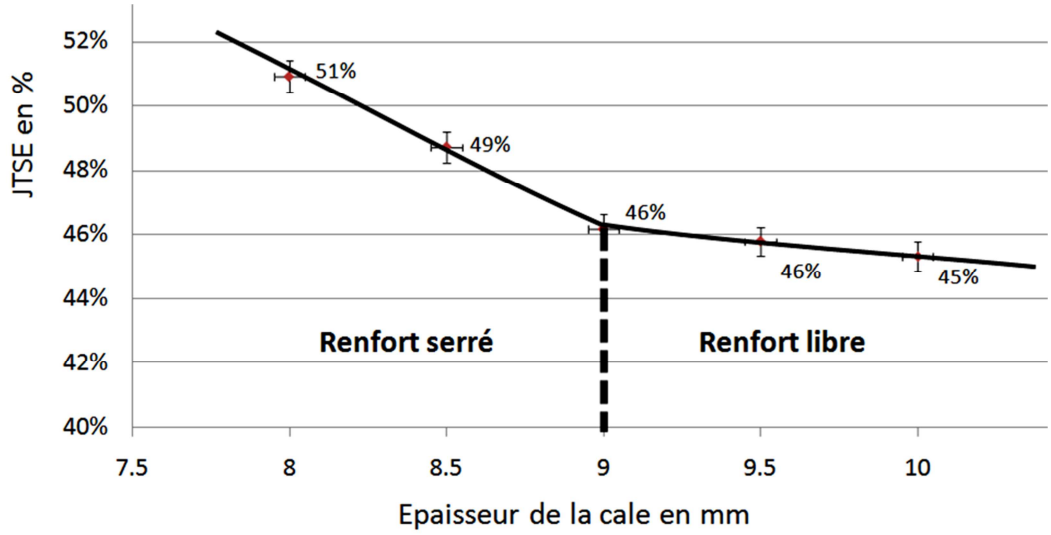

Figure 3.38. JTSE en fonction du serrage de la jonction.

4.3.6.2. Résultats

La zone « serrée » (Figure 3.38) montre que la compression de la bande due au serrage contribue fortement à l'augmentation de la JTSE. Cette contribution est de l'ordre de 11% ((51-46)/46 : 46 la limite basse). En revanche, la zone non comprimée ne devrait pas présenter de différence entre 9 et 10mm. La faible pente est due à un accroissement de l'épaisseur de la bande après l'insertion des tiges. On peut considérer ce paramètre comme influent.

4.3.6.3. Perspectives

On peut voir que l'efficacité est meilleure lorsque la jonction est serrée, ce qui confirme les hypothèses de départ. Il serait intéressant de vérifier jusqu'à quelle épaisseur la JTSE augmente. En effet, la compression devrait atteindre une limite physique.

4.3.7. Influence du nombre de tiges

Il est admis que l'effort transmis dépendra du nombre de tiges insérées dans le montage spécifique. Cependant, cette influence a été étudiée afin de pouvoir déterminer les effets de bord et l'influence du nombre de tiges par rapport à la largeur de l'échantillon. Le principe de cette étude d'influence est d'augmenter le nombre de tiges insérées et d'en relever les résultats. Le nombre de tiges sur une ligne sera limité par la largeur de l'échantillon. Dans notre cas, on ira jusqu'à 10 tiges.

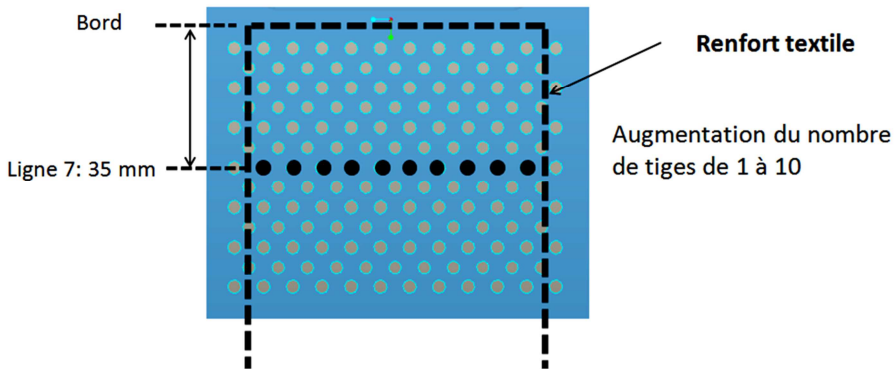

Figure 3.39. Configuration pour l'influence du nombre de tiges.

4.3.7.1. Configurations de l'essai

Nous avons effectué 10 séries de 2 tests avec le nombre de tiges qui augmente de 1 à 10 tiges (Figure 3.39). Le reste des paramètres étaient fixés comme décrit ci-dessous :

n=1 à 10 tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

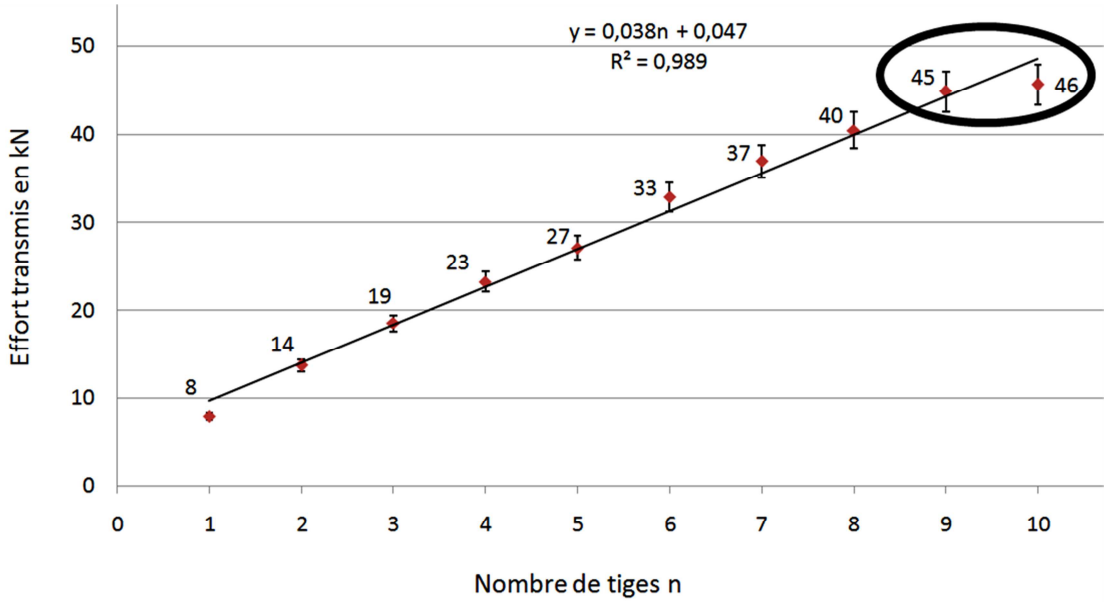

Figure 3.40. Effort transmis en fonction du nombre de tiges.

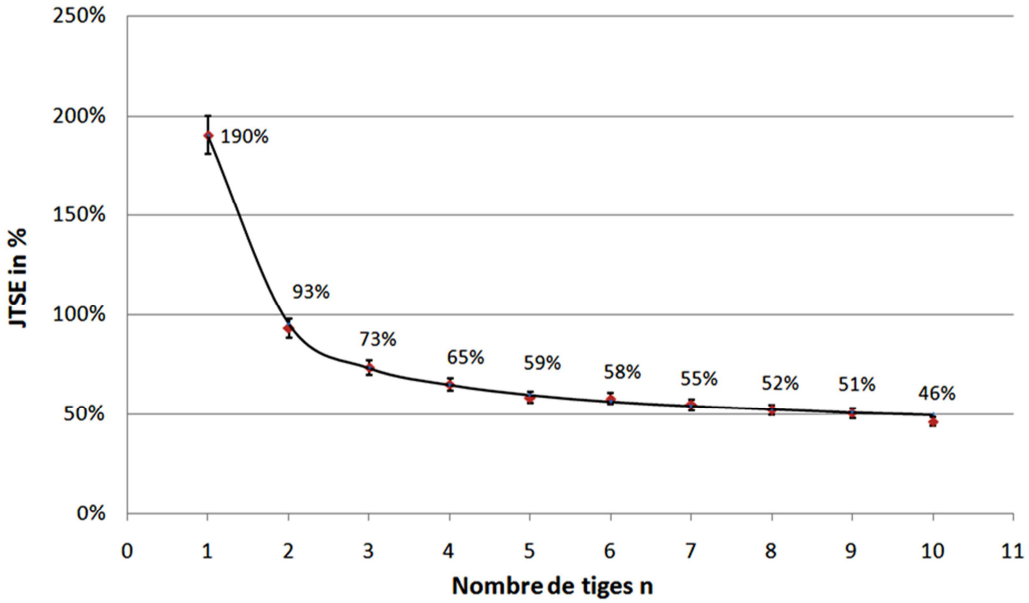

Figure 3.41. JTSE en fonction du nombre de tiges.

4.3.7.2. Résultats

Le graphique de la Figure 3.40 présente l'influence du nombre de tiges sur la résistance globale. La résistance de la jonction augmente linéairement en fonction du nombre de tiges, ce qui confirme l'hypothèse de départ. On peut néanmoins noter le changement qui apparaît sur la courbe après la neuvième tige : la 10^{e} tige n'apporte pas autant de résistance supplémentaire que les précédentes. Cela s'explique par l'effet de bord.

La Figure 3.41 présente l'influence du nombre de tiges sur la JTSE, l'efficacité de la jonction. On peut observer que l'efficacité décroît quand le nombre de tiges augmente. Ceci est dû aux dommages de la carcasse engendrés par l'insertion des tiges. Plus il y a de tiges, plus la carcasse sera fragilisée. Par conséquent, plus on insère de tiges, moins la jonction est efficace.

Nous pouvons en revanche mentionner que l'indicateur d'efficacité JTSE ne donne pas une efficacité réaliste de la jonction pour 1 et 2 tiges (la largeur efficace est inférieure au rapport d'armure de 7mm dans ces deux cas). Pour 10 tiges, la valeur sera aussi rejetée pour notre étude d'influence, en raison de l'effet de bord. Si les tiges sont insérées trop près des bords, la jonction sera fragilisée et sa durée de vie sera réduite. Il est par conséquent essentiel de garder une certaine distance des chaque côtés de la rangée où il n'y aura pas de tiges insérées. La distance minimale à respecter de part et d'autre de la rangée sera à déterminer afin d'avoir une efficacité suffisante.

Par ailleurs, on peut constater que l'efficacité varie de 51% à 73% (46%, 93% et 190% étant rejetés). Ce qui donne une variation de 43% ((73-51)/51 : 51 la limite basse). Ce paramètre sera considéré comme très influent.

4.3.7.3. Perspectives

Ce test nous a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes tels que l'effort transmis qui augmente avec le nombre de tiges. Cependant, l'efficacité diminue lorsque le nombre de tiges augmente. Toutefois, la vérification de cette hypothèse serait nécessaire en conduisant des tests avec plusieurs rangées de tiges.

4.3.8. Influence du diamètre des tiges

Le diamètre des tiges est un paramètre qui a son importance car plus le diamètre est grand, plus l'endommagement de la structure est prononcé. Nous devrions trouver une efficacité qui décroît en fonction du diamètre des tiges.

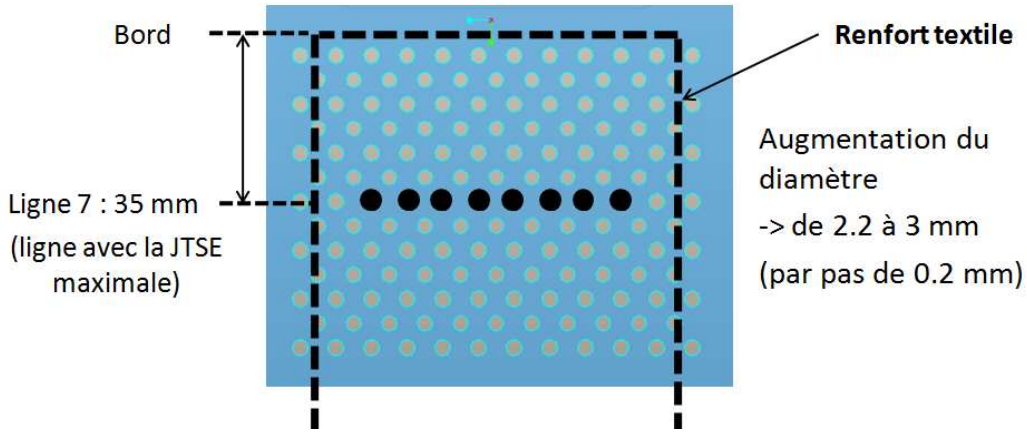

Figure 3.42. Influence du diamètre des tiges.

4.3.8.1. Configurations de l'essai

Nous avons effectué 5 séries de 5 tests avec des diamètres de 2,2 ; 2,4 ; 2,6 ; 2,8 et 3,0mm. Pour un diamètre de 2mm, les résultats n'ont pas été exploitables car les tiges ne résistaient pas. Pour les autres diamètres inférieurs à 2,6mm, nous avons dû tremper les tiges à l'eau après une chauffe à 780°C après quoi les tiges ont subi un revenu pour les rendre moins fragile. Ce traitement thermique a été essentiel pour que les tiges ne s'insèrent pas entre la carcasse et les blocs du montage spécifique à cause de leur (Figure 3.43). Afin de mettre en évidence l'influence du diamètre, les tiges ont été insérées sans pré-perçage.

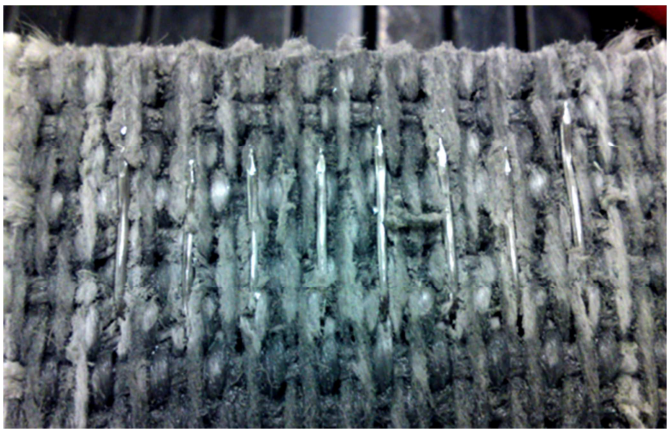

Figure 3.43. Tiges s'insérant par déformation entre les blocs et la carcasse.

La configuration de test est la suivante :

n=8 tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/**d=2,2 à 3mm**/s=8mm/**pp=non**/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

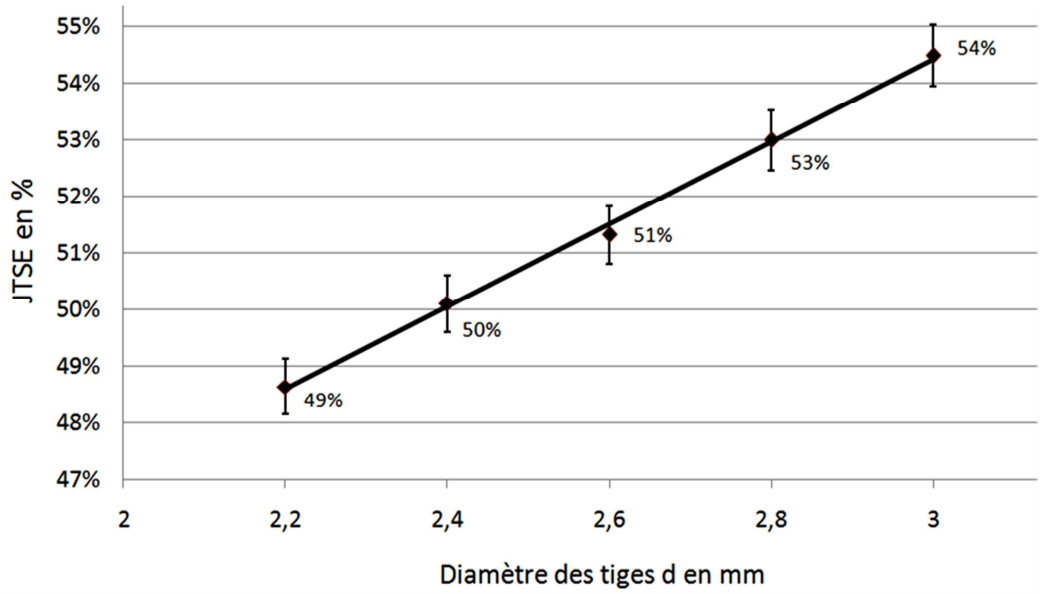

Figure 3.44. JTSE en fonction du diamètre des tiges.

4.3.8.2. Résultats

Le graphique (Figure 3.44) nous montre que l'effort transmis augmente avec le diamètre des tiges. Ce qui est l'inverse de notre hypothèse de départ : plus les tiges sont grosses, plus la carcasse est endommagée par conséquent l'effort transmis devait être moindre. Dans notre cas, pour une même configuration, le même serrage, la même position et le même nombre de tiges, l'efficacité augmente de 12% ((54,5-48,6)/48,6 avec 48,6 la limite basse). Cela s'explique par le fait que lorsque le diamètre augmente, les fils de la carcasse se retrouvent avec moins d'espace, donc se trouvent plus serrées lorsque le diamètre est plus grand. Le résultat est par conséquent logique.

4.3.8.3. Perspectives

Ce test a permis de mettre en évidence des phénomènes contraires aux « a priori » initiaux que nous pouvons avoir sur ce test. Nous pouvons notamment dire que pour un même serrage, le diamètre influence la transmission de l'effort, mais dans des proportions réduites (6% de mieux maximum). Il serait utile de poursuivre ces tests en augmentant encore le diamètre pour mettre en évidence à quel diamètre se trouve la limite.

4.3.9. Influence de la largeur de l'échantillon

La largeur de l'échantillon a été fixée à 80mm pour les tests des influences précédentes. Il est néanmoins nécessaire de vérifier l'influence de cette largeur sur le comportement de la jonction. Ce test va aussi permettre de faire apparaître si l'effet de bord est conséquent. On devrait logiquement avoir une meilleure efficacité lorsque l'échantillon de carcasse est plus large, car l'effet de bord devrait dans ce cas devenir négligeable.

4.3.9.1. Configurations de l'essai

Nous avons effectué 3 séries de 5 tests avec des largeurs de 60, 80 et 100mm. Le nombre de tiges était fixé à 5 tiges en fonction de la plus faible largeur. La largeur efficace est alors de 33mm. La configuration de test est la suivante :

n=5tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d= 3mm/s=8mm/pp=oui/**L=60, 80, 100mm**/vit=20mm.min^{-1}

4.3.9.2. Résultats

Nous pouvons constater sur la Figure 3.45 une légère croissance de l'efficacité de la jonction quand la largeur augmente. Nous pouvons expliquer cela par l'augmentation de matière sans tige qui permet d'avoir une meilleure efficacité globale. La variation en efficacité mise en évidence pendant ce test est de 6% ((62,1-58,5)/58,5 avec 58,5 la limite basse).

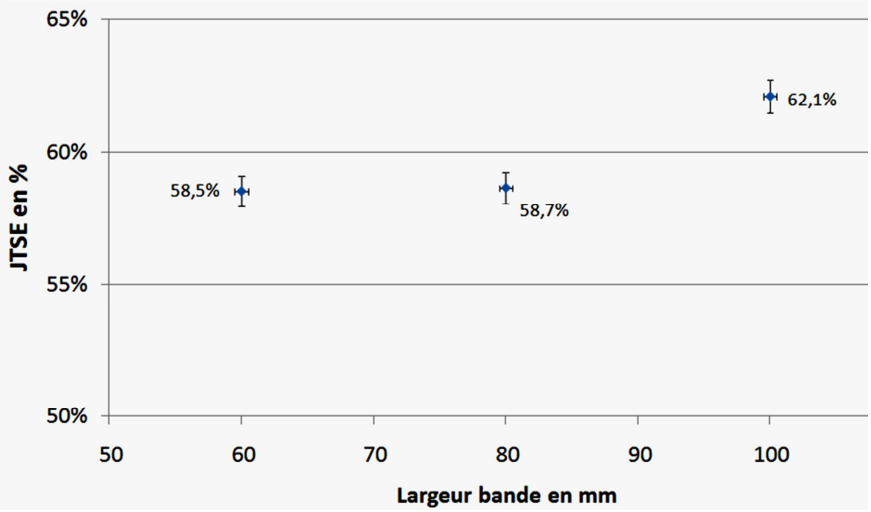

Figure 3.45. JTSE en fonction de la largeur de l'échantillon.

4.3.9.3. Perspectives

Cette tendance serait à confirmer par des tests sur des largeurs plus grandes.

4.3.10. Récapitulatif des tests

L'ensemble des tests est présenté dans le Tableau 3.4.

En nous basant sur les données du tableau représentant l'ensemble des tests qui ont été effectués, nous pouvons proposer une jonction optimisée avec une efficacité optimale :

- Orthogonalité : 4,2°au maximum
- Pré-perçage (pp) : sans
- Profondeur (p) : 35mm minimum
- Épaisseur de la cale pour le serrage (s) : 8mm (plus serré pourrait être mieux)
- Nombre de tiges (n) : 5 tiges
- Diamètre des tiges (d) : 3mm (plus gros pourrait être mieux)
- Largeur échantillon (L) : 100mm

Néanmoins, le nombre de tiges en fonction de la largeur de l'échantillon devra être optimisé pour éviter les effets de bord par la définition de la distance minimale entre les tiges des extrémités et les bords de la carcasse (Figure 3.46).

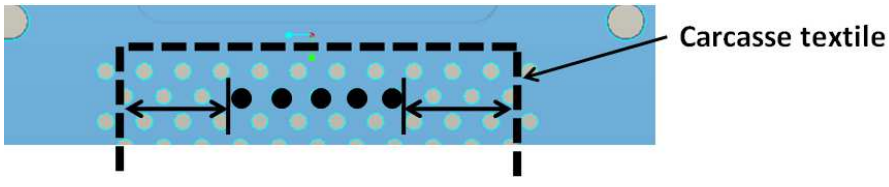

Figure 3.46. Schéma de la distance sans tige à respecter de chaque côté de la rangée.

Tableau 3.4. Récapitulatif des tests effectués.

	Paramètres								Résultats		
	Humidité	**Orthogonalité trame/chaîne**	**Pré-perçage des tiges**	**Profondeur de l'insertion des tiges**	**Cale de serrage de la jonction**	**Nombre de tiges**	**Diamètre des tiges**	**Largeur échantillon**	**Nb essais**	**Effort moyen**	**JTSE moyen**
Influence de l'humidité	**hall de stockage**	Jusqu'à 4,2°	oui	35mm	8mm	8tiges	3mm	80mm	35	39,87	50,9%
	3 semaines dans le laboratoire	Jusqu'à 4,2°	oui	35mm	8mm	8tiges	3mm	80mm	10	38,65	49,3%
Influence de la non orthogonalité trame/chaîne	hall	**0,7°**	oui	35mm	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	39,90	50,9%
	-	**1,4°**	oui	35mm	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	40,50	51,7%
	-	**3,1°**	oui	35mm	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	39,80	50,8%
	-	**4,2°**	oui	35mm	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	39,70	50,6%
Influence du pré-perçage	-	Jusqu'à 4,2°	**oui**	35mm	8mm	8tiges	**3mm**	80mm	35	39,87	50,9%
	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**3mm**	80mm	5	42,72	54,5%
	-	-	**oui**	35mm	8mm	8tiges	**2,6mm**	80mm	5	39,50	50,4%
	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**2,6mm**	80mm	5	39,68	50,6%
Influence du la profondeur d'insertion des tiges	-	-	oui	**15mm**	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	31,16	39,7%
	-	-	oui	**20mm**	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	35,68	45,5%
	-	-	oui	**25mm**	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	38,34	48,9%
	-	-	oui	**30mm**	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	39,50	50,4%
	-	-	oui	**35mm**	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	40,00	51,0%
	-	-	oui	**50mm**	8mm	8tiges	3mm	80mm	5	40,30	51,4%
Influence serrage de la jonction	-	-	oui	35mm	**8mm**	8tiges	3mm	80mm	5	39,92	50,9%
	-	-	oui	35mm	**8,5mm**	8tiges	3mm	80mm	5	38,20	48,7%
	-	-	oui	35mm	**9mm**	8tiges	3mm	80mm	5	36,20	46,2%
	-	-	oui	35mm	**9,5mm**	8tiges	3mm	80mm	5	35,90	45,8%
	-	-	oui	35mm	**10mm**	8tiges	3mm	80mm	5	35,54	45,3%
Influence du nombre de tiges	-	-	oui	35mm	8mm	**1tige**	3mm	80mm	5	8,00	190,4%
	-	-	oui	35mm	8mm	**2tiges**	3mm	80mm	5	13,70	93,2%
	-	-	oui	35mm	8mm	**3tiges**	3mm	80mm	5	18,50	73,4%
	-	-	oui	35mm	8mm	**4tiges**	3mm	80mm	5	23,25	65,1%
	-	-	oui	35mm	8mm	**5tiges**	3mm	80mm	5	27,10	58,7%
	-	-	oui	35mm	8mm	**6tiges**	3mm	80mm	5	32,85	57,9%
	-	-	oui	35mm	8mm	**7tiges**	3mm	80mm	5	36,95	55,0%
	-	-	oui	35mm	8mm	**8tiges**	3mm	80mm	5	40,45	52,1%
	-	-	oui	35mm	8mm	**9tiges**	3mm	80mm	5	44,80	50,8%
	-	-	oui	35mm	8mm	**10tiges**	3mm	80mm	5	45,60	46,2%
Influence du diamètre des tiges	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**2,2mm**	80mm	5	38,13	48,6%
	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**2,4mm**	80mm	5	39,28	50,1%
	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**2,6mm**	80mm	5	40,23	51,3%
	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**2,8mm**	80mm	5	41,55	53,0%
	-	-	**non**	35mm	8mm	8tiges	**3mm**	80mm	5	42,72	54,5%
Influence de la largeur des échantillons	-	-	oui	35mm	8mm	**5tiges**	3mm	**60mm**	5	27,04	58,5%
	-	-	oui	35mm	8mm	**5tiges**	3mm	**80mm**	5	27,10	58,7%
	-	-	oui	35mm	8mm	**5tiges**	3mm	**100mm**	5	28,70	62,1%

4.3.11. Conclusion

Les différentes influences sur l'efficacité de la jonction avec une ligne de tiges peuvent être triées par ordre d'importance. Elles sont présentées dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5. Classement des paramètres en fonction de leur influence sur la JTSE.

Ordre	Désignation	Détails
1	Profondeur d'insertion	La profondeur des points d'attache est le paramètre le plus critique pour l'efficacité de la jonction. En effet, l'efficacité augmente et atteint une asymptote à 35mm de profondeur. En dessous de 35mm, l'efficacité est proportionnelle à la profondeur d'insertion des tiges.
2	Nombre de tiges	Plus le nombre de tiges sur une ligne est grand, plus grand sera l'effort transmis au détriment de l'efficacité qui diminue avec le nombre de tiges qui augmente. La variation constatée est de 43% sur la JTSE.
3	Diamètre des tiges	La variation de JTSE remarquée est de 12%. L'efficacité est meilleure si la tige a un grand diamètre (3mm devant 2,2mm)
4	Serrage de la jonction	Il fait varier l'efficacité de 11%. L'efficacité est meilleure pour une jonction serrée (préférence pour cale de 8mm). L'efficacité peut être meilleure avec une jonction encore plus serrée.
5	Pré-perçage des trous	Le pré-perçage endommage et fait perdre 7% d'efficacité. Ce phénomène a été observé avec un diamètre de tige de 3mm.
6	Largeur échantillon	L'efficacité augmente légèrement. La variation mise en évidence est de 6% pour des échantillons de 60, 80 et 100mm de largeur et 5tiges.
7	Non-orthogonalité trame/chaîne	La non-perpendicularité trame/chaîne n'est pas un paramètre considéré comme influent jusqu'à un angle de 3,6°.
8	Humidité	Ce paramètre n'est pas considéré comme influent.
9	Température	La température ne fait pas varier les résultats.

Cette étude d'influence nous a permis de mettre en évidence les paramètres les plus critiques pour le jonctionnement avec une ligne d'agrafes. Nous observons que les paramètres prépondérants sur l'efficacité JTSE sont : la profondeur d'insertion des tiges qui doit être supérieure à 35mm, le nombre de tiges qui doit bien être choisi en fonction de la largeur de la bande, le serrage qui doit être maximum après avoir inséré les tiges et le diamètre des tiges qui doit être grand.

4.4. Autres configurations testées

Les tests d'influence des différents paramètres nous ont permis de mieux comprendre leur importance sur l'efficacité de la jonction. Cependant, il est nécessaire d'essayer des configurations différentes, notamment avec plusieurs rangées de tiges. C'est pourquoi, nous avons décidé de tester d'autres configurations qui peuvent apporter des informations supplémentaires : deux rangées de tiges espacées et plusieurs rangées de tiges.

4.4.1. Indicateur JTSE

L'indicateur d'efficacité JTSE reste inchangé et est calculé sur la base d'une rangée de tiges. L'indicateur est représenté sur la Figure 3.47.

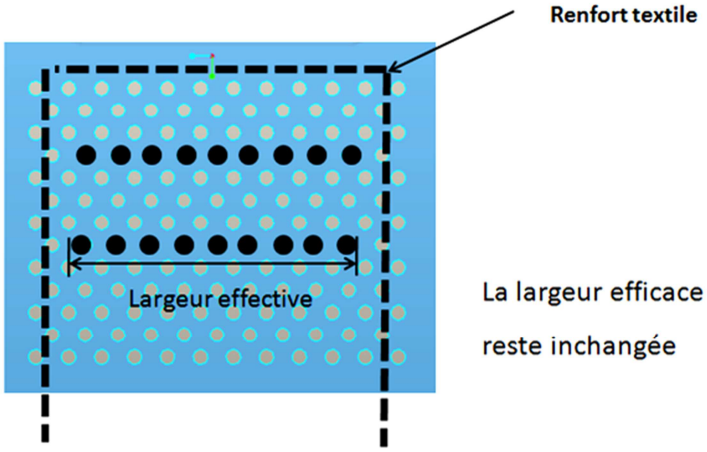

Figure 3.47. Indicateur JTSE pour plusieurs rangées.

4.4.2. Test de référence

Pour les différents tests que nous allons présenter ici, nous allons les comparer à une configuration de référence Cette comparaison nous permettra notamment de remarquer les différences sur la déformation de la jonction, la rupture de l'échantillon ainsi que la valeur d'efficacité de la jonction.

4.4.2.1. Configurations de l'essai

Ce test a été réalisé avec 8 tiges sur une rangée (Figure 3.48) :

n=8tiges/ligne=7/p=35mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

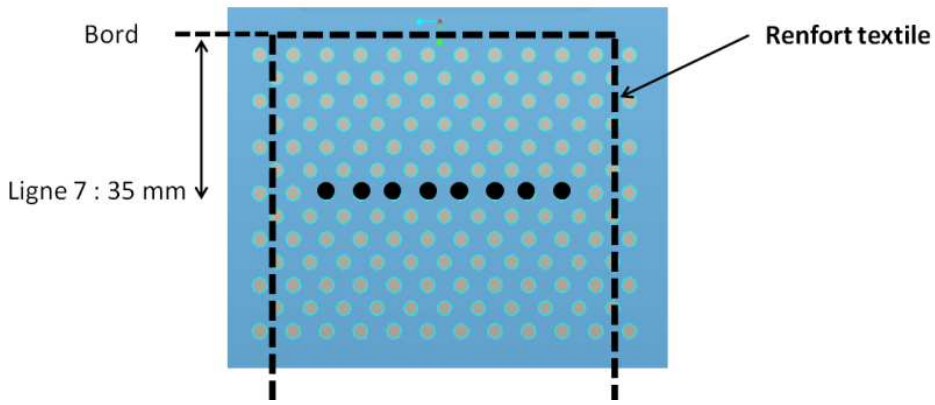

Figure 3.48. Configuration de l'essai de référence avec 8 tiges sur une rangée.

4.4.2.2. Résultats

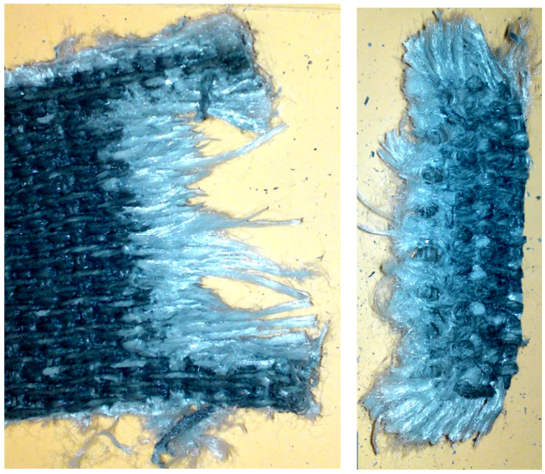

Figure 3.49. Échantillon de référence rompu.

Nous pouvons remarquer sur la Figure 3.49 que la rupture des fils de chaîne n'est pas homogène. En effet, on peut apercevoir des fils ayant une longueur plus importante. Par ailleurs, on peut constater sur le bout arraché que les fils de trame sont peignés vers la fin de la traction.

Nous avons obtenu à ce test une efficacité de 51% et une déformation à la rupture de 24%. Cela est remarquable sur la Figure 3.50.

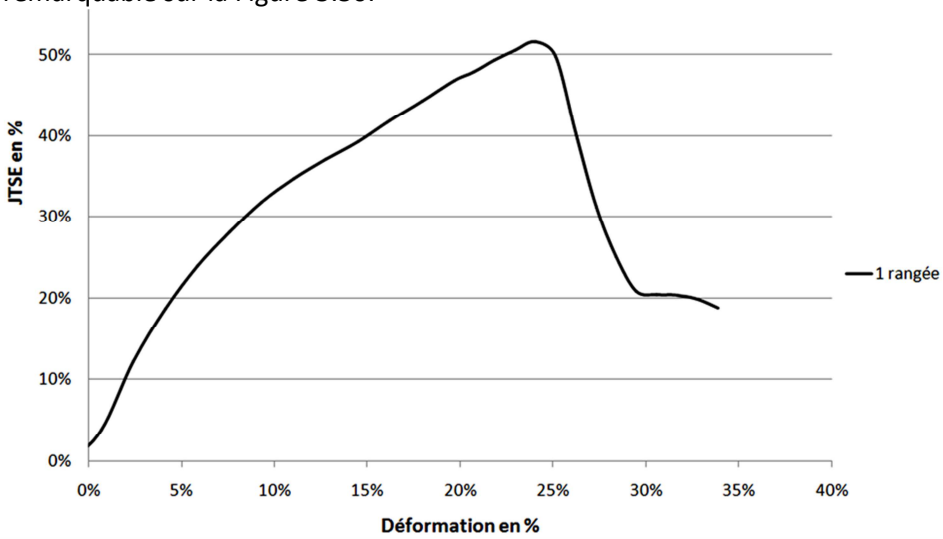

Figure 3.50. Courbe de traction de la configuration de référence avec 8 tiges sur une rangée.

4.4.3. Deux rangées espacées de 20 et 40mm

Ce test nous permet de vérifier si l'ajout d'une ligne supplémentaire apporte une amélioration sur la jonction. La Figure 3.51 présente la configuration de test.

4.4.3.1. Configurations de l'essai

Ce test a été réalisé avec deux rangées de tiges alignées et espacées de 20mm (Figure 3.51) puis 40mm. Pour chaque cas, deux tests ont été menés et un troisième si les résultats avaient plus de 2% de différence sur la JTSE. La configuration d'essai est la suivante :

n=2 x 8 tiges/ligne=3 et 7/p=15 et 35mm/e=7,5mm/d=3mm/s=8mm/
pp=oui/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

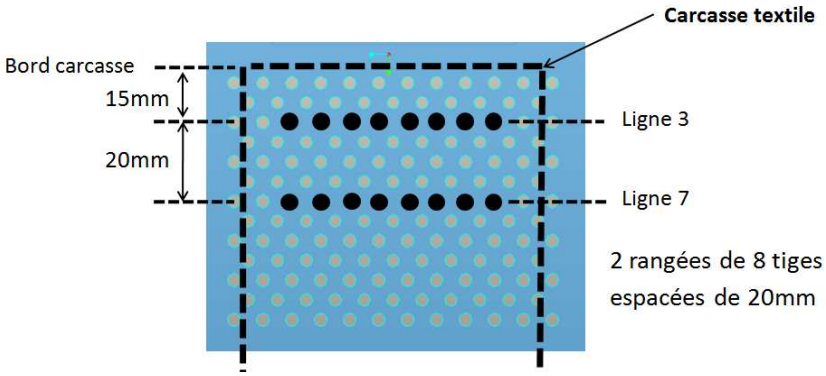

Figure 3.51. Configuration pour deux rangées de tiges espacées de 20mm.

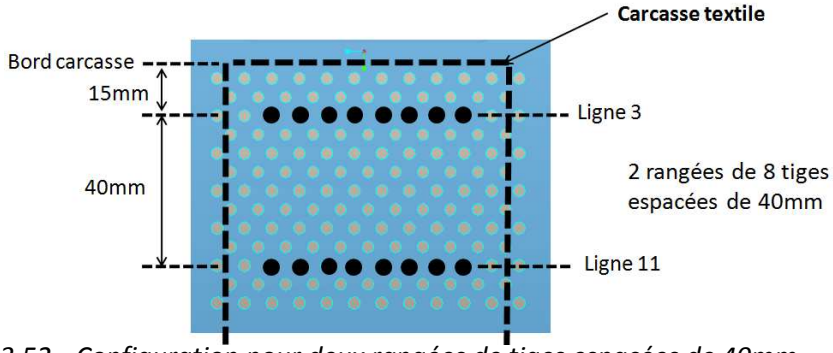

Figure 3.52. Configuration pour deux rangées de tiges espacées de 40mm.

4.4.3.2. Résultats

4.4.3.2.1. Cas d'un espace de 20mm

D'après la Figure 3.53 sur le morceau arraché, on s'aperçoit que l'échantillon est bien sectionné à la première rangée de tiges. En revanche, tous les fils de chaîne n'ont pas cassé. Ils ont été peignés. Par ailleurs, le morceau arraché n'est que faiblement déformé. En outre, on remarque que la rangée supérieure ne s'est pas déplacée dans l'échantillon : la rangée n'a été que peu sollicitée. Le peignage des fils de chaîne quand a lui a été amorcé par la rangée supérieure de tiges. La carcasse s'est ensuite comme délaminée. L'effort transmis est de 54kN. Théoriquement, la jonction devrait transmettre 78.4kN (56mm de largeur effective). L'efficacité de la jonction caractérisée par l'indicateur JTSE est de 69%, ce qui est bien plus élevé qu'avec une seule ligne. On peut donc en déduire que la deuxième rangée apporte une augmentation de l'efficacité.

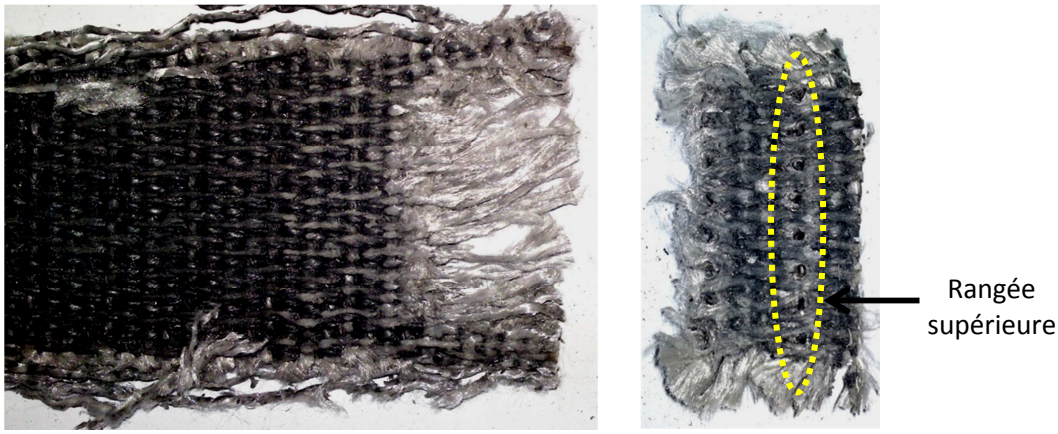

Figure 3.53. Résultat de l'échantillon cassé pour un espace de 20mm.

4.4.3.2.2. Cas d'un espace de 40mm

On remarque sur la Figure 3.54 que le comportement de la jonction est similaire à celle avec deux rangées espacées de 20mm : rupture à la première rangée et morceau arraché presque intact.

L'effort transmis est de 53kN. L'efficacité JTSE est par conséquent de 68%, ce qui bien plus élevé qu'avec une seule ligne. Dans ce cas, la deuxième rangée permet également une augmentation de l'efficacité de la jonction.

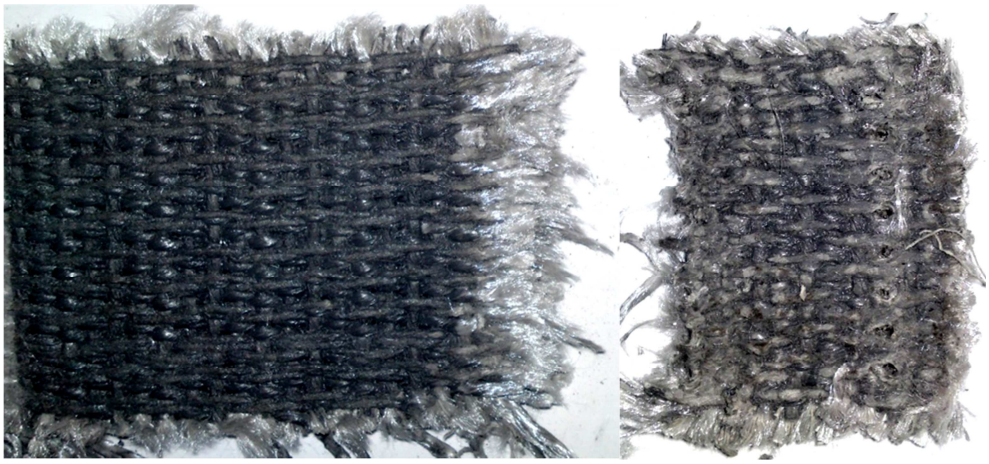

Figure 3.54. Résultat de l'échantillon cassé pour un espace de 40mm.

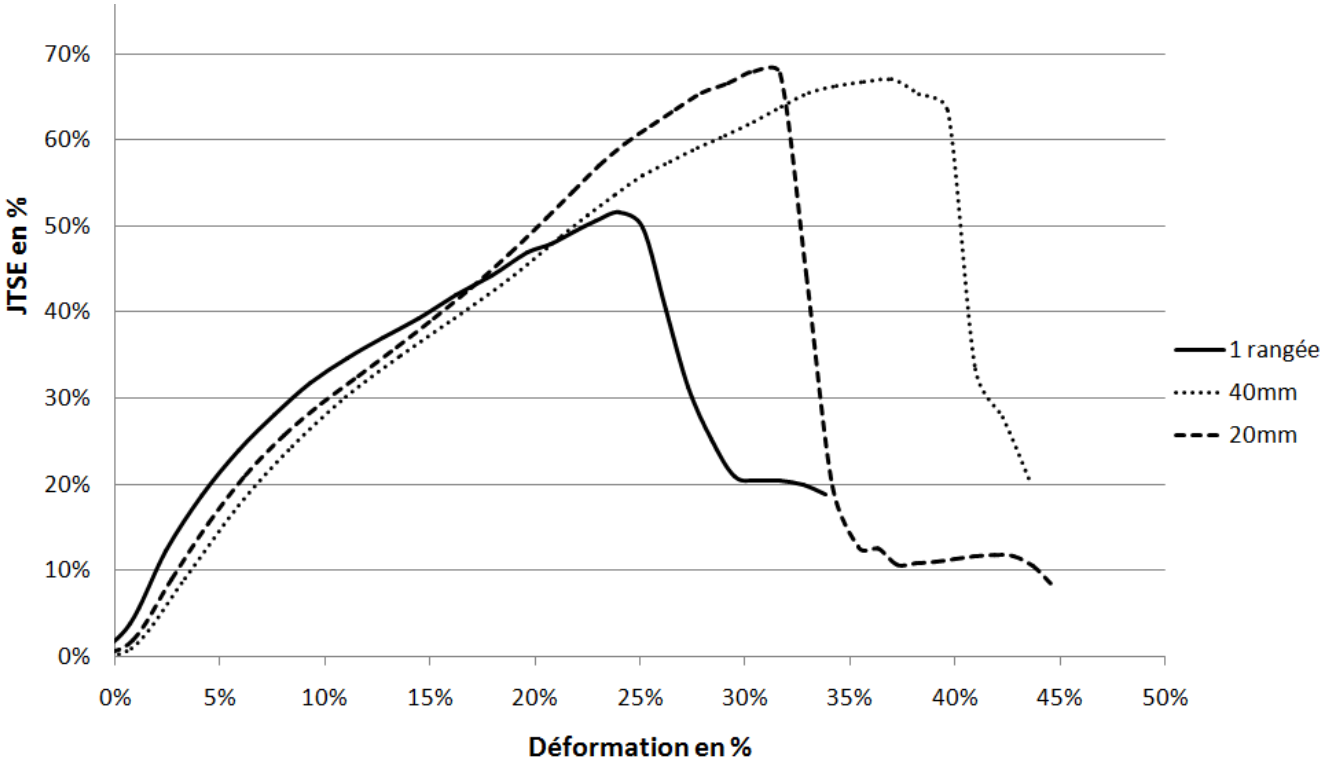

Figure 3.55. Courbes en traction des essais avec deux rangées espacées de 20 et 40mm.

Sur le graphique de la Figure 3.55, on peut constater que les courbes moyennes de 20mm et 40mm d'espace ne présentent pas de différence flagrante sur l'efficacité. En revanche, la déformation des jonctions avec deux rangées de tiges semble plus importante que la jonction composée d'une seule rangée. En effet, avec une rangée de tiges, la déformation à la rupture est de l'ordre de 25%, alors qu'avec deux rangées de tiges, la déformation est supérieure à 30%, voire 37% pour les rangées espacées de 40mm. Par conséquent, on peut noter une tendance où la déformation augmente avec l'espace entre les rangées.

En conclusion, ce test nous permet de dire que deux rangées de tiges permettent d'avoir une meilleure efficacité de la jonction. Cependant, l'espace de 40mm n'est pas plus intéressant que celui de 20mm en termes d'efficacité.

4.4.3.3. Perspectives

Il s'agirait à l'issue de ce test, d'effectuer des tests avec 10 et 15mm d'espace entre les deux rangées pour valider la tendance constatée.

4.4.4. Deux rangées espacées de 5mm

Ce test a déjà été effectué dans les essais préliminaires avec des tiges de diamètre 3mm. Afin de laisser plus d'espace entre les tiges, nous avons utilisé des tiges trempées de diamètre inférieur, soit 2,5mm. L'échantillon a été laissé libre pendant l'insertion des tiges, afin de laisser de la place pour l'expansion de la matière lorsque les tiges y sont insérées.

4.4.4.1. Configurations de l'essai

Ce test a été réalisé avec deux rangées de tiges en quinconce espacées de 5mm (Figure 3.56)

La configuration de test est la suivante :

n=7 et 8 tiges/ligne=6 et 7/p=30 et 35mm/e=7,5mm/**d=2,5mm**/s=8mm/
pp=non/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

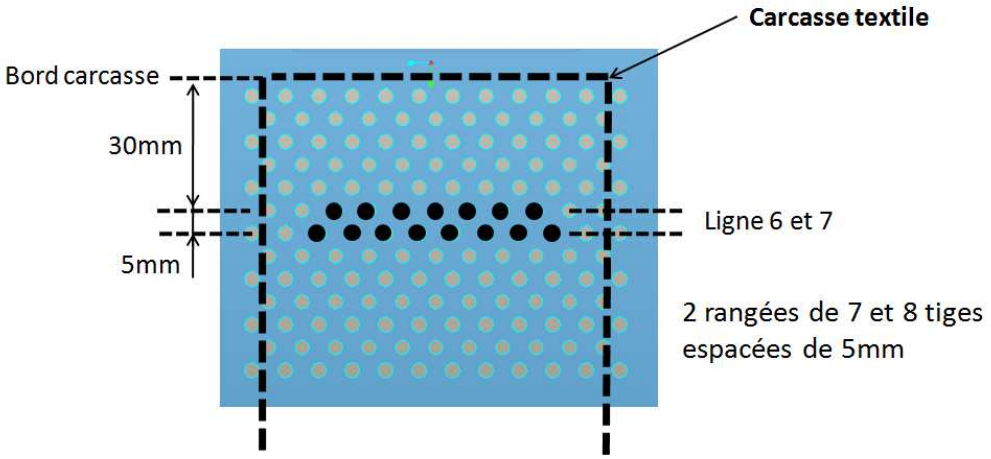

Figure 3.56. Configuration de deux rangées espacées de 5mm.

4.4.4.2. Résultats

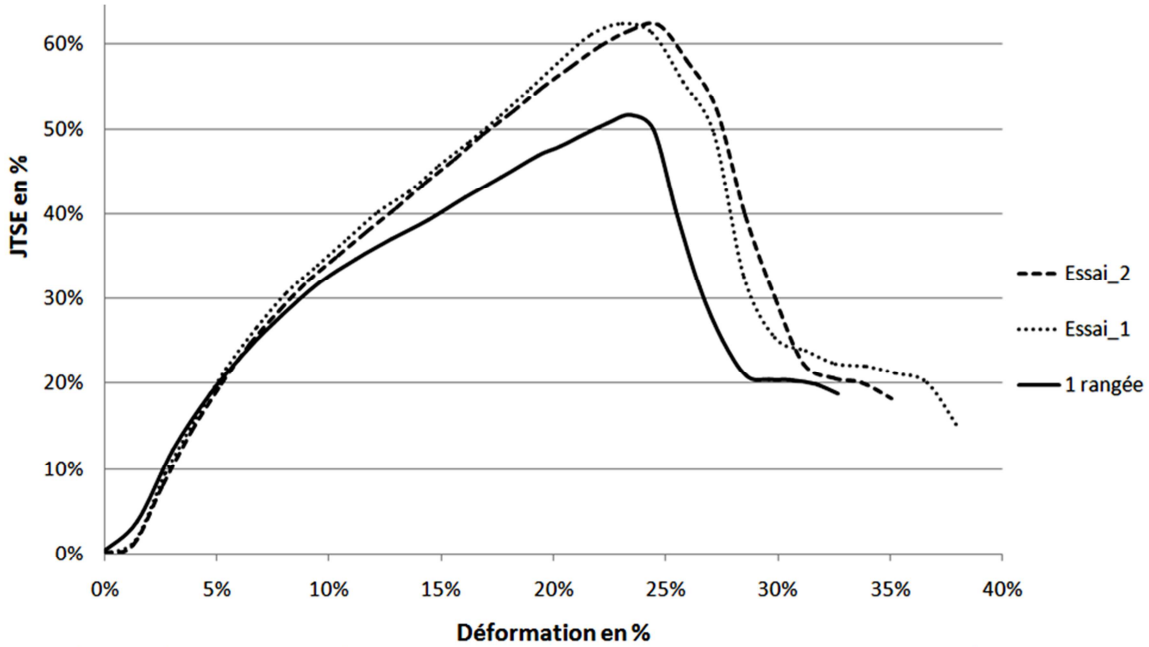

Figure 3.57. Courbes de traction des essais avec deux rangées espacées de 5mm.

On constate sur le graphique de la Figure 3.57 que la jonction se comporte de la même manière en traction avec une ou deux rangées. Cependant, on peut noter l'augmentation de l'efficacité de la jonction avec deux rangées.

L'effort moyen transmis avec deux rangées est de 49.4kN. L'efficacité de la jonction est alors de 63% (largeur effective de 56mm), ce qui bien plus élevé qu'avec une seule ligne (52%). On peut donc déduire que l'ajout d'une deuxième ligne augmente l'efficacité de la jonction.

D'après la Figure 3.58, on constate que la rupture est de la même forme que celle de la jonction avec une rangée de tiges (Figure 3.49 p. 64). En effet, les fils de chaîne sont rompus progressivement et la partie arrachée comporte aussi la trame peignée sur les côtés.

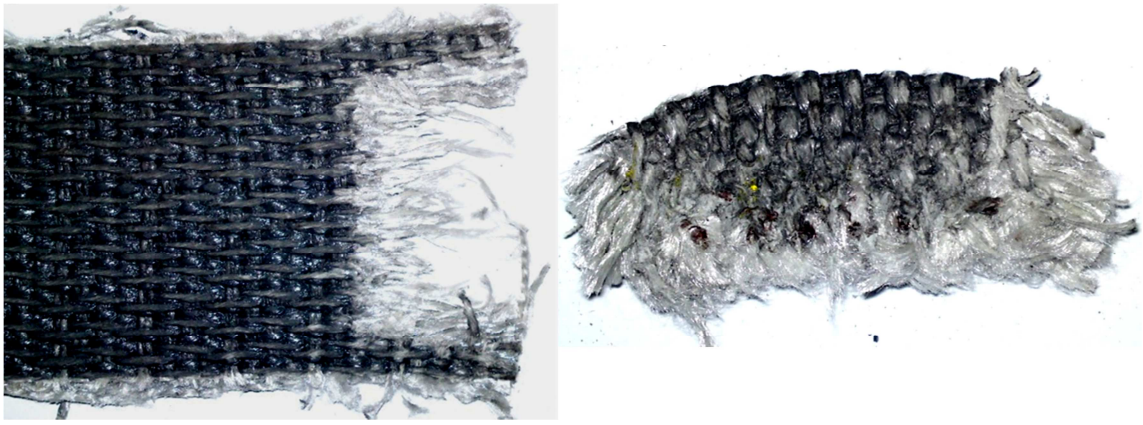

Figure 3.58. Échantillon cassé pour deux rangées espacées de 5mm.

4.4.4.3. Perspectives

Nous pouvons faire des tests d'influence avec les deux rangées de tiges.

4.4.5. Trois et quatre rangées espacées de 5mm

Nous avons testé ces deux configurations avec des tiges trempées de diamètre de 2,5mm, mais nous nous sommes limités à 7 tiges au lieu de 8 sur une rangée afin de limiter l'effet de bord. Nous avons pris comme référence un essai avec 1 rangée de 7 tiges. Ces deux tests ont permis d'étudier l'influence de l'augmentation de rangées sur le comportement de la jonction.

4.4.5.1. Configurations de l'essai de trois rangées espacées de 5mm

Ce test a été réalisé avec trois rangées de tiges décalées dont les rangées sont espacées de 5mm conformément à la Figure 3.59. La configuration de test est la suivante :

n=7, 6 et 7tiges/ligne=6, 7 et 8/p=30, 35 et 40mm/e=7,5mm/**d=2,5mm**/s=8mm/
pp=non/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

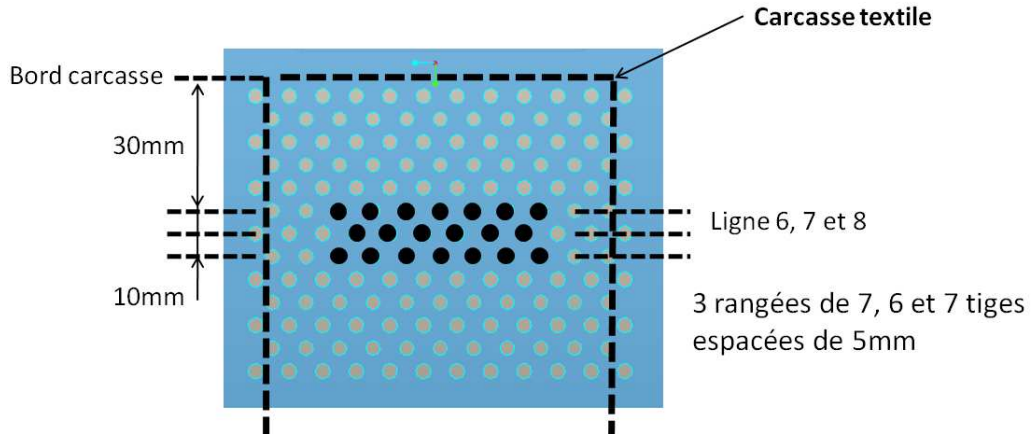

Figure 3.59. Configuration de trois rangées espacées de 5mm.

4.4.5.2. Configurations de l'essai de quatre rangées espacées de 5mm

Ce test a été réalisé avec quatre rangées de tiges décalées dont les rangées sont espacées de 5mm conformément à la Figure 3.60. La configuration de test est la suivante :

n=7, 6,7 et 6 tiges/ligne=6, 7, 8 et 9/p=30, 35, 40, 45mm/e=7,5mm/**d=2,5mm**/s=8mm/
pp=non/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

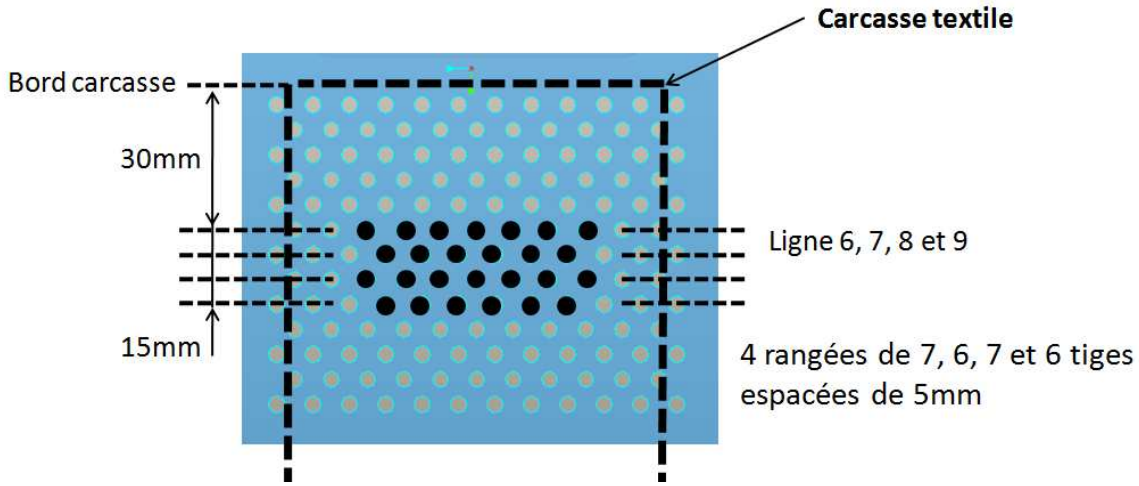

Figure 3.60. Configuration de quatre rangées espacées de 5mm.

4.4.5.3. Résultats

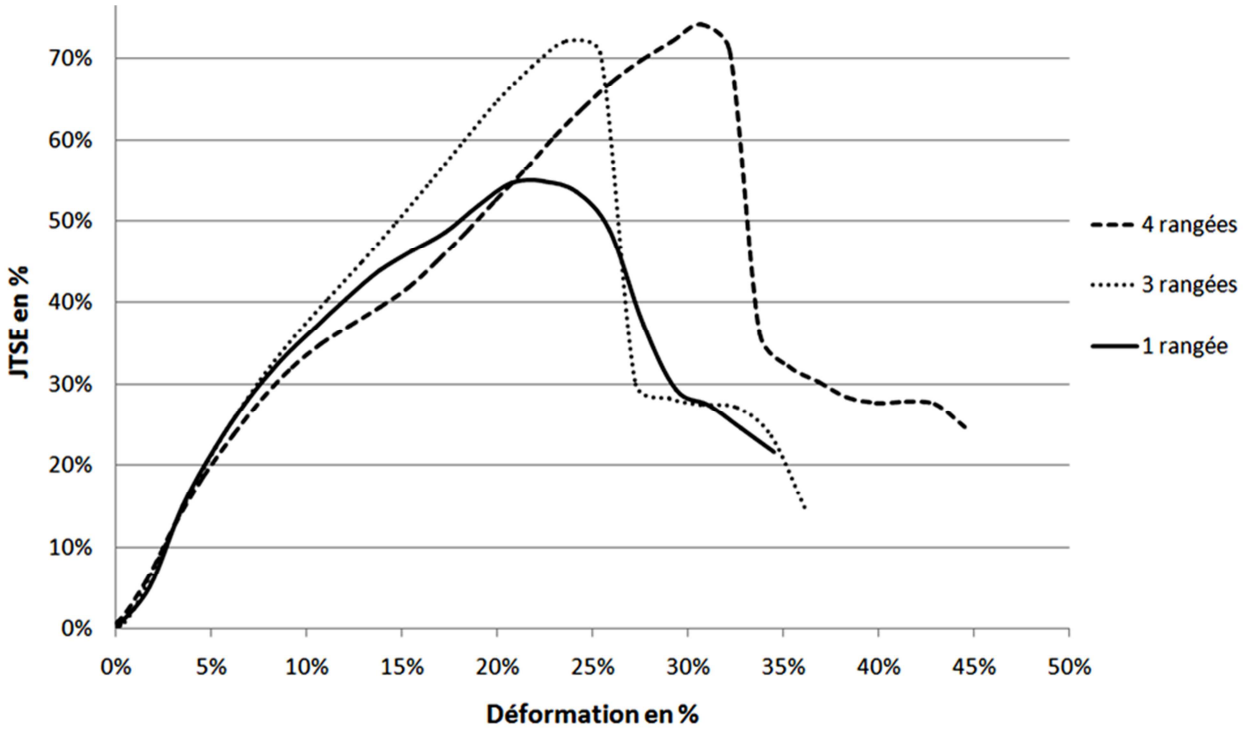

Figure 3.61. Courbes de traction pour trois rangées espacées de 5mm.

On remarque sur le graphique de la Figure 3.61 que les jonctions mécaniques avec 3 et 4 rangées de tiges ont une meilleure efficacité que la jonction avec une seule rangée. En effet, la JTSE des jonctions à plusieurs rangées de tiges est supérieure à 73% (48mm de largeur efficace) contre 55% pour la jonction avec une seule rangée. En revanche, il n'y a pas de réelle différence entre 3 et 4 rangées en termes de JTSE. Par ailleurs, on peut constater que l'ajout de rangées supplémentaires fait augmenter la déformation à la rupture de la jonction : 32% pour 4 rangées et 24% pour 3 rangées contre 22% pour une seule rangée.

Sur la Figure 3.62, on peut constater que les fils de chaîne ne sont pas rompus d'une manière homogène. Sur le morceau arraché, on remarque les fils de trame peignés. Par ailleurs, on peut voir les trous des tiges des lignes 6 et 7.

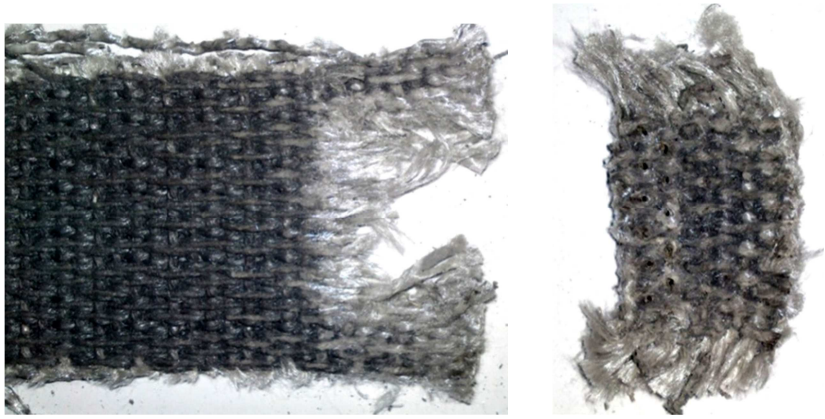

Figure 3.62. Échantillon cassé pour trois rangées espacées de 5mm.

Sur la Figure 3.63, on peut voir que les fils de chaîne ont cassé au dessus de la rangée supérieure de tiges, ce qui implique que l'insertion des 4 rangées de tiges a favorisé la décohésion de la matière. Les fils de chaîne ont cassé après la dernière rangée (la plus proche de bord). En outre, on peut voir sur la partie détachée les trous résiduels des rangées supérieures.

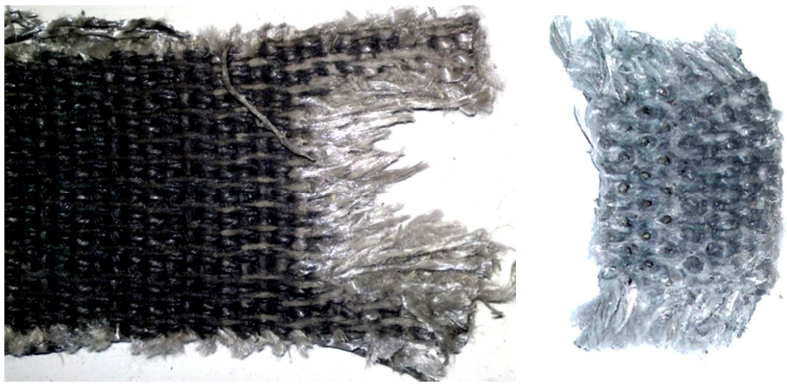

Figure 3.63. Échantillon cassé pour quatre rangées espacées de 5mm.

4.4.5.4. Perspectives

Afin de vérifier si la déformation continue à augmenter avec les nombre de rangées, on peut aussi envisager de tester des configurations avec un espace de 10mm entre chaque rangée.

4.4.6. Quatre rangées de tiges en diagonale

Cet essai est un essai différent des configurations que l'on a pu trouver dans l'industrie.

Comme le test précédent, nous avons testé cette configuration avec des tiges trempées de diamètre de 2,5mm. Cette configuration nous permettra de voir l'influence d'un placement différent sur l'efficacité de la jonction.

4.4.6.1. Configurations de l'essai

Ce test a été réalisé avec 4 rangées de 5 tiges décalées suivant la Figure 3.64.

La configuration de test est la suivante :

n=4 x 5 tiges/ligne=2, 3, 5 et 6/p=10, 15, 25 et 30mm/e=7,5mm/**d=2,5mm**/s=8mm/
pp=non/L=80mm/vit=20mm.min^{-1}

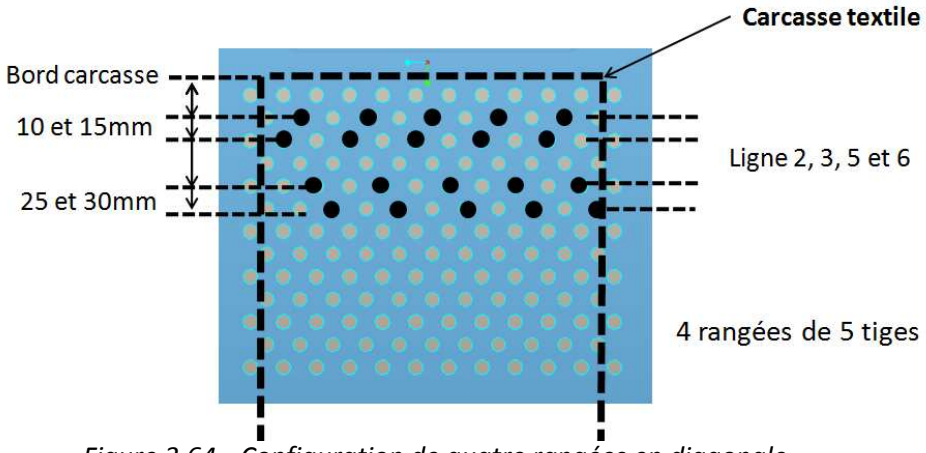

Figure 3.64. Configuration de quatre rangées en diagonale.

4.4.6.2. Résultats

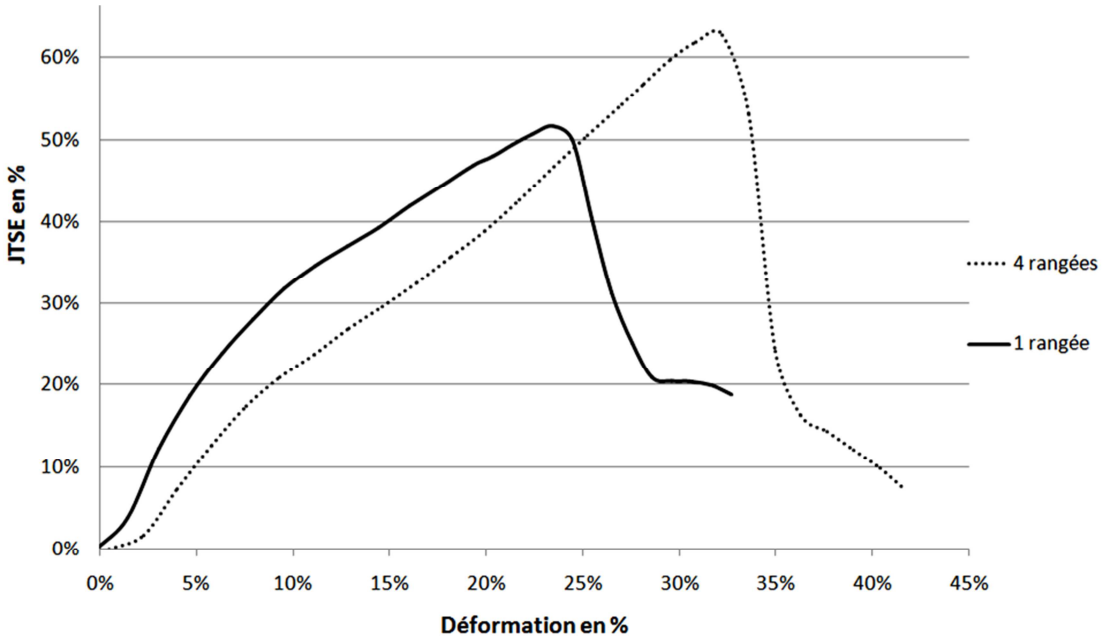

Figure 3.65. Résultats quatre rangées en diagonale.

On remarque sur le graphique de la Figure 3.65 que la jonction avec les quatre rangées a un comportement global similaire à la jonction composée d'une seule rangée de tiges. En revanche, la déformation à la rupture est plus importante pour la jonction à quatre rangées de tiges.

Sur la Figure 3.66, on remarque que les fils de chaîne de la carcasse ont été peignés. Ceci est dû à la faible profondeur des deux rangées supérieures : lignes 2 et 3. L'insertion des tiges fragilise la carcasse et favorise ainsi le peignage des fils de chaîne.

L'efficacité de cette jonction est de 63% (largeur effective : 71,25mm et 62,6kN). On peut dire que cette configuration a une meilleure efficacité que celle composée d'une seule rangée, mais est moins efficace que celles avec 3 et 4 rangées.

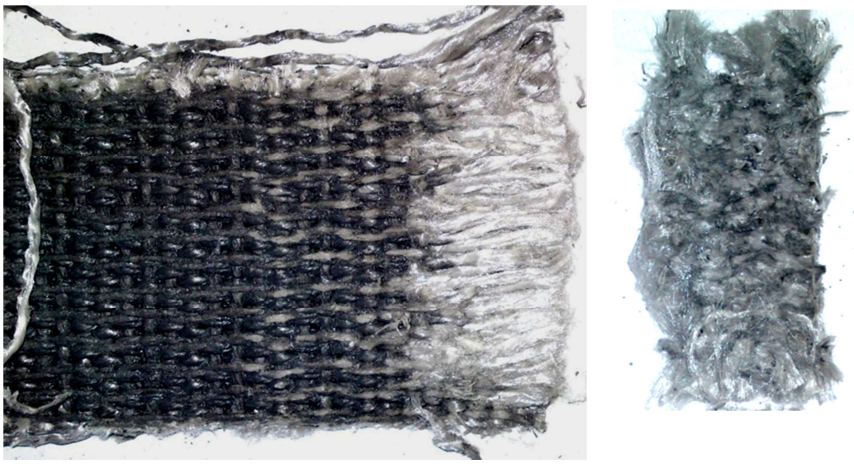

Figure 3.66. Échantillon cassé pour quatre rangées en diagonale.

4.4.6.3. Perspectives

Il serait intéressant de tester cette configuration avec une profondeur plus importante.

4.4.7. Conclusion

Nous pouvons voir le récapitulatif des essais réalisés avec plusieurs rangées dans le Tableau 3.6. Tous les tests ont été réalisés avec une cale de serrage de 8mm et une largeur d'échantillon de 80mm.

Tableau 3.6. Récapitulatif des tests avec plusieurs rangées de tiges.

Paramètres							Résultats			
	Pré-perçage des tiges	Profondeur de l'insertion des tiges	Nombre de rangées	Nombre de tiges	Diamètre des tiges	Largeur efficace	Déformation à la rupture	Effort moyen	JTSE moyen	Effort moyen transmis par tige
Test de référence avec une rangée	**oui**	**35mm**	**1**	**8 tiges**	**3mm**	**56mm**	**24%**	**40kN**	**51%**	**5kN**
Deux rangées espacées de 20mm	oui	15 et 35mm	2	16 tiges	3mm	56mm	30%	54kN	69%	3,4kN
Deux rangées espacées de 40mm	oui	15 et 55mm	2	16 tiges	3mm	56mm	37%	53kN	68%	3,3kN
Test de référence n°2 avec une rangée	**non**	**35mm**	**1**	**8 tiges**	**3mm**	**56mm**	**22%**	**43kN**	**55%**	**5,4kN**
Deux rangées espacées de 5mm	non	30 et 35mm	2	15 tiges	2,5mm	56mm	24%	49kN	63%	3,3kN
Trois rangées espacées de 5mm	non	30, 35 et 40mm	3	20 tiges	2,5mm	48mm	24%	48kN	72%	2,4kN
Quatre rangées espacées de 5mm	non	30, 35, 40 et 45mm	4	26 tiges	2,5mm	48mm	32%	49kN	73%	1,9kN
Quatre rangées divers	non	10, 15, 25 et 30mm	4	20 tiges	2,5mm	71mm	32%	63kN	63%	3,2kN

En conclusion de ces essais, nous pouvons dire que l'efficacité est plus importante avec plusieurs rangées de tiges. En revanche, c'est avec une rangée que l'effort moyen transmis par tige est le plus important.

Nous pouvons également remarquer qu'il n'y a pas de différence réelle de JTSE entre trois et quatre rangées espacées de 5mm.

Par ailleurs, l'augmentation de l'espace entre deux rangées accroît l'efficacité de la jonction et la déformation à la rupture.

Il serait nécessaire de poursuivre ces essais avec un plan d'expériences pour déterminer une configuration optimale avec plusieurs rangées de tiges.

4.5. Phénomènes observés

4.5.1. Chaîne sectionnée

Le sectionnement des fils (Figure 3.67) de la carcasse textile est visible lorsque les tiges sont insérées très proches les unes des autres et quand la matière est serrée. Le pré-perçage des trous pour l'insertion des tiges endommage alors abondamment la structure et l'efficacité qui s'en suit est grandement réduite (Figure 3.71).

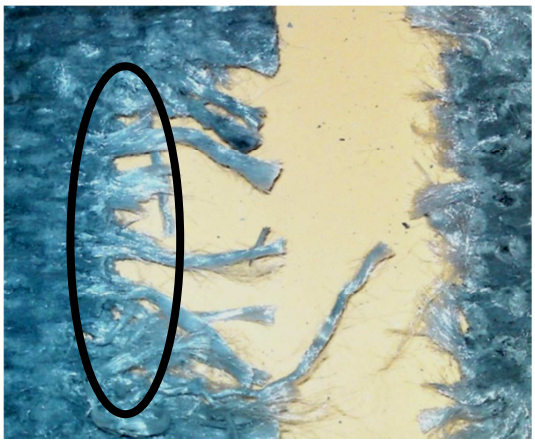

Figure 3.67. Chaîne sectionnée.

4.5.2. Trame rompue

Lorsque les points d'attache sont trop éloignés les uns des autres, la concentration de contrainte sur la carcasse textile est si grande que les fils de trame ne résistent pas à l'effort appliqué.

Intervient alors le phénomène où les fils de trame se rompent par paquet (Figure 3.68) après s'être légèrement déplacés. Ce phénomène est visible sur la Figure 3.71.

Figure 3.68. Trame rompue.

4.5.3. Rupture progressive des fils de chaîne

Après l'insertion des tiges dans la matière, certains fils de chaîne sont fragilisés et leur rupture est amorcée. Lors de l'effort en traction, les fils déjà amorcés se rompent et les fils de chaîne se rompent progressivement jusqu'à ce qu'il n'en reste plus (Figure 3.69). On peut voir ce phénomène sur la Figure 3.71.

Les tiges semblent être à une meilleure distance les unes des autres.

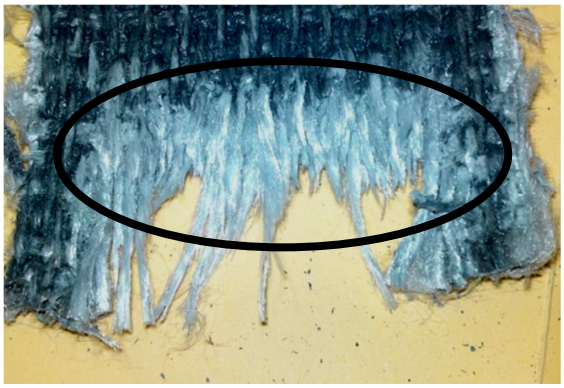

Figure 3.69. Chaîne rompue.

4.5.4. Trame peignée

Après la rupture des fils de chaîne, seuls les fils de trame maintiennent encore le morceau (Figure 3.70) à l'échantillon de carcasse. L'effort nécessaire pour peigner ces fils dépend directement de leur maintien dans l'échantillon. On peut observer ce phénomène sur la Figure 3.71 avec le petit plateau en fin d'essai.

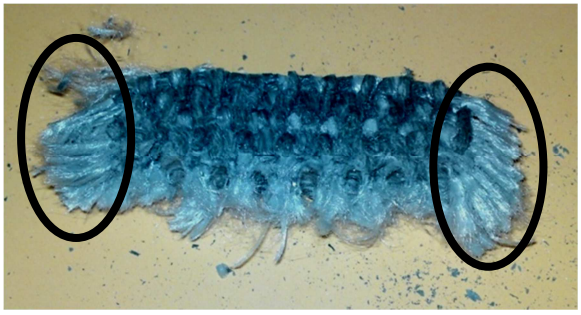

Figure 3.70. Trame peignée.

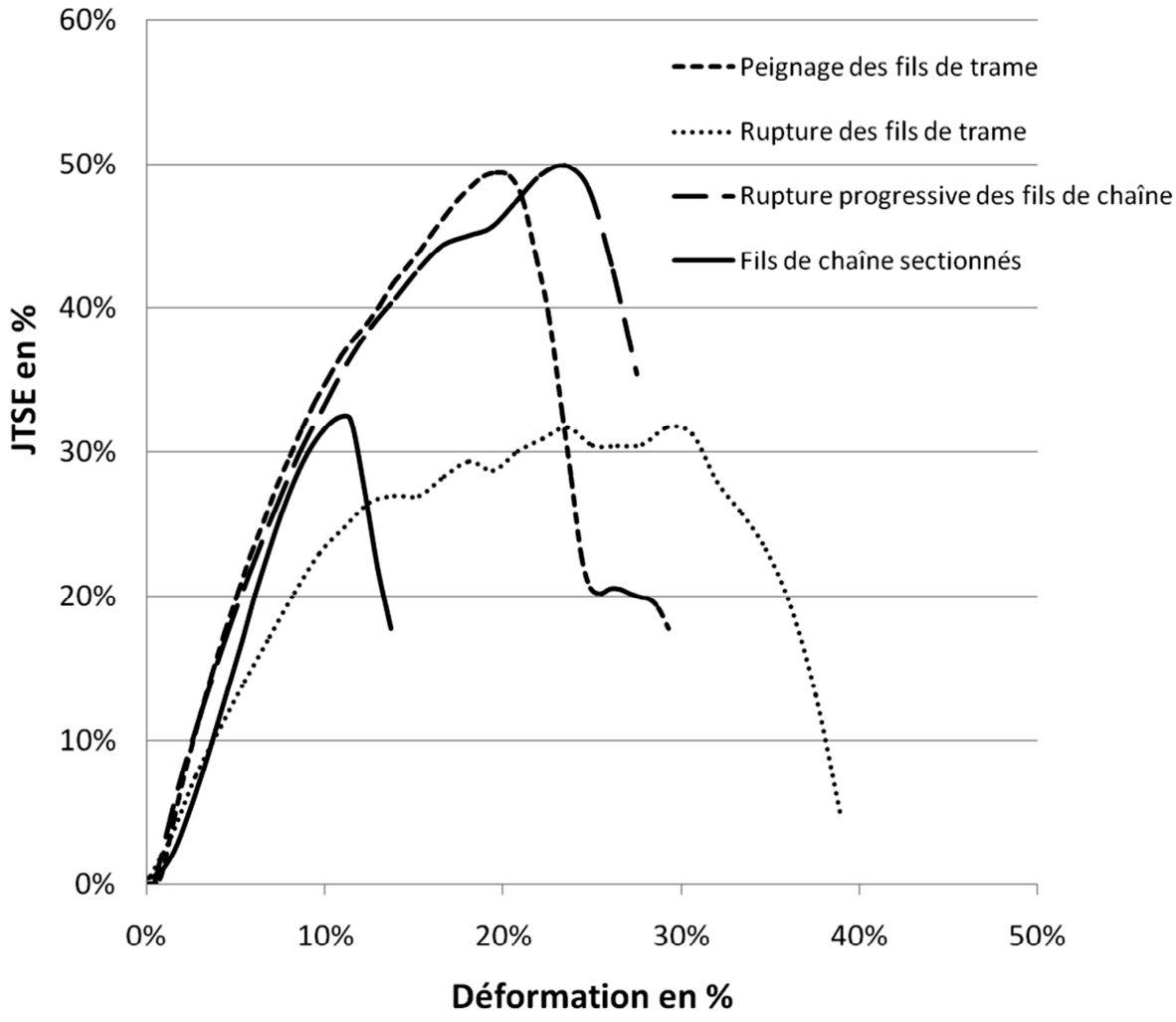

Figure 3.71. Comparaison des phénomènes de rupture de la jonction.

4.5.5. Tiges pliées

Après l'essai de traction, nous avons constaté que les tiges d'une même ligne ne sont pas déformées avec la même amplitude. En effet, il était remarquable que les tiges sur les bords fussent plus déformées que celles du centre de la même ligne. On peut observer ce phénomène sur la Figure 3.72.

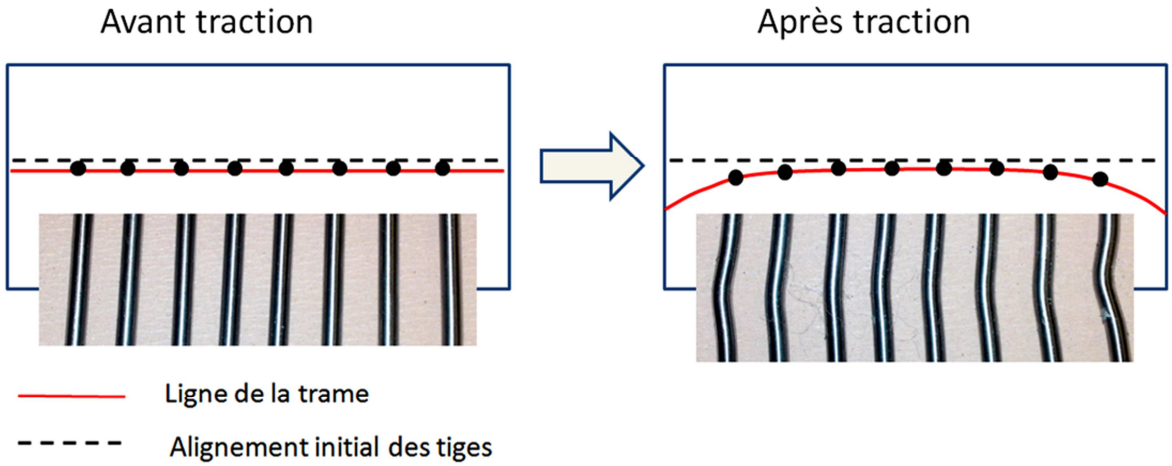

Figure 3.72. Tiges d'une même ligne déformée.

Grâce à cette observation, nous pouvons dire que les tiges des bords sont plus sollicitées avant celles du centre. Il serait donc nécessaire de vérifier à une échelle plus grande comment sont déformées les tiges et si le phénomène est proportionnel à la largeur de tiges insérées ou si ce phénomène est permanent.

4.6. Conclusion

Dans cette section, nous avons utilisé un montage expérimental original afin de comprendre le comportement de la jonction mécanique par agrafage.

Après avoir vérifié que la distribution des essais suivait une loi Normale, nous avons étudié l'influence des différents paramètres présents dans une telle jonction. Nous avons pu mettre en évidence les paramètres les plus importants sur l'efficacité de la jonction mécanique. La profondeur d'insertion des tiges, le nombre de tiges, le serrage de la jonction, le diamètre des tiges et la largeur de l'échantillon sont les paramètres qui peuvent être considérés comme influents sur l'efficacité de la jonction mécanique. À l'issue de l'étude expérimentale concernant l'influence des paramètres, nous avons pu proposer une jonction optimisée en considérant l'efficacité de la jonction.

De plus, nous avons pu remarquer différents phénomènes de rupture pouvant se présenter dans le cas de jonction par agrafage : la chaîne sectionnée à cause de l'insertion des tiges lorsqu'elles sont trop proches les unes des autres, la trame rompue par paquets lorsque les tiges sont trop espacées les unes des autres, le peignage de la trame à la fin de l'essai lorsque les fils de chaîne ont cassé et la rupture progressive des fils de chaîne dans une configuration optimale. Nous avons par ailleurs pu constater que les tiges d'une rangée ne sont pas déformées de la même manière : les tiges des extrémités sont soumises à un effort plus important que celles du centre de la rangée.

4.7. Perspectives

Tout d'abord, nous pouvons dire que les résultats obtenus représentent une avancée significative. Cependant, pour aller plus loin dans l'analyse, il faudrait approfondir les tests avec un nouveau montage spécifique (nouveaux blocs usinés). Ce nouveau montage nous permettrait d'essayer des configurations avec des tiges positionnées différemment et d'une manière novatrice, qui ne peuvent pas être reproduites avec ce montage spécifique.

Par ailleurs, il serait intéressant de créer un montage pour faire varier d'une manière plus précise la distance entre deux tiges. En effet, cela nous permettrait de trouver un optimum pour avoir la meilleure proportion nombre de tiges/motif d'armure de la carcasse.

Enfin, à la suite de ces tests, nous avons eu un bon aperçu de tous les phénomènes de la rupture de l'échantillon. Nous avons pu notamment remarquer la déformation de la carcasse textile pendant l'essai de traction. Il serait intéressant d'observer ces déformations et surtout de pouvoir les quantifier. Nous aurions alors un point de vue global sur le comportement de la jonction. D'autre part, il serait aussi judicieux d'avoir un point de vue local sur chaque point d'attache.

5. Photoélasticité

5.1. Principe

La photoélasticité est la science qui étudie les effets de la lumière sur les déformations de corps élastiques. Elle a été découverte en 1813 par Seebeck [36] qui montra qu'un corps isotrope transparent est semblable à un cristal artificiel lorsqu'il est soumis à des efforts. Le terme de biréfringence, appelée par Brewster « biréfringence accidentelle par déformation », est alors apparu. Plusieurs personnes ont utilisé la photoélasticité par la suite et c'est en 1930 que l'on trouve le premier ouvrage sur la photoélasticité par Coker et Filon [14]. Bien d'autres ouvrages de référence sont alors publiés sur le sujet [23], [30], [41] et [17].

La technique expérimentale qui utilise la photoélasticité pour mesurer les déformations d'une pièce s'appelle la photoélasticimétrie. La mesure de ces déformations peut être effectuée par deux méthodes différentes, la photoélasticimétrie par transmission (Figure 3.73) [19] et la photoélasticimétrie par réflexion (Figure 3.74) [19]. C'est la méthode par réflexion qui nous intéresse.

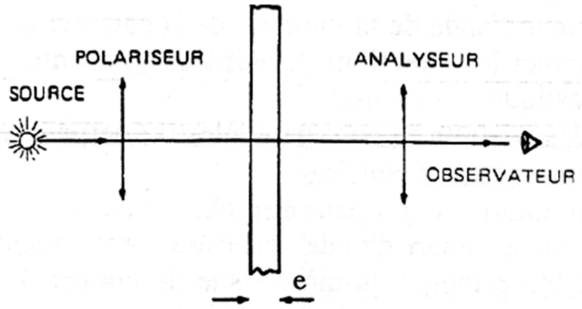

Figure 3.73. Photoélasticimétrie par transmission.

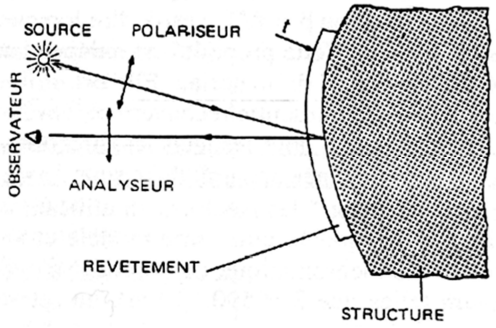

Figure 3.74. Photoélasticimétrie par réflexion.

Le matériau biréfringent est collé sur une surface rendue réfléchissante sur la pièce à étudier (Figure 3.74). Une lumière polarisée est dirigée sur la surface de la pièce à étudier. La lumière polarisée traverse le matériau biréfringent et se réfléchit sur la pièce rendue réfléchissante. En traversant le matériau biréfringent, les deux composantes de l'onde lumineuse sont modifiées et un retard entre ces deux composantes va être visible à travers l'analyseur. Ce retard est directement proportionnel à la déformation du matériau biréfringent, donc de la pièce à étudier. Il faut néanmoins noter que le matériau ne doit pas être plus rigide que la pièce à étudier, sinon il faussera les mesures.

L'image de la lumière sur le matériau biréfringent solidaire de la pièce à étudier va donner un champ de couleur qui est lié aux déformations de la pièce. En connaissant les caractéristiques mécaniques de la pièce, on peut alors remonter aux contraintes en chaque point de cette pièce soumise alors à un effort. Ce procédé est très largement utilisé pour la détermination des concentrations de contraintes sur des systèmes complexes.

On peut aussi utiliser cette méthode en 3D [58] et pour les liquides [57].

5.2. Objectifs

L'objectif de cette section est d'étudier les déformations globales de la carcasse textile à l'endroit de la jonction pendant la traction de cette dernière. En utilisant la photoélasticimétrie, nous allons pouvoir relever les champs de déformations de la matière au niveau de la jonction. Nous pouvons voir la déformation de la carcasse comme la déformation du montage spécifique.

5.3. Étapes préliminaires

5.3.1. Détermination du matériau biréfringent

Il existe une multitude de matériaux biréfringents. Le Tableau 3.7 en présente quelques uns. La constante photoélastique s'exprime en Brewster = $10^{-12}Pa^{-1}$.

Tableau 3.7. Matériaux biréfringents.

Matériau	Valeur de la constante photoélastique en Bw
Verre photoélastique	2
Plexiglas	4
Araldite (résine époxy)	55
CR39 (carbonate de diglycol d'allylique)	35
PSM1 (polyester)	82
Hysol (polyuréthane)	3200

La matière utilisée dans la photoélasticité a une épaisseur calibrée et s'achète en plaque ou est fabriquée sur site pour faire une mesure sur une pièce à forme non plane. La matière utilisée pour les métaux est du polycarbonate à haute sensibilité photoélastique. On utilise aussi des époxydes ou des résines spéciales. L'épaisseur de plaque utilisée généralement va de 0,5mm à 3mm.

La première étape est de déterminer le type de matières à utiliser. En effet, comme décrit précédemment, il faut que la matière ait un module de Young bien inférieur à celui de la pièce testée. Dans notre cas, la bande transporteuse a un module de Young de 1100MPa (Tableau 3.1 p.32) dans le sens de la chaîne. Cette valeur correspond principalement à celui de la carcasse, étant donné que le module d'élasticité du caoutchouc est bien plus faible. Nous devons donc prendre un matériau ayant un module de Young bien inférieur à 1100MPa.

La deuxième contrainte pour le choix du matériau est la déformation maximale admissible par celui-ci. Effectivement, il doit pouvoir s'allonger plus que la carcasse textile. La bande ayant une déformation à rupture de 17% (Tableau 3.1 p.32) dans le sens de la chaîne, nous devrons prendre un matériau ayant une plus grande déformation à rupture.

La colle utilisée pour fixer le matériau biréfringent doit avoir des propriétés similaires à celles de ce dernier. C'est pourquoi, chaque matériau biréfringent a sa colle adaptée.

5.3.2. Préparation de la matière

5.3.2.1. Aplatissement de la carcasse

La carcasse étant très rugueuse, en raison des nombreux fils qui la composent, il fallait trouver un moyen de rendre la surface plus lisse. Nous avons choisi de comprimer la matière avec une presse chauffante (Figure 3.75) pour la rendre plus lisse. Cela favorisera le collage de la plaque photoélastique. En effet, l'état de surface obtenu est quasiment lisse (Figure 3.76).

Figure 3.75. Presse.

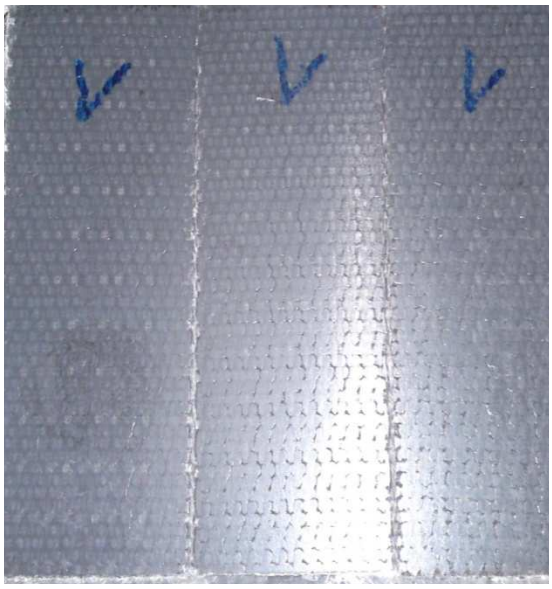

Figure 3.76. Carcasse après passage sous presse.

5.3.2.2. Collage de la plaque photoélastique

Le collage de la plaque photoélastique est très long. En effet, il faut compter pas moins de 48h pour effectuer le collage complet de la plaque, car la colle doit durcir et il faut appliquer deux couches de colle (Figure 3.77 et Figure 3.78) avant de poser la plaque sur la carcasse. Il faut conserver une atmosphère ventilée à environ 70°C pendant 2 heures minimum pour obtenir un durcissement correct de la colle.

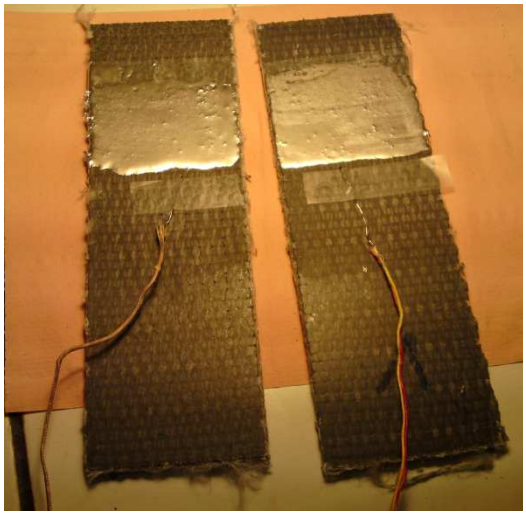

Figure 3.77. Première couche de colle.

Figure 3.78. Deuxième couche avec la plaque.

5.4. Protocole

Les mesures en photoélasticité nécessitent de lourds traitements d'informations dès que l'on parle de champ de déformations. L'étude peut être statique en appliquant la charge par palier ou dynamique avec une application progressive de la charge. L'étude statique permet d'avoir le champ de déformations en fonction des efforts appliqués tandis qu'une étude dynamique apportera sera utile dans le cas de phénomènes rapides comme lors de la rupture de la jonction. Cependant, nous nous limiterons à une étude statique dans un premier temps. L'étude photoélastique permet d'avoir un aperçu qualitatif des champs de déformations. Il est nécessaire d'utiliser des outils graphiques ou informatiques de traitement pour en avoir l'aperçu quantitatif. Nous nous concentrerons sur une étude qualitative et avec un aperçu des valeurs sans traitement.

5.5. Étude expérimentale

5.5.1. Mise en place de la maquette

La maquette comporte le montage expérimental, les pinces, la carcasse équipée d'une plaque photoélastique et l'équipement de lecture photoélastique. Le champ de déformations est observé à travers un verre polarisé. Le montage est présenté sur la Figure 3.79.

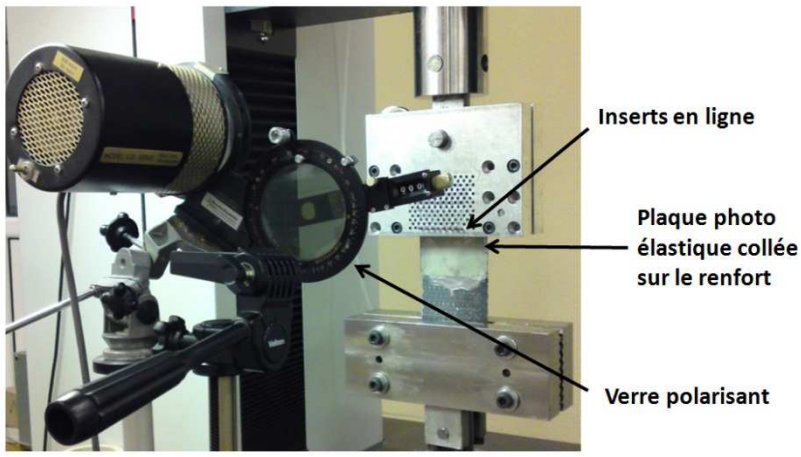

Figure 3.79. Montage photoélastique.

5.5.2. Essai avec 1 tige

La tige est insérée à 15mm de la plaque photoélastique au centre de la carcasse textile. Ce test est réalisé pour étudier la propagation de la contrainte à travers la carcasse textile.

La Figure 3.80 présente les résultats avec une tige. Sur la photo de gauche, on peut voir la plaque photo élastique sans efforts.

La déformation de la carcasse textile augmente sous la charge. Sur la photo du centre, on peut remarquer la présence d'un gradient de déformation dans la matière, visible avec les changements de couleur de la plaque photoélastique. On peut d'ailleurs observer jusqu'à quelle distance le gradient est significatif, ceci dans les deux directions (surface de 30x65mm²).

Sur la photo de droite de la figure, on peut voir que le champ de déformations est plus grand avec un effort plus important (8kN qui correspond à l'effort maximum transmis avec une tige).

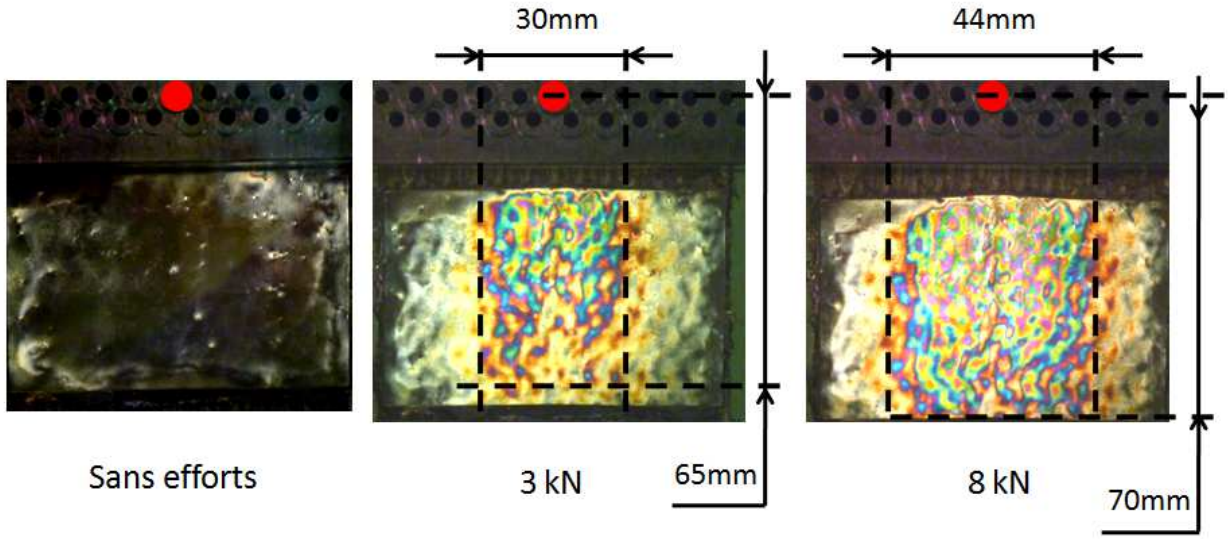

Figure 3.80. Champ de déformations avec une tige.

5.5.3. Essai avec 4 tiges

Dans cette configuration, l'essai a été réalisé pour visualiser le champ de déformations avec plus de tiges. Nous pouvons notamment voir si le champ de déformations non homogène est similaire à celui présent dans la configuration précédente.

On aperçoit à nouveau la plaque photoélastique sans efforts sur la photo de gauche de la Figure 3.81. Avec 10kN d'effort (photo du milieu), ce qui représente 44% de l'effort maximum, le champ de déformations décrit deux zones, chacune se trouvant en dessous des tiges n°1 et n°4. On peut en déduire qu'au milieu de la rangée de quatre tiges, le gradient de déformation est plus faible que sous les tiges d'extrémité. Il y a par conséquent des concentrations de contraintes sur les tiges n°1 et n°4.

Par ailleurs, le champ de déformations nous permet de dire qu'il faut respecter une distance au bord de 13mm (Figure 3.82). En effet, au-delà de 13 mm de chaque côté de la rangée, le gradient semble très faible (Figure 3.81).

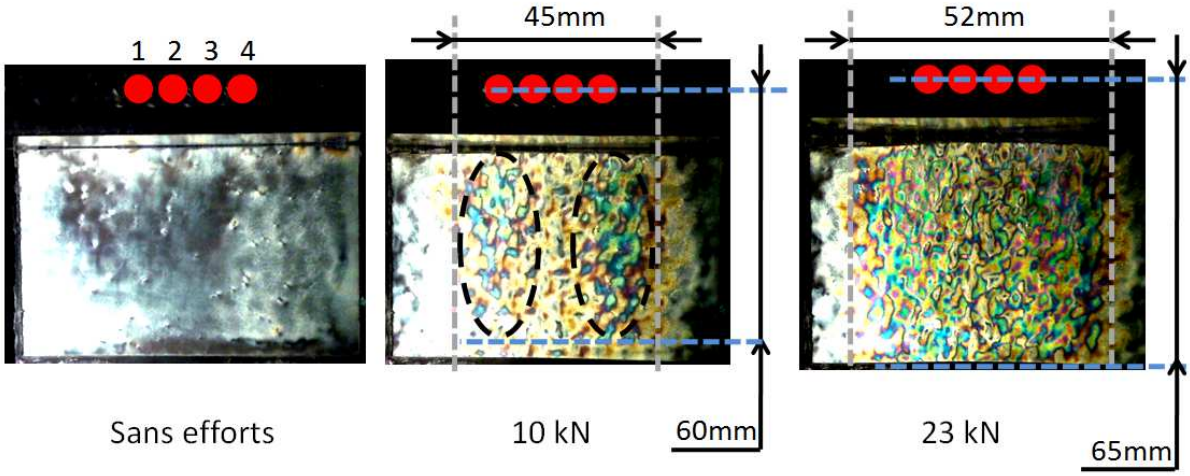

Figure 3.81. Champ de déformations avec quatre tiges.

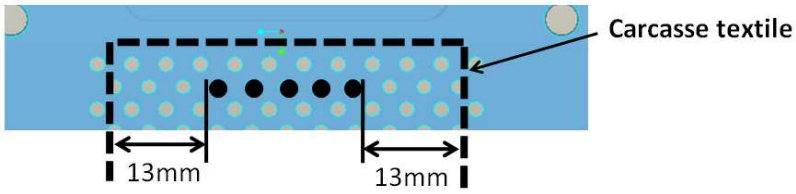

Figure 3.82. Distance sans tige à respecter de part et d'autre de la rangée.

5.5.4. Essai avec 8 tiges

Dans cette configuration (Figure 3.83), le champ de déformations présente à nouveau un gradient plus important sous les tiges extrêmes de la rangée que sous celles de son milieu.

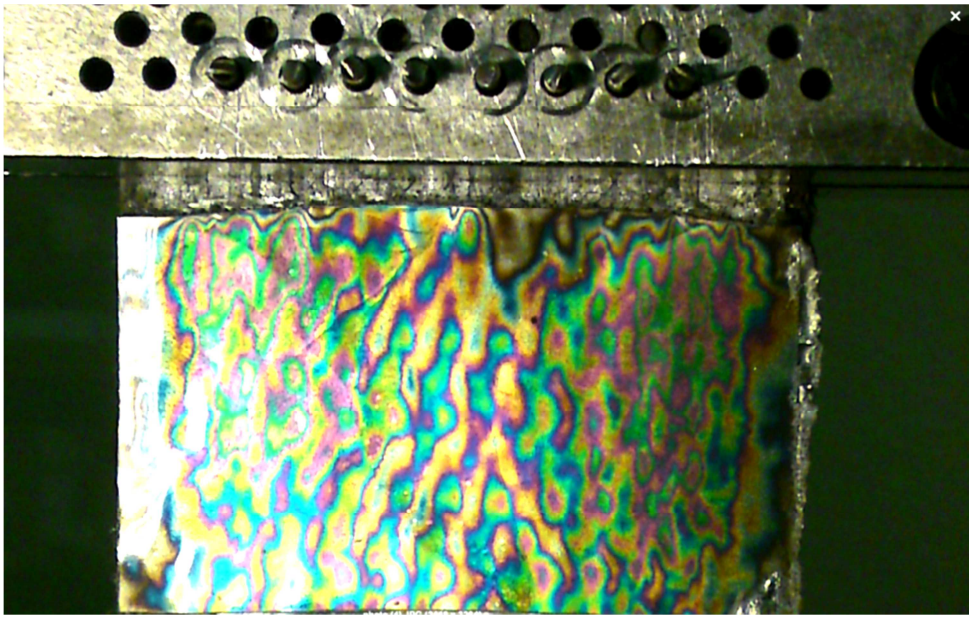

Figure 3.83. Champ de déformations avec huit tiges.

5.6. Conclusion

L'étude des champs de déformations par photoélasticimétrie nous permet d'avoir un point de vue global sur la déformation de la carcasse textile pendant la traction. Nous pouvons utiliser les champs de déformations pour évaluer la distance à respecter entre les extrémités de la rangée et le bord de la carcasse. Nous avons constaté que cette distance doit être au minimum 13mm, ce qui revient à avoir un maximum de 7 tiges pour un échantillon de 80mm de largeur ((80-2x13-2x1,5)/7,5=6,8 intervalles soit 7 tiges).

Par ailleurs nous avons pu mettre en évidence les différences des champs de déformations en fonction du nombre de tiges implantées dans le montage spécifique d'agrafage. Cette étude a fait apparaître que les concentrations de contraintes naissent sur les tiges des extrémités. Une amélioration possible serait la réorganisation des positions des tiges des extrémités afin de diminuer ces concentrations de contraintes, car ce sont elles qui vont provoquer la rupture de la bande.

5.7. Perspectives

Une étude plus approfondie nous permettrait d'avoir des informations quantitatives plus précises sur les champs de déformations. La sensibilité de la plaque photoélastique devra notamment être optimisée afin de pouvoir interpréter les mesures convenablement.

Une étude dynamique nous permettrait quant à elle de découvrir les phénomènes de rupture progressive par rapport aux différents paramètres de la jonction.

De plus, la distance de 13mm à respecter serait à conforter avec des essais comprenant plusieurs rangées.

6. Optimisation de la jonction mécanique par agrafage

Nous avons vu dans ce chapitre que l'optimisation de la jonction nécessite de comprendre les différents paramètres mis en jeu. Nous avons pu mettre en évidence que sur une rangée de tige la jonction efficace nécessite d'être serrée au maximum. Par ailleurs, la jonction doit comporter au moins deux rangées de tiges pour avoir une efficacité optimale. L'insertion des agrafes doit se situer au plus profond dans la bande transporteuse. Nous avons pu définir une profondeur optimale à 35mm du bord. Si nous observons les configurations présentes dans l'industrie (Annexe 9), nous constatons que les profondeurs sont bien souvent inférieures à 35mm pour limiter la fatigue lors du passage sur les tambours. Nous avons également observé que les défauts d'orthogonalité entre la trame et la chaîne n'ont pas d'influence significative sur l'efficacité de la jonction.

La photoélasticité nous a permis de définir la distance à respecter entre les tiges présentes aux extrémités des rangées et le bord de l'échantillon.

La proposition de la jonction mécanique par agrafage est basée sur l'ensemble des tests présentés dans les Tableau 3.4 p.61 et Tableau 3.6 p.73 ainsi que sur les résultats obtenus grâce à la photoélasticimétrie.

La jonction sur un échantillon de 100mm de largeur devrait avoir les caractéristiques suivantes :

- **Nombre de rangées de tiges** : 2 minimum, sachant que 3 et 4 rangées sont mieux (respectivement 72 et 73% en JTSE contre 63% pour 2 rangées). Étant donné que 4 rangées permettent d'avoir une jonction plus serrée, on prendra 4 rangées de tiges.
- **Espace entre les rangées** : 5mm ou plus.
- **Orthogonalité** : 4,2°au maximum, car en dessous elle n'est pas considérée comme influente
- **Pré-perçage (pp)** : sans, car le pré-perçage diminue l'efficacité.
- **Profondeur (p)** : 35mm minimum pour la première rangée d'agrafes.
- **Épaisseur de la cale pour le serrage (s)** : 8mm ou moins.
- **Diamètre des tiges (d)** : 3mm ou plus.
- **Nombre de tiges (n)** : on peut dire d'après le Tableau 3.4 p.61 que l'effort transmis augmente en fonction du nombre de tiges, mais la JTSE diminue. On prendra par conséquent une distance minimale de 13mm de chaque côté de la rangée (basée sur les mesures par photoélasticimétrie). Par ailleurs, les essais d'influence de la largeur de l'échantillon (Tableau 3.8) nous montrent que l'accroissement de cette distance n'est pas avantageux : il n'y a pas de différence d'efficacité entre 13,5mm et 23,5mm et l'augmentation d'efficacité pour 33,5mm de distance sans tige est à peine perceptible. Nous garderons donc une distance minimale de 13mm, ce qui nous ramène à 10 tiges (la distance est de l'ordre de 15mm).

Tableau 3.8. Essais de l'influence de la largeur de l'échantillon.

	Nombre de tiges	Largeur échantillon	Distance sans tiges de chaque côte de la rangée	Nb essais	Effort moyen	JTSE moyen
Influence de la largeur des échantillons	5tiges	60mm	13,5mm	5	27,04	58,5%
	5tiges	80mm	23,5mm	5	27,10	58,7%
	5tiges	100mm	33,5mm	5	28,70	62,1%

7. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre le comportement de la jonction mécanique par agrafage. Nous avons d'abord analysé le comportement de la bande transporteuse. Ainsi, le comportement visco-élasto-plastique de la bande transporteuse a pu être mis en évidence. Ce comportement est dû aux différents composants de la bande interagissant sur des échelles différentes.

Ensuite, l'utilisation d'un montage expérimental conçu spécifiquement nous a permis d'étudier l'influence des paramètres constitutifs de la jonction mécanique par agrafage sur l'efficacité de la jonction. L'étude a été limitée à la carcasse textile, âme de la bande transporteuse. La différence de comportement de la jonction par agrafage entre la carcasse textile et la bande complète a été étudiée. La bande complète comporte moins de déformation à rupture tandis que l'effort transmis est plus important. D'autres tests préliminaires ont dû être effectués, notamment pour vérifier que les essais réalisés avec le montage expérimental suivent une distribution normale et étudier les raisons de la variation des mesures. Nous avons pu conclure de ces tests que la distribution des tests est normale et que les variations des mesures sont dues aux variations de la matière et aux erreurs de positionnement lors des essais.

Les paramètres permettant de réaliser une jonction sont multiples : la profondeur des points d'attache, le serrage de la jonction, le nombre de points d'attache, la taille des points d'attache ainsi que la largeur de l'échantillon. Le montage expérimental reproduit la jonction mécanique par agrafage et permet de modifier ces paramètres. L'influence des paramètres sur l'efficacité de la jonction a été évaluée grâce à un indicateur unique évaluant l'efficacité de la jonction. Ce nouvel indicateur est appelé JTSE (Junction Tensile Strength Efficiency). À l'issue de ces tests, les différents paramètres ont pu être triés par ordre d'influence sur l'efficacité de la jonction.

Puis, des configurations non présentes dans l'industrie ont été testées. Les résultats ont pu démontrer que certaines configurations apportent une amélioration nette sur l'efficacité de la jonction. Nous avons pu constater que plusieurs rangées est préférable à une seule. Des phénomènes de rupture ont été relevés à l'issue de tous les tests de jonctionnement.

Par la suite, une étude de la déformation globale a été menée par photoélasticimétrie. Cette étude nous a permis de mettre en évidence les phénomènes de déformations de la carcasse textile pendant la charge. De plus, nous avons pu observer la propagation des efforts dans la carcasse en fonction du nombre de tiges insérées dans cette dernière. Cette étude a permis de définir la distance sans tiges à respecter de part et d'autre de la rangée pour garantir une efficacité et une longévité de la jonction.

Finalement, une jonction optimale en termes d'efficacité a été proposée.

En conclusion, ce chapitre a permis de comprendre les différents phénomènes présents dans la jonction mécanique par agrafage et de mettre en évidence les éléments à prendre en compte pour le développement de la jonction innovante qui sera traité dans le chapitre quatre. Nous pouvons tout d'abord dire que certains phénomènes de rupture sont à éviter : les fils de chaîne sectionnés, le peignage des fils de trame et le peignage des fils de chaîne. Ensuite, nous pouvons remarquer que la jonction innovante devra être souple et homogène pour éviter des concentrations de contraintes. Enfin, la jonction innovante devra comporter un grand nombre de points d'attache et être bien serrée pour garantir une bonne efficacité.

8. Perspectives

Un nouveau montage nous permettrait d'approfondir l'étude et d'apporter des éléments supplémentaires pour une jonction plus efficace. En effet, la jonction mécanique par agrafage étant très utilisée, elle doit être optimisée, bien qu'ayant une faible durée de vie.

Une étude de la mesure locale des déformations des tiges dans le montage spécifique d'agrafage, non présentée dans ce chapitre, a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes qu'il serait intéressant d'investiguer pour finalement avoir les informations quantitatives de la déformation des tiges pendant l'essai de traction.

Ensuite, une étude photoélastique quantitative et dynamique nous apportera des éléments supplémentaires pour compléter l'étude du comportement de la jonction.

Finalement, une vérification par l'expérience en vraie grandeur pourra être effectuée pour valider l'optimisation de la jonction mécanique par agrafage qui permettra d'augmenter la durée de vie de la jonction.