



HAL
open science

Contribution au développement et à l'industrialisation d'un système non-tissé 3D

Nicole Suzie Njeugna Yotchou

► **To cite this version:**

Nicole Suzie Njeugna Yotchou. Contribution au développement et à l'industrialisation d'un système non-tissé 3D. Autre [cond-mat.other]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2009. Français. NNT : 2009MULH3207 . tel-00487989

HAL Id: tel-00487989

<https://theses.hal.science/tel-00487989>

Submitted on 31 May 2010

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.

THESE

présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Discipline : Mécanique

par

Nicole Suzie NJEUGNA YOTCHOU

CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT ET A L'INDUSTRIALISATION D'UN SYSTEME NON-TISSE 3D

Soutenance publique le 30 novembre 2009 devant le jury composé de :

Pr. R. POSTLE	University of New South Wales	Rapporteur
Pr. D. SOULAT	Université d'Orléans	Rapporteur
Pr. Y. KYOSEV	Niederrhein University of Applied Sciences	Examineur
O. DEMANGEAT	N. SCHLUMBERGER	Invité
Pr. D. C. ADOLPHE	Université de Haute Alsace	Directeur de thèse
Pr. L. SCHACHER	Université de Haute Alsace	Directeur de thèse

THESE

présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE

Discipline : Mécanique

par

Nicole Suzie NJEUGNA YOTCHOU

CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT ET A L'INDUSTRIALISATION D'UN SYSTEME NON-TISSE 3D

Soutenance publique le 30 novembre 2009 devant le jury composé de :

Pr. R. POSTLE	University of New South Wales	Rapporteur
Dr. D. SOULAT	Université d'Orléans	Rapporteur
Dr. Y. KYOSEV	Niederrhein University of Applied Sciences	Examineur
O. DEMANGEAT	N. SCHLUMBERGER	Invité
Pr. D. C. ADOLPHE	Université de Haute Alsace	Directeur de thèse
Pr. L. SCHACHER	Université de Haute Alsace	Directeur de thèse

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	4
LISTE DES FIGURES	13
LISTE DES TABLEAUX	20
GLOSSAIRE DES TERMES TEXTILES	22
NOMENCLATURE	25
INTRODUCTION	28
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	31
1. Les textiles dans l’automobile	32
1.1. Introduction	32
1.2. Les textiles dans l’habitacle automobile.....	34
1.2.1. Les revêtements de sièges.....	34
1.2.2. Les revêtements de portes.....	36
1.3. Techniques d’assemblage des revêtements automobiles.....	36
1.4. Exigences requises pour les matériaux de garnissage automobiles.....	37
1.5. Outils de caractérisation des étoffes complexes automobiles	38
2. La mousse polyuréthane	40
2.1. Mise en œuvre	40
2.1.1. Réaction chimique	40
2.1.2. Structure de la mousse.....	40
2.2. Problématique du recyclage.....	41
3. Matériaux de substitution de la mousse polyuréthane : les textiles 3D.....	41
3.1. Description des textiles 3D : tissu, tricot, non-tissé	42
3.2. Choix de la technologie non-tissée.....	42
3.3. Procédés non-tissés 3D existants.....	43

3.3.1. Consolidation par plissage.....	43
3.3.2. Consolidation par couture-tricotage	45
3.3.3. Consolidation par aiguilletage	46
4. Solution de substitution proposée.....	47
4.1. Procédé VERTILAP	47
4.2. Non-tissé 3D VERTILAP®	48
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU TRAVAIL.....	50
1. Introduction	51
2. Production de produits VERTILAP®	52
2.1. Matériau utilisé	52
2.2. Procédure de production.....	52
2.3. Campagnes d’essais.....	53
3. Mise en place des méthodes de caractérisation	53
3.1. Caractérisation physique.....	54
3.2. Caractérisation mécanique.....	54
4. Application automobile	55
CHAPITRE 3 : PRESENTATION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL	
VERTILAP®	56
1. Présentation générale du procédé VERTILAP®	57
1.1. Description des fonctions du procédé VERTILAP®	57
1.1.1. Ouverture et défibrage	57
1.1.2. Verticalisation.....	58
1.1.3. Extraction et Condensation.....	58
1.1.4. Contrecollage.....	58
1.2. Présentation du prototype expérimental étudié	59
1.2.1. Ouverture et défibrage	59
1.2.2. Verticalisation.....	61

1.2.3. Extraction et condensation.....	61
1.2.4. Contrecollage.....	61
1.3. Modèle cinétique du prototype expérimental VERTILAP®	62
2. Paramètres de contrôle et limites de production du prototype expérimental	67
2.1. La matière d'alimentation.....	67
2.2. Les paramètres de vitesses.....	67
2.3. Les paramètres de températures	68
2.4. Les limites de production du prototype expérimental VERTILAP®	69
3. Conclusion	69
CHAPITRE 4 : PARTIE EXPERIMENTALE	71
4.1. INTRODUCTION	72
CHAPITRE 4.2 : CAMPAGNE D'ESSAIS N° 1.....	74
1. Production de non-tissés 3D VERTILAP®	75
1.1. Préparation de la matière d'alimentation.....	75
1.2. Paramètres de production	76
1.2.1. Variation des vitesses de production	77
1.2.2. Paramètres de température.....	78
1.2.2.1. La zone de plissage.....	78
1.2.2.2. La zone de condensation.....	79
1.3. Conclusion	80
2. Détermination des méthodes de caractérisation	80
2.1. Caractérisation physique.....	81
2.1.1. Modélisation géométrique	81
2.1.2. Résultats et analyse.....	82
2.2. Caractérisation mécanique en compression.....	83
2.2.1. Kawabata Evaluation System for Fabrics – KES-FB3 compression tester.....	83

2.2.1.1.	Conditions standards d'essai	84
2.2.1.2.	Méthode de test n° 1	85
2.2.1.3.	Méthode de test n° 2	87
2.2.1.4.	Conclusion	89
3.	Recommandations pour l'amélioration du prototype expérimental	90
3.1.	Recommandations en production	90
3.2.	Recommandations pour la caractérisation	91
4.	Conclusions	91
	CHAPITRE 4.3 : CAMPAGNE D'ESSAIS N° 2.....	92
1.	Production de non-tissés 3D VERTILAP®	93
1.1.	Préparation de la matière d'alimentation	93
1.2.	Paramètres de production	93
1.2.1.	Variation des vitesses de production	95
1.2.2.	Conclusions	96
2.	Méthode de caractérisation de l'irrégularité d'aspect.....	96
3.	Résultats de caractérisation	97
3.1.	Propriétés physiques	97
3.2.	Propriétés en compression	100
3.3.	Conclusion	102
4.	Analyse des résultats	102
4.1.	Principe du test de comparaison des variances et des moyennes	103
4.2.	Principe de l'Analyse en Composantes Principales	103
4.3.	Application	103
4.3.1.	Résultats du test de comparaison des variances et des moyennes.....	104
4.3.1.1.	Masse surfacique	104
4.3.1.2.	Irrégularité	104

4.3.1.3.	Epaisseur initiale.....	105
4.3.1.4.	Epaisseur finale après compression.....	105
4.3.1.5.	Compressibilité.....	105
4.3.1.6.	Résilience.....	105
4.3.1.7.	Energie de compression.....	105
4.3.2.	Résultats de l'ACP.....	105
4.3.2.1.	Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression.....	106
4.3.2.2.	Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication.....	108
4.4.	Conclusions.....	109
5.	Recommandations pour le développement du prototype expérimental.....	110
5.1.	Recommandations en production.....	110
5.1.1.	Ouverture et préparation du câble d'alimentation.....	110
5.1.2.	Chauffage des zones de plissage et de condensation.....	111
5.2.	Recommandations pour la caractérisation.....	111
6.	Conclusions.....	112
	CHAPITRE 4.4 : CAMPAGNE D'ESSAIS N° 3.....	113
1.	Réalisation de produits VERTILAP®.....	114
1.1.	Production de non-tissés 3D VERTILAP®.....	114
1.1.1.	Préparation de la matière d'alimentation.....	114
1.1.2.	Paramètres de production.....	114
1.1.3.	Observation du procédé de fabrication.....	116
1.2.	Contrecollage des non-tissés 3D VERTILAP®.....	116
1.2.1.	Paramètres de contrecollage.....	116
1.2.2.	Produits multicouches VERTILAP®.....	117
2.	Etude des produits VERTILAP®.....	118

2.1. Etude des non-tissés 3D VERTILAP®	118
2.1.1. Complément de caractérisations	118
2.1.1.1. Modélisation géométrique du pli après contrecollage	118
2.1.2. Résultats de caractérisation	120
2.1.2.1. Propriétés physiques	120
2.1.2.2. Propriétés de compression	122
2.1.2.3. Conclusions	124
2.1.3. Analyse des résultats	124
2.1.3.1. Comparaison des variances et des moyennes	125
2.1.3.2. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	125
2.1.3.3. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication	126
2.1.3.4. Conclusions	126
2.2. Influence des couches de contrecollage	127
2.2.1. Résultats de caractérisation	129
2.2.1.1. Propriétés physiques	129
2.2.1.2. Propriétés de compression	133
2.2.1.3. Conclusions	137
2.2.2. Analyse des résultats	138
2.2.2.1. Comparaison des moyennes	138
2.2.2.2. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	139
2.2.2.3. Conclusions	140
2.3. Influence de la température de contrecollage	141
2.3.1. Résultats de caractérisation	141
2.3.1.1. Propriétés physiques	142

2.3.1.2. Propriétés de compression	147
2.3.2. Analyse des résultats	149
2.3.2.1. Comparaison des moyennes	149
2.3.2.2. Cartes des produits de types c, d et e	151
2.3.2.3. Conclusions	153
2.4. Conclusion sur l'étude des produits VERTILAP®	153
3. Recommandations pour l'amélioration du prototype expérimental	154
3.1. Préparation de la matière	154
3.2. Prototype expérimental	154
4. Conclusions	155
CHAPITRE 4.5 : ETUDE COMPARATIVE NON-TISSES 3D VERTILAP® vs. MOUSSES PU	157
1. Introduction	158
2. Méthodes de caractérisation	159
2.1. Caractéristiques physiques et géométriques de la mousse PU	159
2.2. Caractérisation en compression sur cinq cycles	159
3. Résultats de caractérisation	161
3.1. Caractéristiques physiques	161
3.2. Caractéristiques en compression sur un cycle	164
3.3. Caractéristiques en compression sur cinq cycles.....	168
3.3.1. Courbes contrainte déformation	168
3.3.1.1. Les mono couches	169
3.3.1.2. Les multicouches	170
3.3.2. Contrainte maximale à 50% de déformation de l'épaisseur initiale	172
3.3.3. Energie dissipée à 50% de déformation de l'épaisseur initiale	174
3.3.4. Conclusions	176
4. Analyse des résultats	176

4.1. Etude des produits testés.....	177
4.2. Etude du comportement en compression sur cinq cycles	178
4.2.1. La contrainte maximale à 50% de l'épaisseur initiale.....	178
4.2.2. L'énergie absorbée à 50% de l'épaisseur initiale	178
4.3. Conclusion	179
5. Conclusions	179
CHAPITRE 4.6 : CAMPAGNE D'ESSAIS N° 4.....	180
1. Introduction	181
2. Réalisation de produits VERTILAP®	181
2.1. Production de non-tissés 3D plissés	181
2.1.1. Préparation de la matière d'alimentation.....	181
2.1.2. Paramètres de production	183
2.1.3. Observations du procédé	183
2.2. Contrecollage des non-tissés 3D plissés.....	184
2.2.1. Paramètres de contrecollage.....	184
2.2.2. Produits multicouches VERTILAP®	185
3. Résultats de caractérisations.....	185
3.1. Caractéristiques des produits VERTILAP®	185
3.1.1. Caractéristiques physiques	185
3.1.2. Caractéristiques de compression	187
3.2. Comparaison entre les produits VERTILAP® et les mousses PU	188
3.2.1. Caractéristiques physiques	188
3.2.2. Caractéristiques de compression	190
3.3. Conclusions	193
4. Analyse des résultats	193
5. Réalisation de pièces automobiles.....	195

5.1. Housse d'appui-tête	195
5.2. Panneau de porte.....	196
5.3. Conclusions	199
6. Recommandations pour la mise au point du prototype expérimental	199
7. Conclusions	199
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	201
1. Conclusion générale	202
2. Perspectives	205
2.1. Développements industriels.....	205
2.2. Recherche scientifique.....	206
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	208
ANNEXES	213

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1. Consommation mondiale de textiles techniques	32
Figure 2. Principaux débouchés des textiles techniques.....	33
Figure 3. Composition d'un siège automobile : structure (a), bloc de mousse (b), revêtement automobile (c).....	34
Figure 4. Composition d'une étoffe complexe de siège	35
Figure 5. Panneau de porte	36
Figure 6. Réaction de formation du polyuréthane par polyaddition.....	40
Figure 7. Structure microscopique d'une mousse polyuréthane.....	41
Figure 8. Schéma de principe (à gauche) de formation d'un non-tissé Struto [®] (à droite).....	44
Figure 9. Principe de formation d'un non-tissé Wavemaker [®]	44
Figure 10. Procédés Kunit (à gauche) et Multikunit (à droite).....	45
Figure 11. Principe du procédé Malivlies.....	46
Figure 12. Procédé Napco (à gauche), aiguilles utilisées lors de l'aiguilletage (au centre) et structure composite du non-tissé obtenu (à droite).....	47
Figure 13. Procédé VERTILAP	48
Figure 14. Structure du nouveau non-tissé 3D VERTILAP [®] avant condensation des plis	48
Figure 15. Structure schématique d'un revêtement automobile obtenu à partir du non-tissé 3D VERTILAP [®]	49

Chapitre 2

Figure 16. Etoffe multicouche automobile.....	51
Figure 17. Non-tissé 3D VERTILAP [®] mono couche avant condensation des plis	52
Figure 18. Non-tissé 3D VERTILAP [®] laminé	52
Figure 19. Schéma de principe du contrecollage à sec (presse Meyer [®]).....	53

Chapitre 3

Figure 20. Description du procédé VERTILAP®	57
Figure 21. Câble composé de faisceaux de filaments frisés	58
Figure 22. Schéma de principe du proto VERTILAP® 20cm / 6mm	59
Figure 23. Zone de défibrage du proto proto VERTILAP® 20cm / 6mm	59
Figure 24. Principe du défibrage	60
Figure 25. Zones de verticalisation du proto VERTILAP® 20cm / 6mm.....	61
Figure 26. Zone d'extraction et de condensation du proto VERTILAP® 20cm / 6mm	61
Figure 27. Modèle cinétique du proto VERTILAP® 20cm / 6mm.....	62
Figure 28. Schéma descriptif des tambours de plissage	65
Figure 29. Variation de la laize dans le câble d'alimentation lors de l'opération de division manuelle.....	67
Figure 30. Répartition du flux thermique dans la zone de condensation	69

Chapitre 4.2

Figure 31. Irrégularité d'aspect dans le câble d'alimentation	76
Figure 32. Variation des vitesses de production lors de la campagne d'essais N° 1	78
Figure 33. Mesures des températures dans la zone de plissage.....	79
Figure 34. Positionnement de la sonde de température dans la zone de plissage.....	79
Figure 35. Position du décapeur thermique dans la zone de condensation	80
Figure 36. Modèle géométrique du pli	81
Figure 37. Masses surfaciques des échantillons testés	83
Figure 38. Configuration standard du module de compression KES-FB3	84
Figure 39. Courbe de compression décompression du KES-FB3	84
Figure 40. Résultats de compression obtenus à partir de la méthode de test n° 1	86
Figure 41. Irrégularité d'aspect observée dans les échantillons issus de la méthode de test n° 2	87

Figure 42. Configuration non standard du KES-FB3 (à gauche), courbe de compression (à droite)	88
Figure 43. Résultats de compression obtenus à partir de la méthode de test n° 2	88
Figure 44. Moyenne des résultats de compression obtenus à partir des méthodes de test n° 1 et 2	89
Figure 45. Configuration de la zone de plissage avant (à gauche) et après modification (à droite)	90
Figure 46. Schématisation du phénomène de suralimentation des tambours de plissage	91

Chapitre 4.3

Figure 47. Glissement de la nappe filamentaire dans la zone de défibrage.....	95
Figure 48. Vitesses de production lors de la campagne d'essais N°2	95
Figure 49. Résultats du traitement d'images	97
Figure 50. Irrégularité d'aspect des échantillons testés.....	98
Figure 51. Tracé des paramètres de masse surfacique, d'irrégularité, d'angle de pli et taux de compactage	99
Figure 52. Densité des échantillons testés.....	100
Figure 53. Résilience de compression des échantillons testés.....	101
Figure 54. Caractéristiques de compression des échantillons testés	102
Figure 55. Cercle de corrélations – Propriétés physiques et mécaniques en compression.....	107
Figure 56. Carte des produits.....	108
Figure 57. Cercle de corrélations – Caractéristiques physiques et mécaniques en compression et paramètres de fabrication.....	109
Figure 58. Machine de convertissage – Converter TT12	111
Figure 59. Modification dans la zone de condensation et en sortie du procédé	111

Chapitre 4.4

Figure 60. Câble d'alimentation avant (à gauche) et après (à droite) défibrage au Converter	114
Figure 61. Vitesses de production lors de la campagne d'essais N° 3	115

Figure 62. Zones d'observation du procédé de fabrication	116
Figure 63. Modélisation géométrique du pli après contrecollage	119
Figure 64. Irrégularité des échantillons testés	121
Figure 65. Caractéristiques physiques des échantillons testés	121
Figure 66. Caractéristiques mécaniques en compression des échantillons testés.....	123
Figure 67. Caractéristiques de compression.....	123
Figure 68. Courbes de compression des non-tissés 3D testés	124
Figure 69. Conductivité thermique.....	132
Figure 70. Diagrammes radar des caractéristiques physiques des produits dérivés du NT1..	132
Figure 71. Résilience de compression	136
Figure 72. Diagrammes radar des caractéristiques de compression.....	136
Figure 73. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT1	137
Figure 74. Carte des produits testés.....	140
Figure 75. Conductivité thermique des produits de type c.....	144
Figure 76. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT1	145
Figure 77. Caractéristiques physiques des produits de type d.....	145
Figure 78. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT1	146
Figure 79. Caractéristiques physiques des produits de type e	146
Figure 80. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT1	147
Figure 81. Carte des produits de types c, d et e suivants les axes A1A2.....	152
Figure 82. Carte des produits de types c, d et e suivants les axes A1A3.....	153
Figure 83. Dispositif de séparation du câble	154
Figure 84. Optimisation du flux thermique dans la zone de condensation.....	155

Chapitre 4.5

Figure 85. Modélisation de la structure géométrique de la mousse PU	159
Figure 86. Machine de traction/compression INSTRON 33R4204	160
Figure 87. Courbe de contrainte déformation relevée	160
Figure 88. Structures alvéolaires des mousses testées.....	161
Figure 89. Coefficient de conductivité thermique des produits testés.....	163
Figure 90. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits mono couches	163
Figure 91. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits multicouches.....	164
Figure 92. Résilience de compression des produits testés.....	166
Figure 93. Diagrammes radar des caractéristiques en compression des produits mono et multicouches.....	166
Figure 94. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits multicouches	167
Figure 95. Courbes de compression KES des produits mono couches mousses et VERTILAP®	167
Figure 96. Courbes de compression KES des produits multicouches mousse et VERTILAP®	168
Figure 97. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT1	169
Figure 98. Courbes contrainte déformation de la mousse m1	170
Figure 99. Courbes contrainte déformation de la mousse m2	170
Figure 100. Courbes contrainte déformation du complexe automobile Cm.....	171
Figure 101. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a1	171
Figure 102. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b1	172
Figure 103. Contrainte maximale à 50% de déformation de l'épaisseur initiale des produits mono couches	173
Figure 104. Contrainte maximale à 50% de déformation de l'épaisseur initiale des produits multicouches.....	174
Figure 105. Energie dissipée lors de la compression à un taux de déformation de 50%	175

Figure 106. Energie dissipée lors de la compression à un taux de déformation de 50% 176

Figure 107. Carte des produits testés suivant les axes A1A2 177

Figure 108. Carte des produits testés suivant les axes A1A3 178

Chapitre 4.6

Figure 109. Enchevêtrements des filaments dans le câble 182

Figure 110. Protocole de séparation du câble de 90ktex 182

Figure 111. Flux thermique dans la zone de condensation..... 184

Figure 112. Ondulation de la nappe plissée..... 184

Figure 113. Etoffe multicouche VERTILAP[®] 185

Figure 114. Défaut d'irrégularité observée dans la nappe plissée 186

Figure 115. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits VERTILAP[®] 187

Figure 116. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits VERTILAP[®] 188

Figure 117. Caractéristiques physiques des produits VERTILAP[®] et des mousses PU..... 189

Figure 118. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits mono couches ... 190

Figure 119. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits multicouches..... 190

Figure 120. Résilience des produits VERTILAP[®] et des mousses PU 191

Figure 121. Caractéristiques en compression des produits mono couches..... 192

Figure 122. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits multicouches 192

Figure 123. Courbes de compression des produits VERTILAP[®] et des mousses PU 193

Figure 124. Carte des produits non-tissés 3D et mousses PU suivant les axes principaux A1A2 194

Figure 125. Carte des produits non-tissés 3D et mousses PU suivant les axes principaux A1A3 194

Figure 126. Etapes d'obtention du modèle de la housse d'appui tête 195

Figure 127. Housses d'appui-tête à partir du multicouche non-tissé 3D et du complexe automobile 196

Figure 128. Modèle de porte.....	196
Figure 129. Etapes d'obtention du modèle de l'étoffe complexe du panneau de porte	197
Figure 130. Panneau de porte	197
Figure 131. Choix du type de colle pour l'assemblage de l'étoffe et du panneau de porte....	198
Figure 132. Assemblage du module de porte (à gauche) et du panneau de porte (à droite) ..	198
Figure 133. Panneaux de porte à base de non-tissés 3D plissé.....	198

Conclusions et Perspectives

Figure 134. Non-tissé 3D plissé à partir d'un voile de corde	205
Figure 135. Autres secteurs d'applications des produits VERTILAP®	206

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau 1. Répartition des différents types de revêtements d'aspect dans le domaine de l'habillement automobile.....	35
Tableau 2. Méthodes d'essais automobiles	39

Chapitre 3

Tableau 3. Différentes valeurs de réglage du rapport de condensation C	64
Tableau 4. Limites de production du proto VERTILAP [®] 20cm / 6mm	69

Chapitre 4.2

Tableau 5. Paramètres de production lors de la première campagne d'essais.....	77
Tableau 6. Paramètres physiques des non-tissés 3D testés	82

Chapitre 4.3

Tableau 7. Paramètres de production lors de la deuxième campagne d'essais	94
Tableau 8. Regroupements des câbles par paramètres variables de fabrication.....	96
Tableau 9. Résultats de la caractérisation physique	98
Tableau 10. Résultats de compression des échantillons testés	100
Tableau 11. Résultats de masse surfacique	104
Tableau 12. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques du produit.....	106

Chapitre 4.4

Tableau 13. Paramètres de production de la troisième campagne de production.....	115
Tableau 14. Caractéristiques physiques.....	120
Tableau 15. Caractéristiques en compression.....	122
Tableau 19. Produits étudiés dans l'étude de l'influence des couches de contrecollage.....	128
Tableau 17. Caractéristiques physiques des échantillons testés	130
Tableau 18. Caractéristiques de compression.....	134

Tableau 19. Observation des différences non significatives entre les produits multicouches testés	139
Tableau 20. Produits étudiés dans l'étude de l'influence de la température de contrecollage	141
Tableau 21. Valeurs des caractéristiques physiques.....	143
Tableau 22. Valeurs des caractéristiques en compression.....	148
Tableau 23. Observation des différences non significatives entre les produits de type c	150
Tableau 24. Observation des différences non significatives entre les produits de type d	150
Tableau 25. Observations des différences non significatives entre les produits de type e.....	151

Chapitre 4.5

Tableau 26. Présentation des produits testés dans l'étude de comparaison.....	158
Tableau 27. Caractéristiques physiques des produits mousses testés.....	162
Tableau 28. Caractéristiques en compression des produits mousses PU testés.....	165
Tableau 29. Valeurs de la contrainte maximale (kPa) à 50% de déformation de l'épaisseur initiale	172
Tableau 30. Valeurs de l'énergie dissipée (Joules) à 50% de déformation de l'épaisseur initiale	174

Chapitre 4.6

Tableau 31. Paramètres constants de fabrication.....	183
Tableau 32. Paramètres variables de fabrication	183
Tableau 33. Caractéristiques physiques des produits VERTILAP [®] de la campagne N° 4	186
Tableau 34. Caractéristiques de compression des produits VERTILAP [®]	187

Conclusions et Perspectives

Tableau 35. Caractéristiques des produits non-tissés 3D mono couches VERTILAP [®]	204
Tableau 36. Caractéristiques des produits non-tissés 3D multicouches VERTILAP [®]	204

GLOSSAIRE DES TERMES TEXTILES

Aiguilleté : nappe de fibres non-tissé entremêlées par l'action d'aiguilles à barbes.

Câble : Large ensemble de filaments continus fabriqués sans torsion nette, assemblés sous forme de nappe lâche et maintenus ensemble par frisure.

Calandrage : opération qui consiste à faire passer une étoffe entre deux rouleaux presseurs dont un au moins est chauffant.

Carde : machine sur laquelle s'effectue le cardage des matières.

Cardage : procédé dans la fabrication de filés au moyen duquel les fibres sont démêlées, nettoyées et parallélisées.

Charmeuse : étoffe tricotée avec un point de maille indémaillable et semi bloquée. La charmeuse est réalisée sur un métier à tricoter chaîne (mailles jetées) et se caractérise par une absence d'élasticité.

Compactage : action de tasser les plis les uns sur les autres dans le procédé de verticalisation d'une nappe fibreuse.

Compressibilité : propriété qu'à un matériau de pouvoir diminuer de volume sous l'action d'une pression.

Compression : action de réduction du volume d'un matériau sous l'effet d'une pression.

Condensation : voir compactage.

Défibrage : opération qui consiste à individualiser, en les décollant, les filaments contenus dans un câble.

Droit filament : action de découper dans la même direction le câble de filaments continus.

Enduction : opération de dépôt d'une matière spécifique sur la surface d'une étoffe afin de lui conférer des caractéristiques particulières.

Etoffe : surface textile tissée, tricotée, en feutre, en non-tissé ou réalisée selon tout autre mode de production.

Etoffe complexe : assemblage de plusieurs couches d'étoffes et/ou de non-tissé et/ou de mousse, conçu pour améliorer les performances du produit fini.

Feutrage : Procédé par lequel des fibres de laine pure, ou en combinaison avec d'autres fibres, sont exposées à l'action mécanique ou chimique, à la pression, à l'humidité et à la chaleur de sorte qu'elles s'enchevêtrent, se contractent, se compriment et se collent entre elles pour former un matériau compact.

Feutre : étoffe textile obtenue par feutrage.

Fibre : élément de base des structures textiles. Une fibre est caractérisée par une longueur d'au moins 100 fois son diamètre, une finesse et une flexibilité.

Fil : terme désignant une structure textile réalisée avec ou sans torsion à partir de fibres discontinues ou de filaments continus.

Filament : fibre textile, généralement en matière synthétique, de très grande longueur, dit continu.

Fogging : dépôt de substances chimiques déposé sur la face intérieure des vitres et sur d'autres surfaces de l'habitacle. Ces substances chimiques proviennent des matériaux (plastiques) de l'habitacle sous certaines conditions de température.

Garnissage in-situ : se dit d'un garnissage qui est réalisé directement sur la pièce à garnir.

Hot-melt : thermocollant.

Maille : élément constitutif d'un tricot. Terme désignant une surface textile tricotée.

Non-tissé : surface textile obtenue par assemblage de fibres au travers des procédés mécaniques ou chimiques autres que le tissage, le tricotage et le feutrage.

Passette : organe mécanique jetant le fil sur l'aiguille dans une machine de tricotage.

Spacer-fabric : étoffe textile tridimensionnelle présentant une structure double paroi. Les deux parois sont reliées entre elles par des fibres orientées verticalement.

Spunbond : non-tissé thermolié.

TEP : Textile enduit plastique.

Tex : unité de mesure du titre.

Tissage : procédé d'entrecroisement perpendiculaire de fils de manière à former un tissu.

Tissu : surface textile obtenue par tissage.

Tissu plat : tissu 2D.

Tissu velours : tissu qui présente sur une face des boucles serrées ou des poils droits disposés perpendiculairement au tissu de fond.

Titre : masse linéique d'une fibre ou d'un fil. C'est la masse en grammes de 1000 mètres de matière.

Tricot : surface textile obtenue par tricotage.

Tricot chaîne : Tricot réalisé un métier chaîne.

Tricot circulaire : Tricot réalisé sur un métrier à tricoter circulaire.

Tricot Rachel : Tricot simple ou double face réalisé sur un métier chaîne équipé d'une ou de deux fontures disposées latéralement.

Tricotage : procédé d'entrelacement de séries de boucles formées par un ou plusieurs fils.

Tuftage ou Touffetage : procédé de réalisation d'étoffe par piquage de boucles de fibres ou de fils, à l'aide d'un dispositif muni de multiples d'aiguilles.

Voile : large voile de fibres délivrée par une cardé. Ce terme est également utilisé pour désigner des non-tissés légers et transparents.

NOMENCLATURE

θ (°)	Angle de pli avant contrecollage
θ' (°)	Angle de pli après contrecollage
ΔT (°C)	Différentiel de température sur la matière plissée en sortie du prototype expérimental VERTILAP [®]
a (mm)	Hypoténuse du pli avant contrecollage
a' (mm)	Hypoténuse du pli après contrecollage
C (SD [*])	Rapport de condensation ou de compactage
d (kg/m ³)	Densité du matériau
D_2 (mm)	Diamètre du cylindre d'alimentation (2)
D_3 (mm)	Diamètre du cylindre défibrant (3)
D_C (mm)	Diamètre des cylindres de condensation
D_{ev} (mm)	Diamètre du cylindre d'entrée de verticalisation
D_{ex} (mm)	Diamètre du cylindre d'extraction
D_{ext} (mm)	Diamètre extérieur du tambour de plissage
D_{int} (mm)	Diamètre intérieur du tambour de plissage
D_p (mm)	Diamètre médian entre les deux tambours de plissage
E_a (SD)	Etirage d'alimentation
E_{def} (SD)	Etirage de défibrage
EMC (%)	Compressibilité du matériau (KES ^{**})
e_p (mm)	Épaisseur de la paroi fibreuse du pli
e_0 (mm)	Épaisseur du pli
I_{Ex} (%)	Indicateur de l'étirage d'extraction
I_{reg} (%)	Irrégularité du matériau

I_{sa} (%)	Indicateur de l'étirage d'alimentation
K (W/m.K)	Coefficient de conductivité thermique
l_a (mm)	Longueur apparente de la structure plissée avant contrecollage
l'_a (mm)	Longueur apparente de la structure plissée après contrecollage
l_{boucle} (mm)	Longueur de la boucle formée par le pli après contrecollage
LC (SD)	Linéarité de la courbe de compression (KES)
l_r (mm)	Longueur réelle de la structure plissée avant contrecollage
l'_r (mm)	Longueur réelle de la structure plissée après contrecollage
M (g/m ²)	Masse surfacique du matériau
n_p (SD)	Nombre de plis
P (bar)	Pression d'air comprimé dans la zone de refroidissement du prototype expérimental VERTILAP [®]
P_{air} (l/m ² /s)	Perméabilité à l'air
Pas ou p (cm)	Distance entre deux crêtes de plis
RC (%)	Résilience de compression
$T_{consigne}$ (°C)	Température de consigne des tambours de plissage
T_F (°C)	Température du décapeur thermique dans la zone de condensation
T_M (°C)	Epaisseur finale après compression (KES)
T_{sonde} (°C)	Température de la sonde dans la zone de plissage
T_{x_C} (%)	Taux de compactage de la structure plissée avant contrecollage
T'_{x_C} (%)	Taux de compactage de la structure plissée après contrecollage
T_0 (mm)	Epaisseur initiale du matériau (KES)
V_C (m/min)	Vitesse linéaire des manchons de condensation qui correspond aussi à la vitesse de sortie du prototype expérimental VERTILAP [®]

V_{ev} (m/min)	Vitesse linéaire d'entrée de verticalisation du prototype expérimental VERTILAP [®]
V_{ex} (m/min)	Vitesse linéaire des manchons d'extraction du prototype expérimental VERTILAP [®]
V_p (m/min)	Vitesse linéaire de plissage du prototype expérimental VERTILAP [®]
V_T (m/min)	Vitesse linéaire des tambours de plissage qui correspond également à la vitesse du prototype expérimental VERTILAP [®]
V_2 (m/min)	Vitesse linéaire du cylindre d'alimentation (2) qui correspond aussi à la vitesse d'entrée du prototype expérimental VERTILAP [®]
V_3 (m/min)	Vitesse linéaire du cylindre défibrant (3) qui correspond à la vitesse de défibrage du prototype expérimental VERTILAP [®]
WC (cN.cm/cm ²)	Energie dissipée lors de la compression (KES)
WC' (cN.cm/cm ²)	Energie dissipée lors de la décompression (KES)
Z_C (SD)	Nombre de dents du pignon d'engrenage des cylindres de condensation
Z_{ev} (SD)	Nombre de dents du pignon d'engrenage du cylindre d'entrée de verticalisation
Z_{ex} (SD)	Nombre de dents du pignon d'engrenage du cylindre d'extraction
Z_2 (SD)	Nombre de dents du pignon d'engrenage du cylindre d'alimentation (2)
Z_3 (SD)	Nombre de dents du pignon d'engrenage du cylindre défibrant (3)

* Sans dimension

** Kawabata Evaluation System for Fabrics

INTRODUCTION

De nos jours, le contexte général et la sensibilité des consommateurs au regard de la protection active de l'environnement incitent très fortement les industriels à promouvoir des méthodes de développement produits respectueuses de l'environnement. Cette démarche de développement durable est également vivement encouragée par les institutions politiques aussi bien au niveau national qu'au niveau européen. C'est exactement dans ce cadre que s'inscrit le présent travail de thèse qui se penche sur la problématique du remplacement des matériaux alvéolaires souples, notamment les mousses polyuréthane, utilisées dans les applications d'habillage intérieur automobile.

En effet, la législation européenne, par sa directive 2000/53/CE [1], contraint les industriels du secteur automobile à repenser les matériaux utilisés en garnissage intérieur (sièges, garniture de porte, etc.). Les étoffes complexes actuellement utilisées comme garnitures automobiles, présentent des inconvénients en termes de recyclabilité de par leur composition tri matériau et de respect de l'environnement de par leur assemblage par flammage. Une des solutions à cette problématique est la substitution de ces étoffes complexes par des produits alternatifs. Afin de répondre à cette problématique, des acteurs industriels textiles ainsi que des acteurs de la recherche scientifique et technique de la région mulhousienne ont travaillé au sein d'un consortium sur un projet de recherche et développement commun, le projet VERTILAP. Ce projet vise à développer un nouveau matériau alternatif à base de fibres textiles destiné à remplacer la mousse polyuréthane qui entre dans la composition de l'étoffe complexe automobile actuelle. Ce nouveau matériau fibreux devra être facile à recycler, de faible densité, de forte résilience et présenter des propriétés accrues tant au niveau thermique que phonique en comparaison des mousses polyuréthane actuellement utilisées. Le projet VERTILAP a été labellisé par le pôle de compétitivité « Véhicule du Futur » de la région Alsace / Franche Comté en juillet 2006.

Le présent travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la première phase de ce projet. Son objectif a été d'étudier la faisabilité du remplacement des étoffes complexes automobiles actuelles par un matériau fibreux mono composant. Ceci a été rendu possible grâce à l'utilisation d'un nouveau procédé d'obtention de non-tissé 3D, breveté par la société N. SCHLUMBERGER.

Cette première phase du projet a regroupé les partenaires suivants :

- Des fabricants de machines : N. SCHLUMBERGER, AMDES
- Des transformateurs de produits : PROTECHNIC, LANDOLT, DOLLFUS & MULLER, RHENOFLEX DREYER

- L'Institut Français du Textile et de l'Habillement (IFTH)
- Le Laboratoire de Physique et Mécanique Textiles, EAC 7189 CNRS/UHA, (LPMT)
- Le pôle de compétitivité « Véhicule du Futur »
- Le Pôle Textile Alsace

Les savoir-faire de chacun des partenaires ont été utilisés pour l'amélioration du procédé et le développement de ces nouveaux non-tissés 3D. Ainsi, les sociétés N. SCHLUMBERGER et AMDES ont apporté leurs savoir-faire au niveau de la conception et de la réalisation de machines textiles industrielles. La société PROTECHNIC a apporté son savoir-faire en matière de contrecollage des étoffes complexes. Les sociétés LANDOLT, DOLLFUS & MULLER et RHENOFLEX DREYER ainsi que l'IFTH ont apporté leurs savoir-faire en matière de cahiers des charges des produits. Les Pôles au sein de ce consortium, ont tenu le rôle de facilitateurs mettant en contact transformateurs et utilisateurs potentiels de ce nouveau type de produit. Le LPMT, porteur du projet VERTILAP, a apporté son savoir-faire en matière de matériaux fibreux, de caractérisation de non-tissés, de textiles automobiles, d'évaluation du confort (toucher) et de méthodologie « développement produits ».

Ce travail de thèse a pour objectif de développer le procédé de fabrication des nouveaux non-tissés 3D VERTILAP[®]. La démarche de développements procédé/produits a consisté à faire évoluer le prototype expérimental VERTILAP[®] au travers de la caractérisation physique et mécanique en compression des produits obtenus. Des méthodes et des outils de caractérisations adaptés à ces nouveaux produits ont été mis au point. L'analyse des résultats obtenus s'est appuyée sur des outils statistiques. Une étude comparative avec les produits contenant de la mousse polyuréthane a été menée afin de montrer si ces nouveaux non-tissés 3D pouvaient être utilisés en remplacement des mousses polyuréthane. La réalisation de prototypes (housse d'appui-tête et panneau de porte) pour des applications d'habitacle automobile a été menée pour prouver la faisabilité industrielle d'un tel remplacement. Les résultats de ce travail de thèse devront contribuer à l'élaboration du cahier des charges d'un nouveau prototype semi industriel VERTILAP[®].

Le présent travail de thèse a également contribué, par son objectif, à l'amélioration et à la maîtrise du procédé breveté par la société N. SCHLUMBERGER. La démarche de ce travail a été d'améliorer le procédé de fabrication avec comme grandeur de retour les caractéristiques des produits issus dudit procédé. Les aspects de confort en terme de toucher, notamment l'effet « soft touch » ont également été étudiés dans ce travail.

La présentation de ce travail se décline en deux parties principales, une première partie générale et une seconde expérimentale.

Le chapitre 1 présente l'état de l'art des textiles techniques utilisés dans les applications intérieures automobiles. Les techniques de mise en œuvre de la mousse polyuréthane ainsi que les problèmes liés à son recyclage sont présentés. Ce chapitre illustre également les solutions existantes au remplacement des étoffes complexes automobiles actuelles.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation du travail. Il présente les trois principales phases de production, de caractérisation et de réalisation des matériaux de garnissage automobiles.

Le chapitre 3 décrit les différentes fonctions du procédé de fabrication du non-tissé 3D VERTILAP[®]. Les paramètres de contrôle, les limites de productivité et le modèle cinétique du prototype expérimental sont présentés.

Le chapitre 4 présente la partie expérimentale du travail. Il expose l'ensemble des essais et des résultats obtenus ainsi que leurs interprétations. Ces essais expérimentaux se sont déroulés en quatre campagnes d'essais correspondant chacune à des étapes de développement du procédé et des non-tissés 3D.

Le chapitre 5 est consacré aux conclusions et aux perspectives de ce travail.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La consommation actuelle de fibres textiles en Europe est répartie en trois principaux secteurs d'application : l'habillement (environ 34%), l'ameublement (environ 27%) et les applications techniques industrielles (environ 38%). Le marché des textiles techniques est donc devenu un gros consommateur de fibres avec un taux de croissance annuelle de 5 à 7% par an. [2] Dans le domaine des textiles techniques, les textiles utilisés dans l'automobile représentent une part importante du marché (environ 20%). Ces textiles peuvent se trouver dans des applications invisibles (renfort de pneumatiques) ou dans des applications à forte valeur visuelle telles que l'habillage intérieur. Dans ce cas particulier, ces textiles sont appelés *revêtements automobiles* et sont en réalité des étoffes multicouches composées d'une épaisseur de mousse polyuréthane prise en sandwich par deux étoffes extérieures textiles. Afin de résister aux contraintes spécifiques que peut connaître un intérieur automobile, ces revêtements doivent répondre à des exigences précises définies dans les cahiers des charges élaborés par les constructeurs automobiles. Ces cahiers des charges décrivent aussi bien les caractéristiques à obtenir que les outils de caractérisation à mettre en œuvre pour ces matériaux de garnissage.

1. Les textiles dans l'automobile

1.1. Introduction

Depuis les années 90, l'emploi des textiles dans des utilisations techniques a vu son champ d'action s'élargir de plus en plus touchant des domaines où jusqu'à présent ils étaient encore absents. Faisant suite à cette progression, la terminologie de *textiles techniques* a été associée à ces applications. Ces matériaux sont définis surtout par leurs performances techniques et leurs propriétés fonctionnelles et non plus uniquement par leurs caractéristiques esthétiques ou décoratives. L'industrie des textiles techniques se caractérise principalement par l'innovation, la recherche et le développement. La production de ces textiles est, depuis 1995, en hausse permanente aussi bien en valeur qu'en volume. La consommation mondiale de ces matériaux fibreux devrait atteindre les 22 millions de tonnes en 2010 comme le montre la Figure 1. [3, 4]

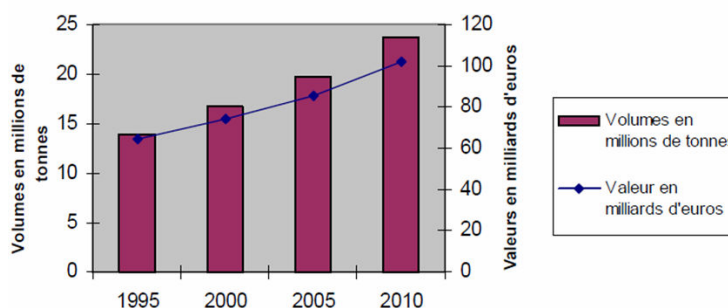


Figure 1. Consommation mondiale de textiles techniques [3]

Les domaines d'applications des textiles techniques sont segmentés en différents domaines (Figure 2) [4]. Les transports représentaient en 1998 une part de 20 % du marché des textiles techniques [5]. Ce domaine d'application se compose de différents secteurs des transports : avions, bateaux, cars, automobiles, etc.

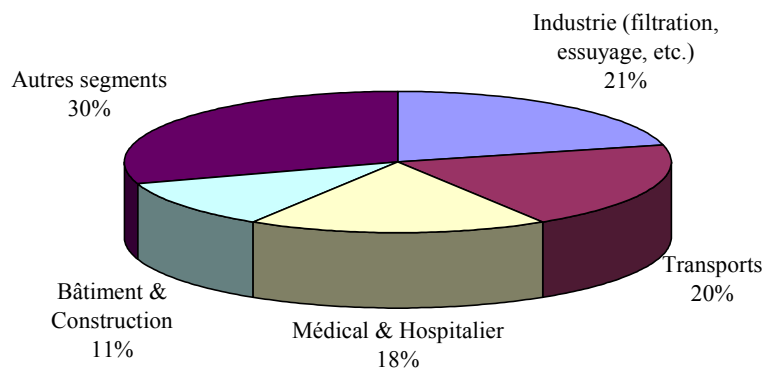


Figure 2. Principaux débouchés des textiles techniques [4]

Pour l'industrie automobile, le textile est un matériau très intéressant de par ses fonctionnalités et ses performances mécaniques. Elle l'utilise, dans trois grandes composantes du véhicule : l'habitacle, le compartiment moteur et les pneumatiques [6]. Tout au long de ce travail de recherche, nous nous intéresserons plus spécifiquement aux textiles utilisés dans l'habitacle pour les applications d'habillement intérieur. L'habitacle automobile a considérablement évolué depuis ces dix dernières années et est devenu un des éléments clés de l'acte d'achat d'un véhicule. En effet, les consommateurs prêtent de plus en plus d'attention à leur environnement et l'intérieur automobile fait partie de l'un d'eux. De ce fait, leur rapport au véhicule, au moment de l'achat, a évolué vers de nouvelles attentes. Ainsi, les facteurs de confort, d'esthétique (harmonie des couleurs et des dessins) et de sécurité sont devenus des éléments essentiels dans la vente d'un véhicule. Les constructeurs l'ont compris et ont depuis les années 90 augmenté, de façon significative, l'emploi du textile dans la décoration intérieure. Les textiles représentent maintenant en moyenne 11 kg du poids d'un véhicule automobile européen, sur une surface d'environ 16 m². Leur usage est donc devenu incontournable pour répondre à ces nouvelles attentes du consommateur auxquelles s'ajoutent également des exigences fonctionnelles telles que l'isolation acoustique et thermique. [3, 7]

Les applications d'habillement intérieur peuvent être classées en cinq catégories : les revêtements de sièges et de portes, la tablette arrière, les moquettes, le pavillon et les éléments de sécurité (ceintures et airbags) [8]. Ce projet de recherche développera plus particulièrement les éléments de l'habitacle se rapportant à la première catégorie « revêtements de sièges et de portes ».

1.2. Les textiles dans l'habitacle automobile

1.2.1. Les revêtements de sièges

Le siège apparaît comme un produit complexe composé d'une structure rigide, de mécanismes de réglage, d'éléments de soutien et du revêtement textile. La Figure 3 illustre les principaux composants du siège.



Figure 3. Composition d'un siège automobile : structure (a), bloc de mousse (b), revêtement automobile (c)

La structure métallique rigide représente le squelette du siège et assure une fonction de sécurité. Les mécanismes de réglage sont des éléments tels que les systèmes de rehausse, les glissières, les dispositifs d'inclinaison. Ils contribuent à l'ergonomie du siège ainsi qu'à la sécurité et au confort de son occupant. Les blocs de mousse en polyuréthane et les nappes de suspensions constituent les éléments de soutien. Ces éléments assurent trois fonctions principales : l'esthétisme du siège, le soutien et le maintien du corps du passager ainsi que l'amortissement des vibrations dynamiques lors de la conduite.

Les textiles utilisés pour l'habillage des sièges, dans un véhicule européen, occupent une surface visible d'environ 3,8 m². L'importance de ces derniers dans l'habitacle a pris une valeur considérable aussi bien dans l'aspect confort que dans son influence dans la décision d'achat du consommateur. En effet, le siège est le premier élément vu, touché et testé par le client lors de l'inspection intérieure du véhicule.

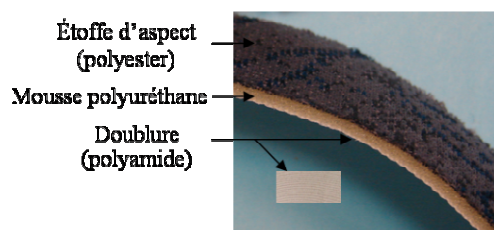
L'habillage contribue à l'esthétique et au confort de l'habitacle de par les différentes propriétés d'aspect, de toucher, mécaniques, physiques, etc. du revêtement choisi. Le revêtement d'aspect peut être en textile, en cuir naturel ou synthétique. Différentes technologies de fabrication textile telles que le tissage et le tricotage peuvent être utilisées pour le réaliser. Ces différentes techniques vont donner des produits différents comme le tissu plat, le tricot circulaire, le tissu velours, le tricot velours, etc. La répartition de ces revêtements dans les différentes parties du monde est présentée dans le Tableau 1 [9]. Ces données montrent la faible part du cuir comparée au textile dans les applications d'habillage intérieur.

Tableau 1. Répartition des différents types de revêtements d'aspect dans le domaine de l'habillement intérieur automobile

Revêtements d'aspect	Europe de l'Ouest (%)	U.S.A. (%)	Japon (%)
Tissu plat	39	17	20
Tissu velours	3	29	25
Tricot chaîne/ Velours Rachel	14	17	35
Tricot double Rachel	14	23	9
Tricot circulaire	21	4	8
Cuir/Vinyl	9	10	3

L'habillement du siège peut être effectué selon différentes techniques de garnissage. On distingue le garnissage traditionnel, le garnissage par collage et le garnissage in-situ. Dans le premier cas, l'étoffe complexe est enfilée sur le bloc de mousse du siège. Dans le second cas, de la colle est pulvérisée soit sur l'étoffe complexe, soit sur le bloc de mousse, soit sur les deux, pour réaliser l'assemblage de ces deux éléments. Dans le troisième cas, de la mousse est directement injectée dans l'étoffe complexe préalablement posée dans un moule. Il s'agit d'une technique de garnissage directe.

Le revêtement automobile du siège est traditionnellement constitué de trois couches : une étoffe d'aspect, une fine couche de mousse en polyuréthane et une doublure textile. L'étoffe d'aspect, généralement en polyester, peut être un tricot ou un tissu comme nous l'avons vu précédemment. La couche de mousse PU présente généralement une épaisseur comprise entre 2 et 8 mm [10] pour une masse surfacique de l'ordre de 200 g/m². La mousse PU apporte la souplesse et le toucher « soft ». La doublure textile est généralement un tricot en polyamide 6 ou 6.6 de type charmeuse. Elle apporte la stabilité dimensionnelle de l'ensemble. Dans le cas du garnissage traditionnel, elle a pour rôle de faciliter l'enfilage de l'étoffe complexe sur la matelassure du siège. Dans le cas du garnissage in-situ, elle a pour rôle d'éviter la pénétration de la mousse bloc dans le revêtement d'aspect lors du procédé d'injection. [11]

**Figure 4. Composition d'une étoffe complexe de siège**

1.2.2. Les revêtements de portes

La porte est composée d'un module de porte et d'un panneau de porte sur lequel est appliqué l'étoffe complexe. Le module de porte est un ensemble de composants assemblés. Il est constitué d'un porteur structurel absorbeur d'énergie, de composants mécaniques tels que les verrous et les lève-vitres, de composants électriques ou électroniques et de faisceaux électriques. Le panneau de porte est monté sur le module pour réaliser la porte complète. Il participe au style et au confort intérieur du véhicule. En effet, il représente un des éléments clés du confort des passagers au travers de l'ergonomie de l'accoudoir et des différentes commandes (lève-vitres, rétroviseurs, etc.), des rangements proposés ainsi que de ses propriétés acoustiques (isolation, haut-parleur). [12]

Les revêtements textiles utilisés pour l'habillage des panneaux de porte dans un véhicule européen, occupent une surface visible d'environ 1,7 m². En plus de leur fonction esthétique, ces revêtements occupent une place de premier plan dans la sécurité du véhicule automobile. En effet, ils permettent de protéger les passagers contre les impacts latéraux en cas de chocs.

Le revêtement textile appliqué sur le panneau de porte est très similaire à celui utilisé dans l'habillage du siège. Il est généralement constitué d'une structure bicouche : une étoffe d'aspect et une fine couche de mousse en polyuréthane. La doublure textile n'est pas nécessairement utilisée. L'étoffe d'aspect, comme dans le cas du siège, est généralement un tricot ou un tissu en polyester. Le revêtement peut être appliqué sur une partie ou sur la totalité (Figure 5) de la surface du panneau.



Figure 5. Panneau de porte [7]

1.3. Techniques d'assemblage des revêtements automobiles

On distingue dans la littérature [13, 14], différentes techniques d'assemblage des revêtements automobiles. Elles peuvent être regroupées en trois principaux modes de contrecollage : le flammage, les procédés par voie fondue et les procédés par voie sèche. Les techniques de flammage et de contrecollage par voie sèche, qui sont les plus couramment utilisées, seront présentées dans cette étude (*annexe I.1*).

Le flammage, encore appelé contrecollage à la flamme est le procédé le plus anciennement utilisé pour la réalisation de revêtements automobiles. Il est également le moins respectueux de l'environnement de par les émanations de fumées toxiques générées par la fonte du polyuréthane. Les procédés de contrecollage par voie sèche, plus respectueux de l'environnement, utilisent des adhésifs thermocollants sous forme de poudre, de voiles ou de films.

1.4. Exigences requises pour les matériaux de garnissage automobiles

La durée de vie d'un véhicule européen est en moyenne de 10 à 15 ans [15], les matériaux de l'habitacle subissent de nombreuses agressions extérieures. Ces agressions proviennent à la fois des usagers et des conditions atmosphériques. Il est donc impératif d'avoir des matériaux de haute qualité afin qu'ils conservent, au maximum, leurs propriétés initiales pendant toute la durée de vie du véhicule. C'est la raison pour laquelle des cahiers des charges ont été définis afin de fixer les différentes exigences auxquelles devront répondre ces derniers. Ces exigences doivent tenir compte des contraintes réglementaires spécifiques aux différents pays de mise en circulation, des contraintes liées à la transformation des matériaux, des contraintes fonctionnelles, des contraintes de coût et bien évidemment des contraintes de sécurité. [16]

Au vu de la législation, les matériaux facilement inflammables ainsi que certains composés chimiques sont interdits d'usage. L'inflammabilité des matériaux est évaluée par un test évaluant le temps d'inflammation, la vitesse de propagation et la hauteur des flammes. Ces éléments permettent de calculer un indice d'inflammabilité et de classer les matériaux en cinq catégories M0, M1, M2, M3 et M4. Ces catégories correspondent au niveau d'inflammabilité du matériau allant du matériau incombustible au matériau facilement inflammable. [17] L'interdiction de certains composés chimiques vise à éviter tout risque lié à la santé et à la sécurité du consommateur final. Cette interdiction a également pour objectif de favoriser la recyclabilité des composants du véhicule. [18] La présence de ces composés doit donc être limitée au maximum, voire éliminée dans la constitution des matériaux pour l'habitacle. Ces substances chimiques sont généralement des produits tels que les amines aromatiques cancérigènes, les colorants allergènes, les phtalates, les chlorophénols, les pesticides, etc. [19]

Les contraintes liées à la transformation du produit final se réfèrent à différents points tels que la conception, la composition et la réalisation des pièces de l'habitacle. Il s'agira par exemple de vérifier la tenue des matériaux face aux sollicitations générées par les procédés d'assemblage, etc. [16] Les contraintes fonctionnelles font l'objet de tests divers parmi lesquels on peut citer :

- La tenue à la lumière.

- La résistance à l'usure.
- Le comportement au vieillissement. Cette exigence permet par exemple de s'assurer que les revêtements textiles résistent à des températures minimums de 90°C pour le siège et de 105°C pour le panneau de porte. [20]
- Les propriétés mécaniques. Il s'agit d'évaluer le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations de compression, de traction, de flexion, de déchirement, etc. Ces propriétés renseignent sur l'allongement, la résistance à la rupture, l'élasticité et bien d'autres paramètres du matériau testé.
- Le fogging. Il correspond au dépôt de produits volatils sur les vitres à l'intérieur du véhicule.
- Etc.

1.5. Outils de caractérisation des étoffes complexes automobiles

On retrouve dans les cahiers des charges des constructeurs automobiles diverses méthodes d'essais qui permettent de caractériser les étoffes multicouches utilisées en habillage intérieur. Chaque constructeur définit ses méthodes d'essais selon ses spécificités. La mise en place de ces méthodes est adaptée des méthodes normalisées ISO. A titre d'exemples, le Tableau 2 reprend quelques unes de ces méthodes en donnant le principe général de mise en œuvre.

Tableau 2. Méthodes d'essais automobiles

Caractérisations	Méthodes d'essais normalisées	Principe de la méthode
Masse volumique apparente	ISO 845	Calcul de la densité à partir des dimensions et de la masse de l'éprouvette. L'appareillage recommandé est une balance ayant une précision de 0,5 % et un matériel de mesure de l'épaisseur. [21]
Combustibilité	ISO 3795	Détermination de la vitesse de combustibilité horizontale des matériaux. Le principe consiste à disposer horizontalement l'éprouvette et le soumettre à l'action d'une flamme de faible énergie durant 15 secondes. L'essai permet de déterminer si la flamme s'éteint et à quel moment ou le temps nécessaire à la flamme pour parcourir une distance donnée. L'appareillage utilisé est une chambre de combustion. [22]
Déformation rémanente après compression	ISO 1856	Compression de l'éprouvette pendant une durée donnée en un seul cycle de compression. Le taux de compression et la température sont fixés pendant l'essai. Le test peut être effectué à température ambiante ou à une température spécifique. L'appareillage recommandé est une machine de compression. [23]
Traction et allongement à la rupture	ISO 1798	Détermination de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture par allongement de l'éprouvette à vitesse constante jusqu'à la rupture. Les mesures relevées permettent de tracer la courbe force allongement. L'appareillage utilisé est une machine de traction. [26]
Résistance au déchirement	ISO 8067	Le principe est similaire à celui de la méthode ISO 1798. Une fente est réalisée dans l'éprouvette et les deux extrémités sont pincées dans les mâchoires fixe et mobile de la machine de traction. L'essai de déchirement est validé lorsque la déchirure se fait dans le prolongement de la fente. L'appareillage utilisé est une machine de traction. [24]
Résistance à la compression	ISO 3386/1	Compression de l'éprouvette à un taux de déformation donné pendant cinq cycles. Le test permet de déterminer la portance du matériau. Il s'agit de la contrainte nécessaire pour comprimer l'éprouvette au cinquième cycle de compression à un taux de compression donné. La caractéristique contrainte déformation est relevée à l'issue de cet essai. Cette caractéristique renseigne sur l'aptitude du matériau à supporter des charges de courte durée. L'appareillage recommandé est une machine de traction/ compression. [25]

2. La mousse polyuréthane

La mousse polyuréthane est un élément clé du matériau de garnissage. Sa structure et ses propriétés participent au comportement et aux caractéristiques d'ensemble notamment lorsqu'elle est soumise à des sollicitations mécaniques. La mise en œuvre et la structure de la mousse polyuréthane ainsi que sa problématique de recyclage seront présentées dans ce paragraphe. L'*annexe I.2* présente les méthodes de mise en œuvre et les techniques de recyclage mécanique, chimique et thermique de la mousse PU.

2.1. Mise en œuvre

2.1.1. Réaction chimique

Le polyuréthane est obtenu par réaction chimique entre un isocyanate et un polyol. Ce dernier peut être un polyéther ou un polyester. La formulation chimique du polyuréthane nécessite l'emploi de composants de base tels que l'isocyanate, le polyol, l'eau et des adjuvants (catalyseurs, stabilisateurs, agents réticulant, agents gonflants, ignifugeants, etc.). La réaction chimique peut être de type polycondensation, polyaddition ou polymérisation en chaîne. Elle s'effectue entre le groupement hydroxyle (-OH) et le groupement isocyanate (-NCO) (Figure 6). L'expansion de la mousse est causée par la réaction entre l'isocyanate et l'eau. En effet, cette réaction exothermique s'accompagne d'un fort dégagement de dioxyde de carbone ($\text{CO}_2 \uparrow$) qui va agir comme un agent d'expansion et de durcissement. [27, 28]

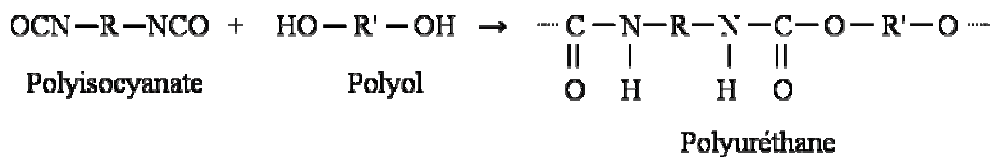


Figure 6. Réaction de formation du polyuréthane par polyaddition [27, 28]

2.1.2. Structure de la mousse

La mousse de polyuréthane ainsi obtenue est principalement caractérisée par une structure alvéolaire. Les cellules formant le réseau cellulaire peuvent être géométriquement modélisées par un dodécaèdre. Ce dernier se compose de fenêtres à la forme pentagonale et de parois. Ces fenêtres peuvent être fermées ou ouvertes (Figure 7). Selon leur proportion dans le réseau cellulaire, on parlera de mousse à cellules fermées ou à cellules ouvertes.

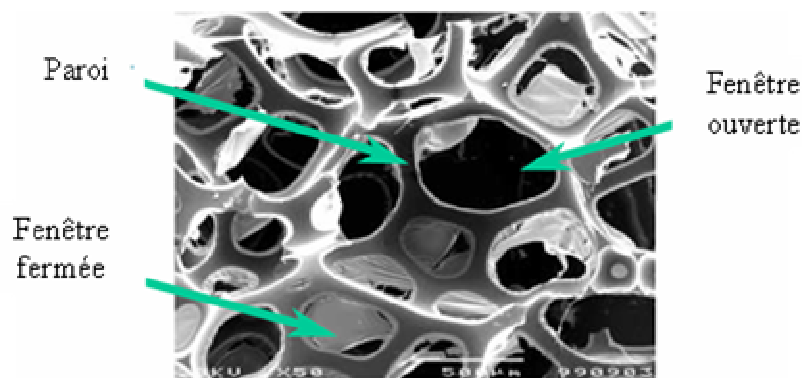


Figure 7. Structure microscopique d'une mousse polyuréthane [27]

2.2. Problématique du recyclage

Nous avons vu précédemment que la réalisation d'étoffes multicouches automobiles par les opérations de contrecollage telles que le flammage conduisait à l'émission de gaz et d'odeurs toxiques. Dans l'optique de remédier à ce problème environnemental, la législation relative aux véhicules hors d'usage (VHU) a fortement évolué au cours de ces dix dernières années. En effet, la directive européenne, 2000/53/CE, contraint les constructeurs et équipementiers automobiles à repenser les matériaux utilisés pour les garnitures intérieures (sièges, garniture de porte, etc.). En plus de ces émanations toxiques, le recyclage des étoffes complexes actuelles est très faiblement réalisé du fait de leur composition et du coût lié à cette opération. [29] Le délaminage de ces étoffes complexes est très imparfait car des traces de mousse subsistent sur le polyester ou le polyamide après séparation des différentes couches. [10, 28, 30]

Au vu de la difficulté de recyclage du polyuréthane et de la sévérité de la législation, les fabricants de mousse à l'instar de RECTICEL axent leurs projets de recherche et développement sur des mousses à base de composés chimiques biologiques. C'est le cas de la mousse PURECELL[®] de RECTICEL qui contient au moins 20 % de composés chimiques naturels dans sa formulation [31]. Toutefois, la solution d'utiliser les ressources agricoles à des fins industrielles et non pas pour l'alimentation ne fait pas l'unanimité, d'où l'enjeu majeur du remplacement de la mousse polyuréthane par un matériau alternatif. C'est dans cette optique que travaillent les industries concurrentes des fabricants de mousses au travers de divers axes de développement.

3. Matériaux de substitution de la mousse polyuréthane : les textiles 3D

Dans l'univers textile, les textiles 3D ont été développés afin de répondre à des sollicitations complexes auxquelles ne pouvaient satisfaire les textiles conventionnels. Un de leur domaine

d'application est le remplacement des éléments en mousse PU dans des structures multicouches car ils représentent une bonne solution à la problématique du recyclage. En effet, ces textiles 3D peuvent être mono composants et pourront alors être traités par la même chaîne de recyclage sans opération préalable de délaminage. Ils sont également conçus pour égaler les performances mécaniques de la mousse à remplacer. Ces textiles 3D sont principalement issus des technologies de tissage, de tricotage et de non-tissé.

3.1. Description des textiles 3D : tissu, tricot, non-tissé

Les textiles tridimensionnels destinés au remplacement de la mousse polyuréthane sont essentiellement des textiles « espaceur » encore appelés « spacer fabric ». Ces textiles peuvent être industriellement réalisés dans des épaisseurs comprises entre 5 mm et 50 mm [32]. Leur structure 3D est caractérisée par l'orientation verticale des fibres ou des filaments. Cette orientation particulière des fibres ou des filaments confère de bonnes propriétés mécaniques en compression. De ce fait, ils peuvent présenter les mêmes performances, voire de meilleures performances, que la mousse à remplacer. Ces produits « espaceur » peuvent être employés dans de multiples secteurs d'applications : automobile, génie civil, construction, chaussant, médical, sport, etc. [7, 33, 34]. L'*annexe I.3* présente la description détaillée des textiles 3D de types tissu, tricot et non-tissé.

3.2. Choix de la technologie non-tissée

Comme nous l'avons vu précédemment, l'industrie automobile est soumise depuis une décennie à une mutation de ses concepts. Cette mutation s'explique principalement par les facteurs environnementaux et économiques ainsi que par l'évolution des besoins du consommateur. De nos jours, le secteur automobile est à la recherche de solutions pouvant répondre à ces différents défis : réduction de la consommation de carburant, réduction du poids du véhicule, recyclabilité des matériaux, etc. Des solutions à ces exigences pour une voiture plus « verte » sont apportées par les non-tissés. Fabriqués à partir de fibres naturelles, chimiques, vierges ou recyclées, les non-tissés peuvent prétendre répondre à différentes fonctions telles que la réduction du poids, du bruit, de l'isolation thermique, le garnissage, la filtration d'air, etc. Comparativement aux tissus et aux tricots, ils présentent de meilleurs avantages en termes de coût de production et de productivité. Ils représentent également un marché en constante évolution au regard de la consommation européenne des fibres dans le domaine des textiles à usage technique. [32, 35, 36]

Au vu des raisons citées précédemment, on observe une forte tendance vers le développement de produits fibreux de type non-tissé 3D pour répondre à la problématique posée. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de recherche.

3.3. Procédés non-tissés 3D existants

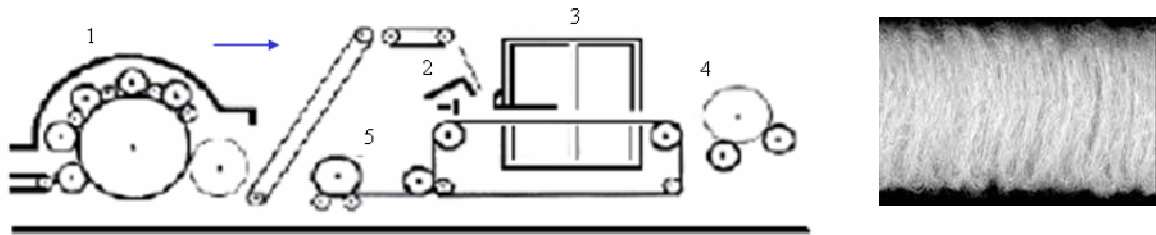
Il existe différentes techniques d'obtention de non-tissés 3D. Ces derniers sont généralement réalisés par voie sèche et ils sont consolidés par des procédés mécaniques. Ces procédés permettent de transformer une nappe fibreuse ou filamentaire en architecture tridimensionnelle. Les non-tissés 3D peuvent être classés en fonction du mode de consolidation. Cette consolidation peut se faire soit de façon mécanique par plissage, aiguilletage, couture-tricotage, jet d'air, etc., soit de façon thermique ou chimique. De nombreux procédés de fabrication de non-tissés 3D ont été brevetés. Les procédés les plus connus ont été développés par les constructeurs de machines tels que Asselin, Fehrer, Dilo, etc. Les technologies non-tissés 3D actuellement disponibles sont : Struto[®], V-Lap[®], Wavemaker[®], Malimo, Malivlies, Napco[®].

3.3.1. Consolidation par plissage

Cette technique de consolidation permet de réaliser l'opération de verticalisation en utilisant un élément plisseur. Parmi les procédés les plus rencontrés, on peut citer les technologies de verticalisation Struto[®], V-Lap[®], Wavemaker[®]. Ces procédés sont basés sur un système de verticalisation de nappe fibreuse et un traitement thermique.

Technologie Struto[®]

Le schéma de principe de formation d'un non-tissé Struto[®] est illustré à la Figure 8. Un mélange de fibres est cardé (1) de manière à obtenir un voile de carte comprenant des fibres élémentaires et des fibres thermoliantes. Ce voile suivra successivement les opérations de nappage et de verticalisation (2). Une fois la structure plissée formée, elle sera introduite dans un four (3) afin d'être consolidée par un traitement thermique. Dans un premier temps, le traitement consistera à chauffer la structure afin de fixer la structure plissée, dans un deuxième temps, la structure sera refroidie afin de bloquer et figer les plis. Le produit obtenu sera stocké par enroulement en sortie du procédé de fabrication (4). Il est également possible de réaliser un produit complexe par contrecollage à l'aide de thermoadhésif. Le support de contrecollage (5) sera alors introduit en même temps que la structure plissée dans le four. Le non-tissé 3D obtenu présente des plis essentiellement verticaux par opposition au système Wavemaker[®] (décrit plus loin) qui ne permet pas une parfaite verticalisation des plis. [37]



1 Cardé, 2 Système de verticalisation, 3 Four, 4 Non-tissé 3D, 5 Support de contrecollage

Figure 8. Schéma de principe (à gauche) de formation d'un non-tissé Struto® (à droite) [37]

Technologie V-Lap®

Ce procédé met en œuvre la même technologie de plissage Struto®, mais l'intègre dans une ligne de fabrication comportant une cardé double séparée par un étaleur nappeur. Le principe de formation du non-tissé épais reste identique au Struto®.

Les procédés Struto® et V-Lap®, bien qu'ils permettent tous deux d'obtenir une bonne verticalisation des plis, présentent toutefois de faibles capacités de production par rapport à d'autres technologies de fabrication.

Technologie Wavemaker®

La technologie Wavemaker® est la propriété du groupe suisse SANTEX. Il s'agit d'une unité de verticalisation de nappes non-tissées. Le principe consiste à orienter verticalement les fibres d'une nappe par plissage et à effectuer un traitement thermique dans un four. Le plissage est réalisé par un tambour rotatif à disques. Le mouvement d'avance de la nappe fibreuse se fait en sens opposé à celui du tambour rotatif. Le traitement thermique a pour rôle de fixer les plis formés et de bloquer la structure volumineuse du produit. Le principe de formation du non-tissé Wavemaker® est illustré à la Figure 9.

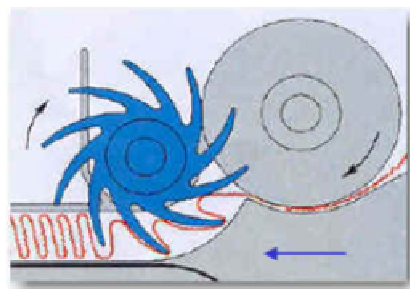


Figure 9. Principe de formation d'un non-tissé Wavemaker® [37]

3.3.2. Consolidation par couture-tricotage

Cette technique de consolidation s'inspire de la technique de tricotage pour réaliser l'opération de verticalisation en utilisant des boucles de maille. On peut citer les technologies Kunit, Multikunit et Malivlies du groupe Allemand Karl Mayer. Les procédés Kunit et Multikunit ont été développés en coopération par le Sachsisches Textilforschungsinstitut et Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik.

Les procédés Kunit et Multikunit sont illustrés à la Figure 10. Le procédé Kunit consiste à orienter verticalement une nappe de fibre obtenue par cardage. Cette nappe de carde est introduite dans une machine de couture-tricotage où des plis seront formés par tricotage et fixés par couture sous forme de boucles. Le non-tissé épais obtenu possède une face bouclée dans le sens de la production et une face velouté. Les plis de velours sont majoritairement perpendiculaires à la surface du non-tissé. Le procédé multikunit consiste à retravailler le non-tissé Kunit dans une machine de couture-tricotage. Le non-tissé multikunit obtenu présente une structure bouclée sur les deux faces extérieures et une structure velours à l'intérieur. Les produits réalisés par ces deux techniques sont connus sous la dénomination Caliweb. [38, 39]

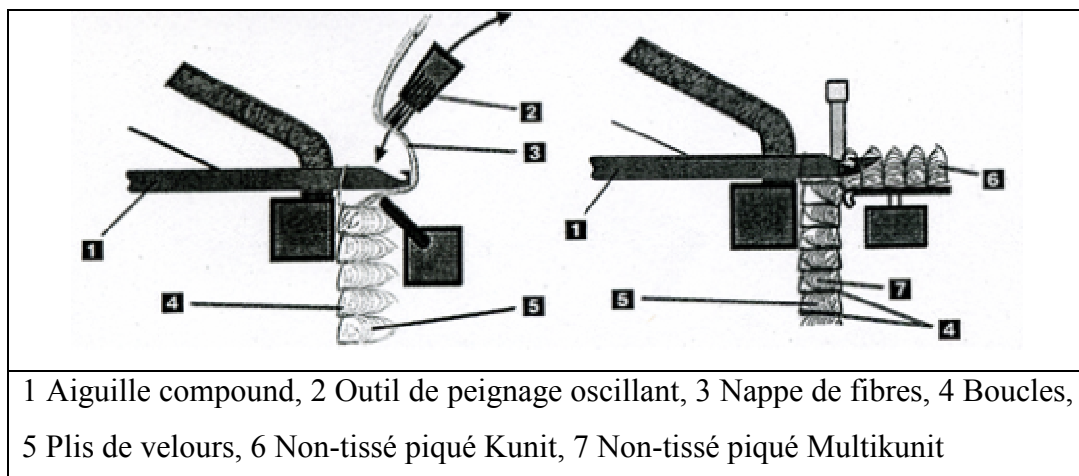


Figure 10. Procédés Kunit (à gauche) et Multikunit (à droite) [38]

La Figure 11 illustre le principe du procédé Malivlies. Le principe est similaire à celui du procédé Kunit à la différence que l'alimentation de la machine de piquage-couture est faite par un amas de fibres. Le piquage donne lieu à un non-tissé épais présentant une face tricotée et une face veloutée.

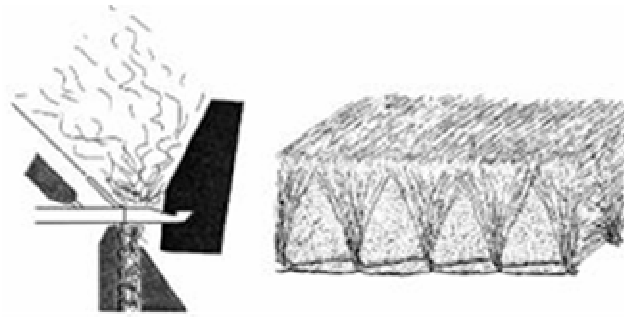


Figure 11. Principe du procédé Malivlies [39]

3.3.3. Consolidation par aiguilletage

Cette technique de consolidation s'inspire de la technique d'aiguilletage conventionnelle pour réaliser l'opération de verticalisation donnant lieu à des non-tissés volumineux. Le principe de l'aiguilletage conventionnel consiste à donner de la cohésion à une nappe fibreuse en enchevêtrant ses fibres ou ses filaments. Cet enchevêtrement est obtenu par l'action d'aiguilles à barbes (crochets) qui traversent la nappe par des mouvements de va-et-vient. Les fibres/filaments sont accroché(e)s dans les barbes des aiguilles et enfoncé(e)s à travers la nappe générant ainsi des frottements responsable de la cohésion fibreuse. Les non-tissés aiguilletés conventionnels ainsi obtenus présentent une bonne résilience mais une masse volumique importante. Ceci représente un inconvénient majeur pour des applications où le poids est un critère essentiel.

Parmi les technologies d'aiguilletage non conventionnelles, on peut citer la technologie Napco[®], encore connue sous l'appellation 3D Web Linker[®] et développée par le constructeur français de machines textiles LAROCHE. Le procédé Napco[®] (Figure 12) consiste à relier deux couches de non-tissés entre elles par un pont fibreux. Deux couches de non-tissés pré aiguilletées (A et B) sont introduites dans le procédé et séparées par un espacement donné. L'aiguilletage est réalisé sur les deux côtés avec des aiguilles à barbe et à fourche. Cette opération permet de créer un pont de faisceaux de fibres entre les deux couches A et B. Il est également possible d'introduire (2) des éléments de renforts fibreux ou non dans la structure composite ainsi formée. [40]

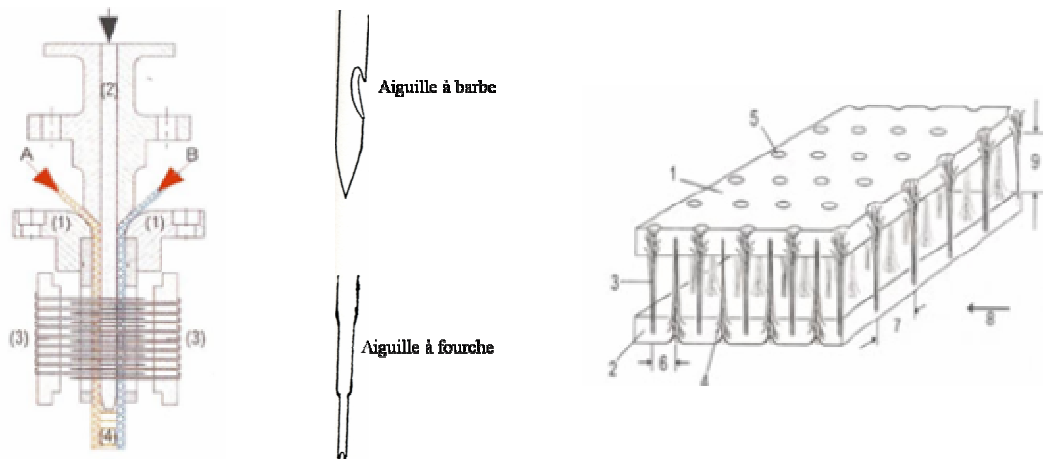


Figure 12. Procédé Napco (à gauche), aiguilles utilisées lors de l'aiguilletage (au centre) et structure composite du non-tissé obtenu (à droite) [40]

Ces différentes technologies non-tissés 3D ont la particularité de produire un non-tissé volumineux à plus faible densité que les non-tissés aiguilletés conventionnels et hautement résilient de par sa structure fibreuse verticale. Cependant, il est à noter que les techniques de fabrication par plissage ne permettent pas d'obtenir un non-tissé épais dont la structure présente une parfaite orientation verticale des fibres. A cet effet, ce projet de recherche se propose d'apporter une solution par le développement d'un non-tissé présentant une meilleure verticalisation de la nappe fibreuse.

4. Solution de substitution proposée

4.1. Procédé VERTILAP

Il s'agit d'un nouveau procédé de fabrication de non-tissé épais breveté par le constructeur français de machines textiles N. SCHLUMBERGER. Le procédé VERTILAP est une technique de verticalisation d'une nappe fibreuse. Ce procédé permet de réaliser des non-tissés tridimensionnels présentant une meilleure orientation verticale des fibres comparativement aux procédés concurrents existants. [41] Ce travail de recherche contribue au développement de ce procédé de fabrication et à la caractérisation des produits obtenus. Le procédé VERTILAP consiste à plisser une nappe de fibres initialement sous forme de voiles de fibres discontinues ou de câbles de filaments continus ou de bande pré consolidée. Le câble de filaments est un large ensemble de filaments continus fabriqués sans torsion vraie. Ces filaments continus sont assemblés sous une forme semblable à une corde lâche et leur cohésion est assurée par frisure. La Figure 13 illustre le principe de fabrication VERTILAP. Le râtelier (2) de la machine est alimenté par une nappe de fibres (1). Cette dernière est introduite dans une zone de défibrage (3) où les fibres/filaments sont défibré(e)s de manière à

les séparer les uns des autres. Cette opération de défibrage permet d'individualiser les filaments contenus dans la nappe fibreuse. Cette nappe est ensuite verticalisée à l'aide d'un élément plisseur (4). Elle est alors condensée (5) de manière à tasser les plis formés les uns sur les autres. A cette étape du procédé, des revêtements textiles peuvent être appliqués sur le non-tissé plissé permettant de réaliser un produit multicouche (6). Le produit obtenu subit un traitement thermique par lequel sa structure est consolidée et fixée. Le produit « espaceur » final peut être enroulé sur un tube ou découpé en plaques qui seront superposées. [42]

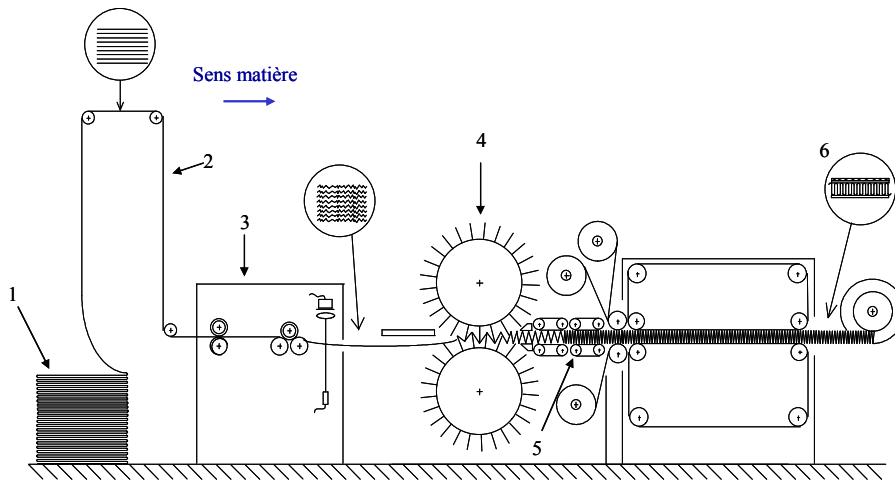


Figure 13. Procédé VERTILAP [42]

4.2. Non-tissé 3D VERTILAP®

Le non-tissé 3D obtenu par le procédé précédemment décrit est appelé VERTILAP®. Il présente une structure plissée dans laquelle les fibres sont orientées essentiellement verticalement (Figure 14). Les non-tissés VERTILAP® présentés dans ce travail de recherche ont été réalisés à partir de câbles de filaments continus en polyester.



Figure 14. Structure du nouveau non-tissé 3D VERTILAP® avant condensation des plis [41]

Utilisé en remplacement de la mousse polyuréthane dans les revêtements automobiles, ce non-tissé plissé permet d'atteindre l'exigence de recyclabilité attendue. En effet, le revêtement obtenu après laminage est un mono matériau (Figure 15) pouvant par exemple être 100 % polyester ou 100 % polypropylène.

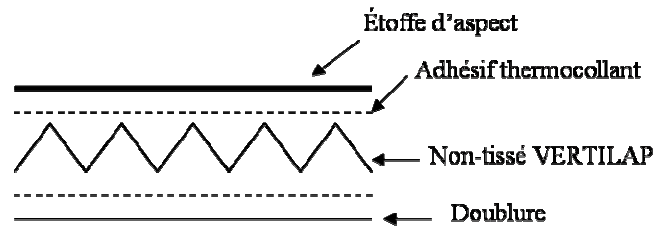


Figure 15. Structure schématique d'un revêtement automobile obtenu à partir du non-tissé 3D VERTILAP®

CHAPITRE 2

PRESENTATION DU TRAVAIL

1. Introduction

Le procédé VERTILAP[®] en l'état est un prototype expérimental de petite largeur permettant d'obtenir à partir d'un câble de polymère, un non-tissé 3D plissé. Ce non-tissé 3D pourrait remplacer, dans une optique de développement durable et de recyclabilité, la mousse polyuréthane qui se trouve actuellement dans les étoffes textiles multicouches utilisées dans les habillages intérieurs et les housses de sièges des véhicules actuels.



Figure 16. Etoffe multicouche automobile [14]

Le travail de thèse qui a été réalisé dans le cadre de cette étude a pour but de :

- Mettre en place les éléments de contrôle et de réglage de ce nouveau procédé dans une optique « paramètres/qualité » du produit.
- Etudier et déterminer les éléments de contrôle du procédé VERTILAP[®]. Ceci consiste à analyser le procédé de fabrication au travers des paramètres de production (alimentation, vitesse, température, etc.) et de les relier aux caractéristiques physiques et mécaniques des non-tissés 3D obtenus.
- Prouver la faisabilité industrielle d'un tel remplacement (non-tissé 3D à la place de la mousse polyuréthane) par la réalisation de pièces intérieures automobiles à l'aide de ce nouveau matériau.

Une meilleure connaissance et un meilleur contrôle des paramètres de fabrication a conduit à l'amélioration de la qualité des non-tissés 3D tout au long de l'étude. Ceci a permis d'effectuer une étude comparative entre la mousse polyuréthane et le non-tissé 3D.

Ce travail s'est articulé autour de quatre principales campagnes d'essais. Une campagne préalable de prise en main du prototype expérimental a permis de définir les paramètres de production ainsi que les limites de production de ce dernier. Les quatre campagnes d'essais ont porté chacune sur des essais de production et de caractérisation des produits VERTILAP[®] en vue d'apporter des améliorations significatives au produit obtenu. Les tâches effectuées lors de ces quatre campagnes d'essais seront détaillées dans la partie expérimentale de ce travail.

Ce chapitre présente le protocole de production des produits VERTILAP[®] ainsi que les méthodes de caractérisation de ces nouveaux produits.

2. Production de produits VERTILAP[®]

A partir du prototype expérimental à notre disposition, nous avons pu réaliser deux types de production de produits VERTILAP[®]. La description de ces types de production sera détaillée au chapitre 3. Le premier type de production utilisant le système de verticalisation, fait de façon discontinu, nous a permis de fabriquer des non-tissés 3D mono couches (Figure 17).



Figure 17. Non-tissé 3D VERTILAP[®] mono couche avant condensation des plis

Le second type de production utilisant la presse de contrecollage Meyer[®], fait de façon discontinu, nous a permis, à partir des non-tissés 3D mono couches, de réaliser des étoffes multicouches (Figure 18) proches des complexes automobiles que nous souhaitons remplacer.



Figure 18. Non-tissé 3D VERTILAP[®] laminé

2.1. Matériau utilisé

Tous les échantillons non-tissés 3D VERTILAP[®] présentés dans ce travail ont été réalisés à partir d'un câble qui se présente sous la forme d'une nappe de filaments. Le filament est caractérisé par une structure bi composante âme/peau, polyester/copolyester. Les structures âme et peau du fil sont respectivement en polyester et copolyester. Le copolyester a une température de fusion de 110 °C et une température de transition vitreuse Tg de 73 °C. Le polyester a quant à lui une température de fusion proche de 250 °C (*annexes II.1 et II.2*).

2.2. Procédure de production

Du fait de l'état expérimental du prototype VERTILAP[®] utilisé, les quatre étapes suivantes ont été systématiquement suivies lors de la production des échantillons :

1. Division du câble de façon manuelle au départ, puis à l'aide d'un dispositif spécifiquement conçu pour cette opération par la suite.
2. Ouverture du câble. Cette étape a évolué au fur et à mesure des différentes campagnes d'essais.

3. Passage par le prototype expérimental en vue de l'obtention du non-tissé 3D.
4. Passage par la presse de contrecollage Meyer® (Figure 19) en vue de l'obtention d'une étoffe multicouche. Le principe de cette presse sera décrit au chapitre 3. [43]

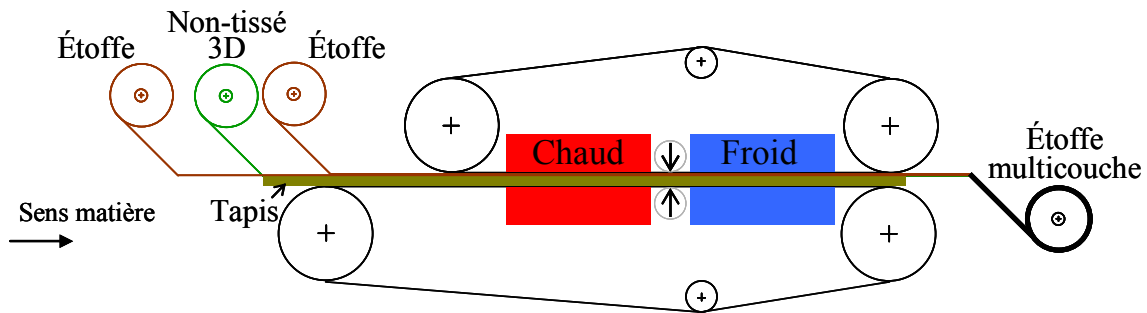


Figure 19. Schéma de principe du contrecollage à sec (presse Meyer®) [43]

2.3. Campagnes d'essais

Au cours des quatre campagnes d'essais, la température de plissage a été fixée au-dessus de la température de transition vitreuse de l'enveloppe copolyester du filament. Ceci afin de permettre la formation des plis dans la nappe de filaments. Ces valeurs de température sont données au paragraphe 2.1 précédent.

A l'issue de chaque campagne d'essais, des recommandations en termes d'améliorations du procédé ont été faites. Ceci a permis d'obtenir, à partir de la campagne N° 3, des produits beaucoup plus réguliers que précédemment et pouvant être utilisés pour réaliser des étoffes multicouches.

Le prototype expérimental tel qu'il était au début de la thèse, ne permettait pas de réaliser ces étoffes multicouches. Dans le cadre de cette opération de contrecollage par voie sèche présenté au paragraphe 1.3.2, nous avons des voiles non-tissés en copolyester comme liants entre les différentes couches textiles. *L'annexe II.3* présente les fiches techniques des liants utilisés. Ces liants présentaient une température de fusion comprise entre 65°C et 125°C. Les voiles utilisées présentaient une masse surfacique comprise entre 20 g/m² et 25 g/m². Différents types de couches textiles ont été utilisées dans le cadre de cette étude comme nous le verrons dans la partie expérimentale.

3. Mise en place des méthodes de caractérisation

Compte tenu de leur structure plissée, les non-tissés 3D VERTILAP® ne peuvent pas être considérés comme des matériaux textiles conventionnels. Nous avons donc choisi de développer des méthodes de caractérisations physiques et mécaniques en compression adaptées à leur structure particulière. Au-delà des tests, une connaissance fine des

comportements de ces nouveaux non-tissés 3D était indispensable. En plus de l'évaluation du confort par l'effet « soft touch », des méthodes de caractérisations spécifiques ont été élaborés tant au niveau des propriétés physiques que mécaniques.

3.1. Caractérisation physique

Afin de valider la conformité des non-tissés 3D VERTILAP[®] produits, il nous a fallu définir des paramètres de caractérisation de ces nouveaux matériaux. La structure non conventionnelle de ces non-tissés 3D nous a imposé d'étudier ses propriétés physiques, notamment la modélisation géométrique du pli créé.

Compte tenu de la matière d'alimentation, à savoir la nappe de filaments, il s'est avéré nécessaire de faire l'évaluation de la régularité de structure du non-tissé 3D. Pour cela, nous avons mis au point une méthode d'analyse d'image afin d'observer l'homogénéité de la répartition de densité de matière dans la structure plissée.

Suite aux différentes évolutions du prototype expérimental, le champ de caractérisation du non-tissé 3D a été élargi aux caractérisations de perméabilité à l'air et de conductivité thermique.

3.2. Caractérisation mécanique

Une des caractéristiques importantes à étudier pour ce non-tissé 3D est le comportement mécanique en compression puisque la couche de mousse apporte au complexe textile l'effet « soft touch » qu'il nous faut reproduire. Cet effet « soft touch » influence fortement le confort évalué du produit fini. Compte tenu de l'importance de cette exigence de confort pour les matériaux de l'habitacle automobile, nous avons choisi de focaliser notre caractérisation mécanique sur les caractéristiques en compression. Cette caractérisation nous permettra de valider la conformité du nouveau non-tissé 3D pour une solution de remplacement de la mousse polyuréthane.

Deux méthodes de caractérisation ont été définies et utilisées. Une en suivant les recommandations du Kawabata Evaluation Systems for Fabrics (KES-F) [44] et la seconde directement inspirée par les cahiers des charges automobiles. La première méthode a été conduite sur le module de compression KES-FB3 du KES-F, et la seconde sur une machine de traction/compression Instron. L'étude du comportement en compression a porté sur l'évaluation des paramètres de résilience, de compressibilité, d'énergie dissipée, de contrainte, etc. des non-tissés 3D VERTILAP[®] mono couches et multicouches.

4. Application automobile

La démarche de développement procédé-produits envisagée pourra induire, tout au long de l'étude, un retour d'expérience qui permettra de faire évoluer le procédé de fabrication après chaque campagne de production/caractérisation.

Cette amélioration permanente et constante de l'outil de fabrication permettra de produire un non-tissé 3D présentant des caractéristiques physiques et mécaniques proches des mousses polyuréthane que l'on veut remplacer. Les résultats attendus devront permettre d'atteindre l'objectif de faisabilité du remplacement industriel des étoffes complexes automobiles actuelles. Pour ce faire, la réalisation de produits finis automobiles tels qu'une housse d'appui-tête et un panneau de porte devra être menée et devra également permettre de montrer si ces nouveaux non-tissés 3D présentent de bonnes aptitudes à la formabilité.

CHAPITRE 3

PRESENTATION DU PROTOTYPE

EXPERIMENTAL VERTILAP®

Ce chapitre décrit les différents éléments du procédé de fabrication VERTILAP®. Le prototype expérimental utilisé dans le cadre de ce travail est également présenté ainsi que son modèle cinétique, ses paramètres de contrôle et ses limites de production.

1. Présentation générale du procédé VERTILAP®

Le procédé industriel VERTILAP® tel que défini par le constructeur de machines N. SCHLUMBERGER, devrait être une machine constituée de quatre fonctions principales et commandée par un système électronique. Les quatre fonctions principales du procédé de fabrication sont les suivantes :

- Fonction 1 : ouverture et défibrage du câble d'alimentation
- Fonction 2 : verticalisation de la nappe fibreuse
- Fonction 3 : extraction et condensation des plis formés
- Fonction 4 : contrecollage des non-tissés 3D plissés

Le schéma descriptif du procédé tel que défini est illustré à la Figure 20.

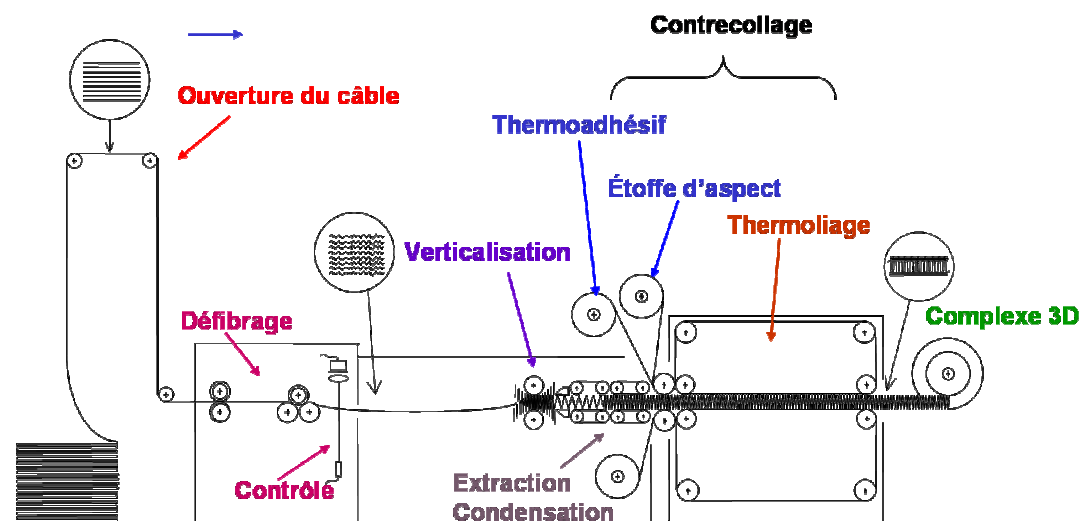


Figure 20. Description du procédé VERTILAP®

Dans le cadre de ce travail de recherche, l'alimentation de cette machine expérimentale a été effectuée avec un câble se présentant sous la forme de nappe de filaments continus.

1.1. Description des fonctions du procédé VERTILAP®

1.1.1. Ouverture et défibrage

Ces opérations sont indispensables lorsqu'on utilise comme matière d'alimentation un câble. En effet, de par sa fabrication, le câble se compose de plusieurs groupes de filaments frisés et

accolés les uns à côté des autres (Figure 21). La fabrication industrielle du câble se fait par un procédé d'extrusion identique à celui de la production de filaments. Ce procédé permet de filer plusieurs milliers de filaments en utilisant soit une large extrudeuse alimentant plusieurs filières, soit plusieurs extrudeuses groupées. [45, 46] Le procédé d'extrusion des filaments est décrit en *annexe III.1*.

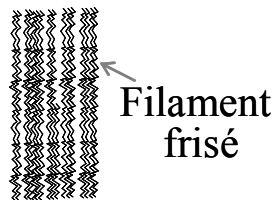


Figure 21. Câble composé de faisceaux de filaments frisés

L'ouverture du câble va permettre d'étaler la nappe de filaments de manière homogène sur toute la laize de la machine. Le défibrage va, quant à lui, permettre d'individualiser les filaments contenus dans la nappe. Cette première fonction du procédé aura un impact majeur sur la qualité de la matière entrante et par conséquent sur celle du produit sortant.

1.1.2. Verticalisation

Cette fonction permet d'orienter verticalement les fibres de la nappe d'alimentation. L'opération de verticalisation consiste à plisser la nappe fibreuse à l'aide de deux tambours à lames. Sous l'action de la température, les lames des tambours de plissage vont marquer les plis dans la nappe de filaments. Pour cela, la température de plissage devra être supérieure à celle de transition vitreuse de l'enveloppe copolyester du filament afin de permettre le formage de la matière.

1.1.3. Extraction et Condensation

La zone d'extraction et de condensation est située en sortie de la zone de plissage. Elle se compose de manchons d'extraction et de manchons de condensation. La nappe marquée de plis est extraite de la zone de plissage par les manchons d'extraction et elle est ensuite introduite dans les manchons de condensation où les plis seront tassés les uns sur les autres. Le non-tissé obtenu présente une structure tridimensionnelle compacte. Ces deux opérations d'extraction et de condensation auront un impact majeur sur l'orientation verticale des plis.

1.1.4. Contrecollage

La structure plissée et compacte obtenue peut être laminée avec des revêtements textiles (tissu, tricot ou non-tissé) afin d'obtenir une étoffe complexe 3D. Pour cela, une opération de contrecollage à sec est réalisée en utilisant un adhésif thermocollant. Ce dernier joue le rôle de

liant entre le non-tissé 3D et les revêtements textiles. L'étoffe multicouche obtenue pourra être enroulée sur un tube ou découpée en plaques qui seront superposées.

1.2. Présentation du prototype expérimental étudié

Nous avons travaillé avec un prototype expérimental VERTILAP® ayant une laize de 20 cm. Ce prototype expérimental permet de réaliser des plis d'une hauteur comprise entre 4 mm et 8 mm. Cette machine sera tout au long de ce travail appelée prototype VERTILAP® 20cm / 6mm (Figure 22). Ce prototype expérimental est principalement caractérisé par les fonctions d'ouverture et défibrage du câble, de verticalisation, d'extraction et de condensation. La configuration de la machine n'intégrait pas la fonction de contrecollage.

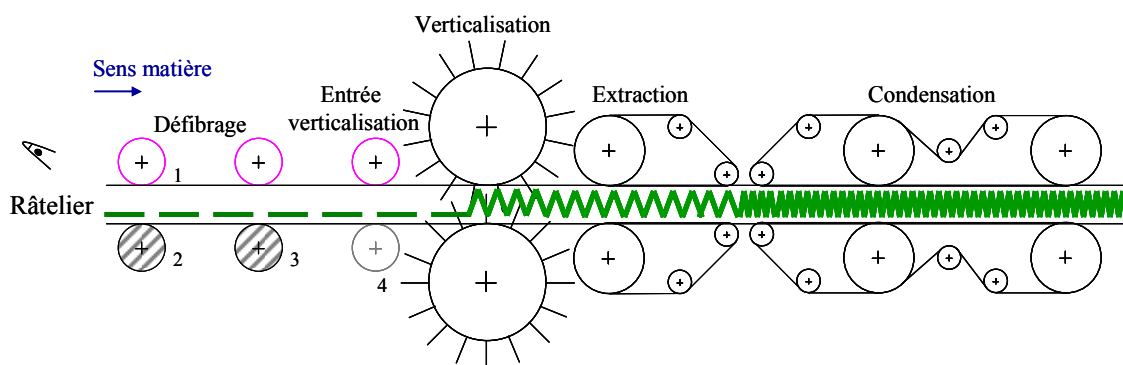


Figure 22. Schéma de principe du proto VERTILAP® 20cm / 6mm

1.2.1. Ouverture et défibrage

La première fonction du procédé qui correspond à l'ouverture et au défibrage du câble a été dans un premier temps manuelle et instrumentée par la suite. L'ouverture du câble a été effectuée dans un râtelier d'alimentation composé d'une partie verticale et d'une partie horizontale solidaire de la machine. La partie verticale est destinée à contraindre le câble, par l'effet de son propre poids, à ouvrir les boucles de câble qui pourraient se trouver dans la balle de câble. La partie horizontale du râtelier est constituée de barres d'embarbage et de guidage qui permettent respectivement de donner de la tension à la matière entrante et de la guider vers la zone de défibrage (Figure 23).

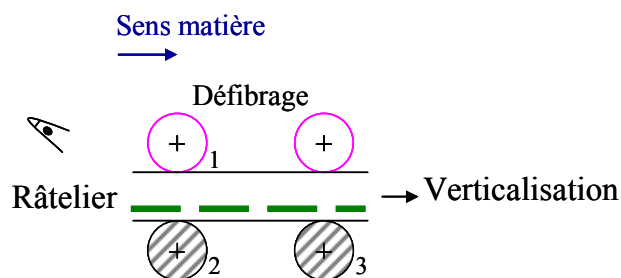


Figure 23. Zone de défibrage du proto VERTILAP® 20cm / 6mm

La zone de défibrage est composée de deux paires de cylindres : {1-2} et {1-3}. Sur le plan supérieur sont disposés des cylindres de pression en caoutchouc (1) et sur le plan inférieur sont disposés des cylindres à hélices droites (2) et (3).

Les cylindres (2) et (3) jouent le rôle de défibreur en permettant l'individualisation des filaments contenus dans le câble. Dans notre étude, chacun des cylindres (2) et (3) étaient pourvus de cannelures profondes et de pas élevé. Tels qu'ils étaient conçus, ils ne permettaient pas d'effectuer un défibrage efficace car le pas des hélices était trop grand et la distance entre les deux cylindres était insuffisante. Nous avons alors utilisé une machine de convertissage qui disposait d'une zone de défibrage industrielle composée d'un premier groupe de deux cylindres à hélices droites (2) surmonté d'un cylindre de pression (1), et suivie d'un second groupe de deux cylindres cannelés (3) surmonté d'un autre cylindre de pression (1). Le pas de l'hélice du cylindre (2) est beaucoup plus faible que celui du prototype expérimental VERTILAP® 20cm/6mm, ce qui permet de mieux individualiser les filaments composant le câble. Les deux groupes de cylindres présentent une distance entre cylindres beaucoup plus grande que sur le proto 20cm/6mm, ce qui permet au même filament de se retrouver successivement et plusieurs fois tendu puis relâché par rapport à son voisin. Le principe du défibrage est illustré à la Figure 24. Il consiste à tendre les filaments entre les cylindres (2) et (3) de manière à permettre à ce que deux filaments voisins soient successivement et alternativement tendus puis relâchés ce qui aura pour effet d'améliorer l'individualisation des filaments accolés entre eux. Le cylindre à hélices (2) présente des parties creuses et des parties pleines. Lorsque le filament se trouve dans la partie creuse, il ne subit pas de tension. Avec le mouvement de rotation des cylindres, ce filament va avancer et se retrouver sur la partie pleine du cylindre (2). A ce moment, il sera tendu par rapport à son voisin qui restera détendu. La tension appliquée entre les cylindres (2) et (3) est telle que le matériau n'est sollicité que dans sa zone de déformation élastique. En effet, le filament est sollicité en traction de manière à ne pas modifier ses propriétés mécaniques. Le comportement en traction de la nappe de filaments est présenté en *annexe III.2*.

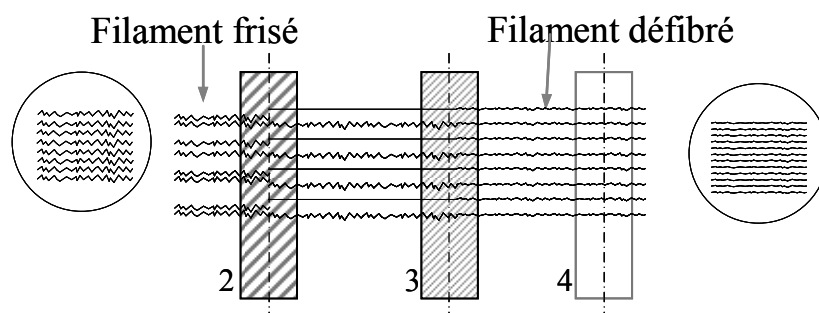


Figure 24. Principe du défibrage

1.2.2. Verticalisation

La zone de verticalisation (Figure 25) qui correspond au plissage de la nappe fibreuse se compose d'une entrée et de deux tambours à lames. Un cylindre de pression et un cylindre à surface lisse forment l'entrée du plissage. Un chauffage par rayonnement infra rouge est orienté vers l'élément plisseur. La configuration du prototype ne permet pas de maîtriser parfaitement le flux thermique.

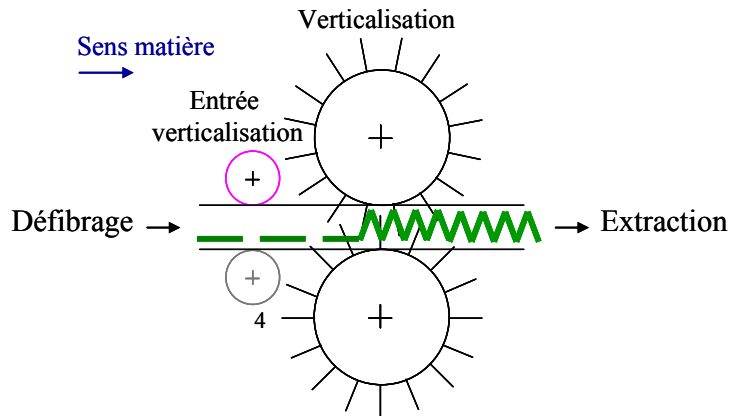


Figure 25. Zones de verticalisation du proto VERTILAP® 20cm / 6mm

1.2.3. Extraction et condensation

La zone d'extraction et de condensation (Figure 26) est formée par deux groupes de manchons ; les manchons d'extraction et de condensation. Un traitement thermique est appliqué dans cette zone. Il a pour but de figer la structure compactée. Au début de cette étude, ces manchons ne permettaient pas d'obtenir une bonne qualité de condensation de la structure plissée et le traitement thermique n'était pas optimum. En effet, seul un traitement à chaud sans refroidissement était appliqué sur la matière. A cet effet, nous avons dû équiper ultérieurement la zone de condensation d'un moyen de refroidissement par air comprimé de la nappe plissée ainsi que d'une surface de refroidissement qui suivait la surface de chauffage.

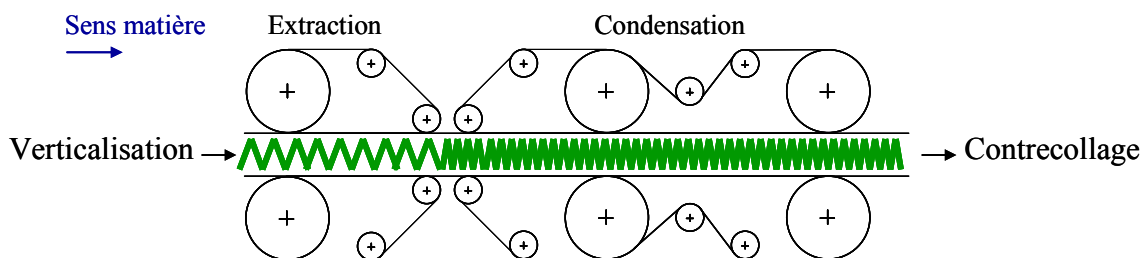


Figure 26. Zone d'extraction et de condensation du proto VERTILAP® 20cm / 6mm

1.2.4. Contrecollage

Le prototype en l'état ne permettait pas de réaliser des étoffes multicouches par contrecollage. Nous avons dû effectuer cette opération de manière discontinue sur une presse de

contrecollage à sec. Pour cela, nous avons utilisé la presse Meyer® (cf. 2.2 du chapitre 2) mise à disposition par la société PROTECHNIC. Le principe consiste à assembler trois couches d'étoffes : le non-tissé 3D obtenu par le procédé VERTILAP et deux étoffes de revêtements qui peuvent être identiques ou différentes. L'assemblage de ces trois couches est réalisé dans un four constitué de deux parties ; une partie chauffante dans laquelle l'adhésif est fondu et une partie froide dans laquelle la liaison entre les différentes couches est consolidée. Le refroidissement joue un rôle essentiel dans la consolidation de la structure plissée lorsque le liant est de type Hot Melt, puisque c'est en refroidissant jusqu'à la température ambiante que les colles de type Hot Melt se solidifient. L'étoffe multicouche ainsi formée pourra être conditionnée soit par enroulement, soit par découpe. Les paramètres tels que la température, la vitesse et la pression des cylindres permettent de contrôler le procédé de fabrication.

1.3. Modèle cinétique du prototype expérimental VERTILAP®

Le modèle cinétique (Figure 27) du proto VERTILAP® 20cm / 6mm a été défini afin de déterminer les relations entre les vitesses linéaires des différentes zones de la machine. Ces relations prennent en compte des facteurs tels que l'étirage, l'alimentation, le rapport de condensation, etc. Au niveau de l'entrée de verticalisation, on aura une suralimentation des tambours de plissage, nécessaire pour former la structure plissée. Cette suralimentation sera réglée par un indicateur de suralimentation dans le système de commande de la machine. Cet indicateur va permettre d'alimenter plus ou moins la zone de plissage. En sortie de cette zone, la matière devra être plus ou moins tendue afin d'être extraite. Cet étirage d'extraction sera réglé par un indicateur d'étirage dans le système de commande de la machine. En sortie d'extraction, les plis sont tassés les uns sur les autres dans les manchons de condensation.

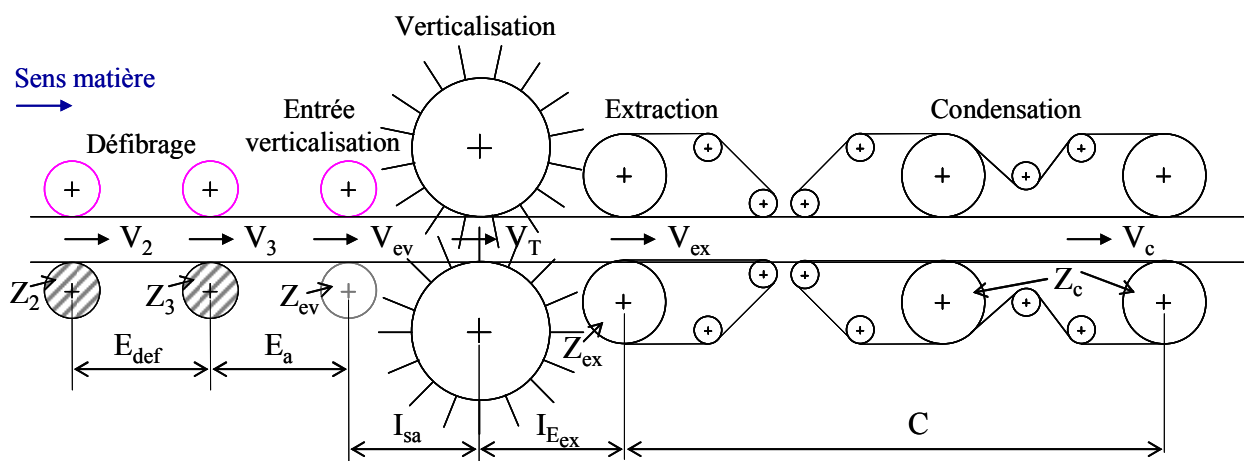


Figure 27. Modèle cinétique du proto VERTILAP® 20cm / 6mm

Les paramètres du modèle cinétique précédemment cités sont définis ci-dessous :

V_2 (m/min) : Vitesse linéaire du cylindre (2) qui correspond aussi la vitesse d'entrée de la machine

V_3 (m/min) : Vitesse linéaire du cylindre (3) qui correspond à la vitesse de défibrage

V_{ev} (m/min) : Vitesse linéaire d'entrée de verticalisation

V_T (m/min) : Vitesse linéaire des tambours de plissage qui correspond également à la vitesse de la machine

V_p (m/min) : Vitesse linéaire de plissage

V_{ex} (m/min) : Vitesse linéaire des manchons d'extraction

V_c (m/min) : Vitesse linéaire des manchons de condensation qui correspond aussi à la vitesse de sortie de la machine

E_{def} (SD) : Etirage de défibrage

E_a (SD) : Etirage d'alimentation

I_{sa} (%) : Indicateur de suralimentation

I_{Eex} (%) : Indicateur de la tension d'extraction

C (SD) : Rapport de condensation

Les paramètres E_a , E_{def} , et C sont définis à partir des diamètres des cylindres D_2 , D_3 , D_{ev} , D_{ex} et D_c ainsi que du nombre de dents des pignons d'engrenage Z_2 , Z_3 , Z_{ev} , Z_{ex} et Z_c . Ces trois paramètres sont définis par :

$$E_{def} = \frac{Z_3 \cdot D_2}{Z_2 \cdot D_3} = \frac{Z_3}{Z_2} \quad \text{Equation (1)}$$

$$E_a = \frac{Z_{ev} \cdot D_3}{Z_3 \cdot D_{ev}} \quad \text{Equation (2)}$$

$$C = \frac{Z_c \cdot D_{ex}}{Z_{ex} \cdot D_c} = \frac{Z_c}{Z_{ex}} \quad \text{Equation (3)}$$

On a :

$$D_2 = D_3 = D_{ex} = D_c = 40 \text{ mm}$$

$$D_{ev} = 62,5 \text{ mm}$$

Avec le choix des pignons suivants :

$$Z_2 = 31 \text{ dents}$$

$$Z_3 = 23 \text{ dents}$$

$$Z_{ev} = 34 \text{ dents}$$

On obtient :

$$E_{def} = 1,35$$

$$E_a = 1,06$$

Les différentes valeurs du rapport de condensation C sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Différentes valeurs de réglage du rapport de condensation C

Z_{ex}	32 dents	28 dents	26 dents	26 dents
Z_c	67 dents	67 dents	67 dents	70 dents
C	C₁ = 2,1	C₂ = 2,4	C₃ = 2,6	C₄ = 2,7

Le rapport entre les vitesses d'entrée de la machine V_2 et du cylindre défibrant V_3 est donné par la relation :

$$V_3 = E_{def} \cdot V_2 = 1,35 \cdot V_2 \quad \text{Equation (4)}$$

La vitesse d'entrée de verticalisation V_{ev} est exprimée en fonction de la vitesse V_3 par la relation :

$$V_{ev} = E_a \cdot V_3 = 1,06 \cdot V_3 \quad \text{Equation (5)}$$

La vitesse des tambours V_T , définie dans ce modèle cinétique correspond à la vitesse linéaire calculée au diamètre médian entre les deux tambours. La Figure 28 illustre une description du tambour de plissage. On distingue un diamètre intérieur (D_{int}), un diamètre extérieur (D_{ext}), et un diamètre primitif (D_p), qui est le diamètre médian entre les deux tambours.

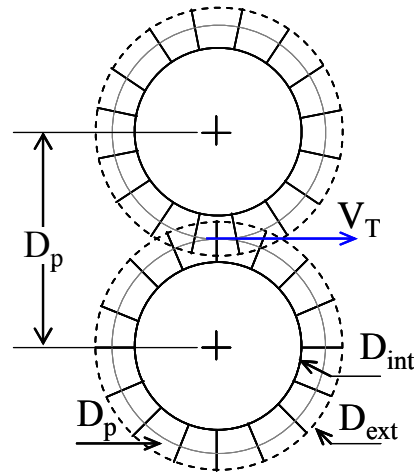


Figure 28. Schéma descriptif des tambours de plissage

La vitesse de plissage V_p s'exprime à partir de la vitesse des tambours V_T qui correspond à la vitesse de commande de la machine. Nous avons mesuré à l'aide d'un tachymètre la vitesse réelle de plissage pour des vitesses données de machine. L'annexe III.3 présente les mesures expérimentales et les tracés expérimentaux de vitesses. Le tracé de V_p en fonction de V_T a permis de déterminer l'expression suivante :

$$V_p = 0,04.V_T + 0,51 \quad \text{Equation (6)}$$

Nous avons procédé de la même manière pour déterminer les relations entre les vitesses d'entrée de verticalisation V_{ev} et d'extraction V_{ex} en fonction de la vitesse de plissage V_p (annexe 6). Ces relations prennent en compte les indicateurs de suralimentation I_{sa} et de tension d'extraction I_{Tex} . La relation entre V_{ev} et V_p est donnée par :

$$V_{ev} = \left(1 + \frac{I_{sa}}{100}\right). (4,33.V_p - 2,37) \quad \text{Equation (7)}$$

Soit,

$$V_{ev} = \left(1 + \frac{I_{sa}}{100}\right). (0,17.V_T - 0,16) \quad \text{Equation (8)}$$

La relation entre V_{ex} et V_p est donnée par :

$$V_{ex} = \left(1 + \frac{I_{Ex}}{100}\right). (2,6.V_p - 1,4) \quad \text{Equation (9)}$$

Soit,

$$V_{ex} = \left(1 + \frac{I_{Ex}}{100}\right). (0,1.V_T - 0,07) \quad \text{Equation (10)}$$

La relation entre les vitesses de condensation V_c et d'extraction V_{ex} est donnée par le rapport de condensation C . On a :

$$V_c = \frac{1}{C} \cdot V_{ex} \quad \text{Equation (11)}$$

La vitesse de condensation V_c qui correspond également à la vitesse de sortie du prototype expérimental peut être exprimée en fonction du rapport de condensation C , de l'indicateur de la tension d'extraction $I_{E_{ex}}$ et la vitesse de plissage V_p . On a :

$$V_c = \frac{1}{C} \cdot \left(1 + \frac{I_{E_{ex}}}{100}\right) \cdot (2,6 \cdot V_p - 1,4) \quad \text{Equation (12)}$$

Soit,

$$V_c = \frac{1}{C} \cdot \left(1 + \frac{I_{E_{ex}}}{100}\right) \cdot (0,1 \cdot V_T - 0,07) \quad \text{Equation (13)}$$

On peut également exprimer la vitesse d'entrée de la machine en fonction de celle du plissage par la relation :

$$V_2 = \frac{1}{E_{def} \cdot E_a} \cdot \left(1 + \frac{I_{sa}}{100}\right) \cdot (4,33 \cdot V_p - 2,37) \quad \text{Equation (14)}$$

Soit,

$$V_2 = \frac{1}{E_{def} \cdot E_a} \cdot \left(1 + \frac{I_{sa}}{100}\right) \cdot (0,17 \cdot V_T - 0,16) \quad \text{Equation (15)}$$

Le modèle cinétique précédemment décrit montre l'existence de deux chaînes cinétiques. La machine telle qu'elle a été conçue est dotée d'une commande centralisée au niveau du moteur de commande des tambours de plissage. Ce dernier fait donc office de moteur principal de la machine. Il entraîne à la fois les moteurs de commande de l'entrée et de la sortie de la zone de plissage. Le moteur d'entrée commande les cylindres d'entrée de verticalisation tandis que le moteur de sortie commande les manchons d'extraction par des pignons et des chaînes d'engrenage. On a affaire dans ce cas à une chaîne cinétique atypique.

Les fonctions de la machine ainsi que le modèle cinétique ont permis de déterminer les paramètres de contrôle et les limites de productions du prototype expérimental.

2. Paramètres de contrôle et limites de production du prototype expérimental

A partir du proto VERTILAP® 20cm / 6mm, nous avons effectué une série d'essais au cours de l'étape initiale de prise en main de la machine. Ces essais ont permis d'identifier les paramètres de contrôle du procédé de fabrication. Il s'agit de la préparation de la matière d'alimentation, des conditions de température et des paramètres de vitesses dans les différentes fonctions de la machine.

2.1. La matière d'alimentation

La matière d'alimentation utilisée, à savoir un câble de filaments, représente le paramètre de variabilité le plus important du procédé. En effet, la qualité (aspect, régularité) va conditionner la qualité du produit obtenu en sortie du procédé. Compte tenu de la faible laize du prototype VERTILAP® 20cm / 6mm qui est de 20 cm, il était nécessaire d'alimenter la machine avec un câble de faible titre. Le câble d'alimentation a été obtenu en divisant un câble initial de 90ktex en plusieurs câbles de titres plus faibles.

La division du câble initial a été effectuée de façon manuelle au début, puis à l'aide d'un dispositif spécifiquement conçu pour cette opération par la suite. Cette division nécessite de séparer à « droit filament » les filaments dans la nappe du câble. Il s'agit d'une opération délicate qui a un impact majeur sur la régularité de la densité de matière dans la nappe fibreuse. En effet, comme le montre la Figure 29, nous avons observé une variation dans la largeur de la nappe au moment de la division manuelle du câble. Ce défaut est moins marqué lors de la division à l'aide du dispositif spécial.

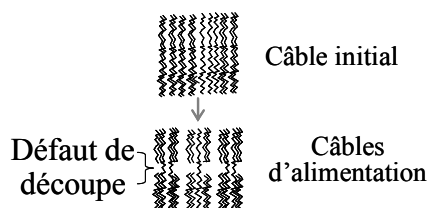


Figure 29. Variation de la laize dans le câble d'alimentation lors de l'opération de division manuelle

2.2. Les paramètres de vitesses

La configuration du prototype expérimental en l'état est telle qu'il existe une dépendance entre les vitesses d'entrée de verticalisation, du tambour de plissage et d'extraction. Ces vitesses conditionnent la verticalisation de la nappe fibreuse et présentent donc un impact majeur dans la formation de la structure 3D du non-tissé. Les vitesses d'entrée de la machine, de défibrage et de condensation sont également liées aux vitesses précédemment citées par

des relations mettant en évidence les paramètres de réglage (tensions, engrenage, etc.) de la machine.

2.3. Les paramètres de températures

Un des éléments essentiels dans le procédé de verticalisation est relatif aux conditions de températures. En effet, les conditions de température sont indispensables à la formation du pli. Au niveau du proto VERTILAP® 20cm / 6mm, le chauffage dans la zone de verticalisation est obtenu grâce à un radiateur infra rouge et un dispositif de soufflage à air chaud dans la zone de condensation. Le radiateur infra rouge maintient constante la température des lames des tambours de plissage. La température de consigne du radiateur infra rouge a été fixée de façon à ce que la température réelle des lames se situe au-delà de celle de transition vitreuse de l'enveloppe copolyester du filament qui est de 73°C. Nous avons observé un écart négatif moyen de 10°C entre la valeur de consigne et la valeur réelle. Cet écart assez important montre bien que le flux thermique n'est pas parfaitement maîtrisé. De plus l'asservissement en température n'est pas satisfaisant. En effet, tant que la température de consigne haute n'est pas atteinte, le radiateur est alimenté et fonctionne à pleine puissance. Dès que la température de consigne haute est atteinte, l'alimentation du radiateur est supprimée et le rayonnement infra rouge interrompu. Les lames refroidissent alors lentement. Lorsque la température atteint une valeur de consigne basse, alors le radiateur est à nouveau alimenté. Cette succession d'arrêt et de mise en marche ne permet pas de maintenir constante la température des lames des tambours.

Le chauffage dans la zone de condensation est assuré par un générateur de chaleur réglable suivant trois positions P0 (hors service, température ambiante à 19°C), P1 (233°C, 1,6 m/s) et P2 (216°C, 3 m/s) qui correspondent à une température et une vitesse de flux d'air chaud données. La zone de condensation initialement équipée d'une surface de chauffe a été modifiée par la suite afin d'intégrer un moyen de refroidissement (Figure 30). L'air froid est réglé par la pression de l'air comprimé. Cet apport en air froid aura pour rôle de favoriser la consolidation de la structure plissée. En effet, ce refroidissement permettra de mieux contrôler la compacité de la structure 3D.

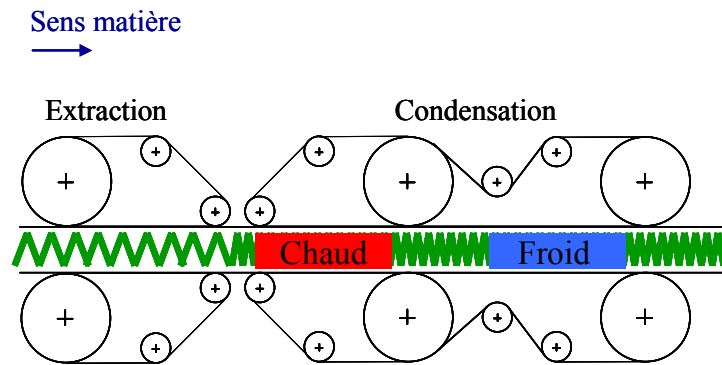


Figure 30. Répartition du flux thermique dans la zone de condensation

2.4. Les limites de production du prototype expérimental VERTILAP®

Le modèle cinétique et les essais préliminaires ont permis de déterminer les limites minimum et maximum de variation des paramètres de contrôle de la machine. Les valeurs de ces limites de production sont récapitulées dans le Tableau 4.

Tableau 4. Limites de production du proto VERTILAP® 20cm / 6mm

Paramètres de contrôle	Minimum	Maximum
Titre du câble, T (ktex)	10	30
Vitesse d'entrée de la machine, V_2 (m/min)	0,93	3,46
Vitesse de défilage, V_3 (m/min)	1,26	4,67
Vitesse d'entrée de verticalisation, V_2 (m/min)	1,33	4,95
Vitesse du tambour de plissage, V_p (m/min)	0,91	1,71
Vitesse d'extraction, V_{ex} (m/min)	0,87	3,79
Vitesse de condensation, V_c (m/min)	0,41	1,52
Température des lames du tambour de plissage, T_p (°C)	70	80
Température du décapeur thermique, T_F (°C)	19	233
Pression d'air comprimé, P (bar)	0,5	2
Rapport de condensation, C	2,1	2,7

3. Conclusion

Au vu des points évoqués ci-dessus et après la première campagne de mesures, il apparaît clairement que la préparation de la matière d'alimentation, les réglages de vitesses et de température sont des éléments indispensables dans la maîtrise du procédé de fabrication. Le prototype expérimental, en l'état devra subir plusieurs améliorations afin de répondre à

l'obtention du non-tissé 3D souhaité. Notre étude contribue à optimiser l'efficacité de ce prototype par la maîtrise des paramètres de contrôle du procédé de fabrication.

CHAPITRE 4

PARTIE EXPERIMENTALE

4.1. INTRODUCTION

Cette partie présente les quatre principales campagnes d'essais menées au cours de ce travail de ce thèse qui ont permis la compréhension et l'amélioration du procédé et des produits VERTILAP[®]. Au cours de ces campagnes, nous avons travaillé avec le prototype expérimental VERTILAP[®] de laize 20 cm permettant de réaliser des non-tissés 3D d'une épaisseur moyenne de 6 mm.

Les objectifs définis pour chacune des campagnes d'essais ont été les suivants :

- Campagne d'essais N° 1 :
 - Production de non-tissés 3D VERTILAP[®].
 - Amélioration du prototype expérimental VERTILAP[®].
 - Mise en place de méthodes de caractérisation des non-tissés 3D produits.
- Campagne d'essais N° 2 :
 - Application des recommandations apportées lors de la précédente campagne d'essais.
 - Production de non-tissés 3D VERTILAP[®].
 - Amélioration du prototype expérimental VERTILAP[®].
 - Caractérisation des produits obtenus avec les méthodes développées lors de la campagne N° 1.
- Campagne d'essais N° 3 :
 - Application des recommandations apportées lors de la précédente campagne d'essais.
 - Réalisation de produits VERTILAP[®] mono couches et multicouches.
 - Mise au point du prototype expérimental VERTILAP[®].
 - Caractérisation des produits obtenus
 - Etude comparative entre les produits non-tissés 3D VERTILAP[®] et les mousses polyuréthane.

- Campagne d'essais N° 4 :

- Application des recommandations apportées lors de la précédente campagne d'essais.
- Réalisation de produits VERTILAP[®] mono couches et multicouches plus légers.
- Mise au point du prototype expérimental VERTILAP[®].
- Caractérisation des produits obtenus
- Réalisation de pièces automobiles de types housse d'appui-tête et panneau de porte

Les quatre chapitres présentés dans cette partie expérimentale décrivent les campagnes d'essais précédemment citées.

CHAPITRE 4.2.

CAMPAGNE D'ESSAIS N° 1

Ce chapitre présente la prise en main du prototype VERTILAP[®], la mise en place de la procédure expérimentale ainsi que la mise en évidence des paramètres clefs du procédé. La validation des choix techniques se fera au travers de la caractérisation des non-tissés 3D VERTILAP[®] produits. Au cours de ce chapitre, les différentes méthodes de caractérisations seront présentées, et adaptées en fonction des spécificités du produit obtenu. A l'issue de cette première campagne de production et de caractérisation, un certain nombre de recommandations seront faites afin de faire progresser le prototype en termes de reproductibilité et de fiabilité au regard des caractéristiques étudiées.

1. Production de non-tissés 3D VERTILAP[®]

La réalisation de non-tissés 3D VERTILAP[®] à partir du prototype VERTILAP[®] 20cm / 6mm a été organisée en deux étapes principales. La première étape a consisté à préparer la matière d'alimentation et la seconde à effectuer la transformation de cette matière au travers du prototype expérimental.

1.1. Préparation de la matière d'alimentation

La matière d'alimentation utilisée est un câble qui se présente sous la forme d'un toron de filaments accolés les uns aux autres. Le prototype est limité en terme de titre entrant. Le câble initial, d'une masse linéique de 90 ktex, a donc du être divisé manuellement de façon à obtenir 4 câbles présentant un titre moyen d'environ 23 ktex. Le déroulement de cette opération manuelle a été le suivant :

- Etendre une longueur de câble d'environ 100m.
- Subdiviser la largeur du câble en 4 portions égales.
- Séparer les différentes portions le long de la nappe à l'aide de ciseaux. Ces derniers sont utilisés pour défaire les enchevêtrements des filaments dans le câble.

Il est important de noter que cette technique manuelle ne permet pas une division à « droit filament » de la nappe. Ceci induit une variation de la laize du câble d'alimentation mais surtout de sa masse linéique. Il n'a donc pas été possible d'obtenir des câbles de largeurs reproductibles et présentant une homogénéité dans la répartition des filaments en laize. C'est la raison pour laquelle, le titre de la matière sera toujours considéré comme un paramètre variable de production. Ceci entraîne bien évidemment une irrégularité en terme de répartition de la densité de matière dans la nappe. Des sections de forte densité et de faible densité peuvent être distinguées dans le câble comme le montre la Figure 31. Cette irrégularité s'explique par la formation du câble en paquets de filaments accolés les uns aux autres et par la méthode actuelle de séparation et d'ouverture du câble initial.



Figure 31. Irrégularité d'aspect dans le câble d'alimentation

1.2. Paramètres de production

Les paramètres de production correspondent aux paramètres de contrôle du procédé présentés au paragraphe 1.3 du chapitre 3 de ce présent travail. Il s'agit du titre du câble, des indicateurs des étirages d'alimentation I_{sa} et d'extraction I_{Eex} , des paramètres de température et de vitesses de plissage.

Lors de cette première campagne d'essais, nous avons réalisés, à partir du protocole de préparation de la matière précédemment décrit, des câbles de titre compris entre 10 ktex et 26 ktex. La maîtrise du procédé de fabrication n'était pas parfaite et ne nous a pas permis de faire varier les paramètres de réglages les uns après les autres. Nous avons donc fait varier le moins de paramètres de réglages possibles. Un grand nombre d'essais a donc été nécessaire afin de pouvoir obtenir des produits en adéquation avec nos attentes. L'ensemble de ces réglages est présenté en *annexe IV.1*.

Dans cette étude, nous présenterons six câbles de titres compris entre 15 ktex et 24 ktex. Les essais de production ont été menés en maintenant constants les étirages d'alimentation E_a et de défibrage E_{def} . Les étirages E_a et E_{def} ont été fixés respectivement à 1,06 et 1,35. Lors d'un essai de production, on fixe la température de consigne dans la zone de plissage ainsi que celle du générateur de chaleur dans la zone de condensation. On fixe la vitesse des tambours de plissage à une valeur donnée pour laquelle on fait varier les indicateurs des étirages d'alimentation I_{sa} et d'extraction I_{Eex} , et le rapport de condensation C . Le générateur de chaleur n'était pas en service (position P0), ce qui correspond à une température ambiante T_F de $19^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Les paramètres réglables I_{sa} , I_{Eex} et C ont variés respectivement dans les intervalles $[-10\% ; 17\%]$, $[13\% ; 15\%]$ et $[2,4 ; 2,7]$. Les différents réglages de production sont présentés dans le Tableau 5

Tableau 5. Paramètres de production lors de la première campagne d'essais

Câbles	Titre (ktex)	Températures (°C)				Réglages machine				Vitesses de production (m/min)					
		T _{consigne}	T _{sonde}	T _{tambours}	T _F	C	I _{sa} (%)	V _T	I _{Eex} (%)	V ₂	V ₃	V _{ev}	V _p	V _{ex}	V _c
1	15	40	45	80	19	2,4	10	13	45	1,61	2,17	2,30	1,03	1,85	0,77
2	17	40	45	72	19	2,4	17	13	45	1,71	2,31	2,45	1,03	1,85	0,77
3	15	45	50	77	19	2,6	0	13	50	1,46	1,97	2,09	1,03	1,92	0,74
4	24	45	73	80	19	2,6	-6	15	50	1,60	2,16	2,29	1,11	2,23	0,86
5	15	60	60	70	19	2,7	-10	15	50	1,53	2,07	2,19	1,11	2,23	0,83
6	24	65	65	90	19	2,7	-10	15	45	1,53	2,07	2,19	1,11	2,15	0,80
Moy	18	49	56	78	19	26	0	14	48	1,57	2,12	2,25	1,07	2,04	0,79
CV (%)	24	22	20	9	19	5	-	8	6	5	5	5	4	9	5
Min	15	40	45	70	19	2,4	-10	13	45	1,46	1,97	2,09	1,03	1,85	0,74
Max	24	65	73	90	19	2,7	17	15	50	1,71	2,31	2,45	1,11	2,23	0,86

1.2.1. Variation des vitesses de production

D'après le modèle cinétique de la machine, les vitesses d'entrée V_2 , de défibrage V_3 et d'entrée de verticalisation V_{ev} sont proportionnelles et varient donc de la même façon. Il en est de même pour les vitesses d'extraction V_{ex} et de condensation V_c . L'irrégularité de la matière entrante (variation de laize et de masse linéique) contraint de faire varier simultanément les vitesses V_{ev} et V_{ex} afin d'obtenir un étirage permettant le plissage de la matière. Les vitesses V_{ev} et V_{ex} ont variés respectivement entre les intervalles [2,09m/min ; 2,45m/min], et [1,85m/min ; 2,23m/min]. La vitesse de plissage V_p a varié entre [1,03m/min ; 1,11m/min].

Dans le cas des câbles {1, 2, 3} de titre environ 15 ktex et les câbles 4 et 6 de titre 24 ktex, on observe une variation des vitesses V_{ev} et V_{ex} , seule la vitesse de plissage reste constante. Le tracé de ces trois vitesses est présenté à la Figure 32. Cette variation a été nécessaire afin de compenser la variation induite dans la laize du câble d'alimentation au moment de sa préparation. Ce défaut du câble d'alimentation se traduit par une fluctuation du débit d'alimentation des tambours de plissage. Pour un câble d'alimentation donné, on observe des zones de grande laize et des zones de faible laize dans la nappe. Au moment du plissage, lorsqu'on se trouve dans une zone de grande laize, on observe une suralimentation des tambours de plissage. La matière est alors entraînée hors de sa trajectoire et peut même aller jusqu'à s'enrouler sur les tambours. Pour remédier à ce problème, il va falloir freiner la matière en entrée de verticalisation et donc réduire l'alimentation des tambours de plissage. Pour cela, il faudra augmenter l'étirage en entrée de verticalisation et éventuellement augmenter simultanément l'étirage dans la zone d'extraction afin d'accélérer l'évacuation de

la matière de la zone de plissage. A l'inverse, lorsqu'on se trouve dans une zone de faible laize, on observe une sous-alimentation des tambours de plissage. Pour y remédier, il va falloir réduire l'étirage en entrée de verticalisation afin d'alimenter les tambours de plissage en quantité suffisante. Il faut trouver un étirage minimum, pour éviter l'enroulement de la matière sur les tambours de plissage, et un étirage maximum pour ne pas avoir un produit plat. Ceci revient donc à trouver le réglage optimum de l'étirage d'extraction.

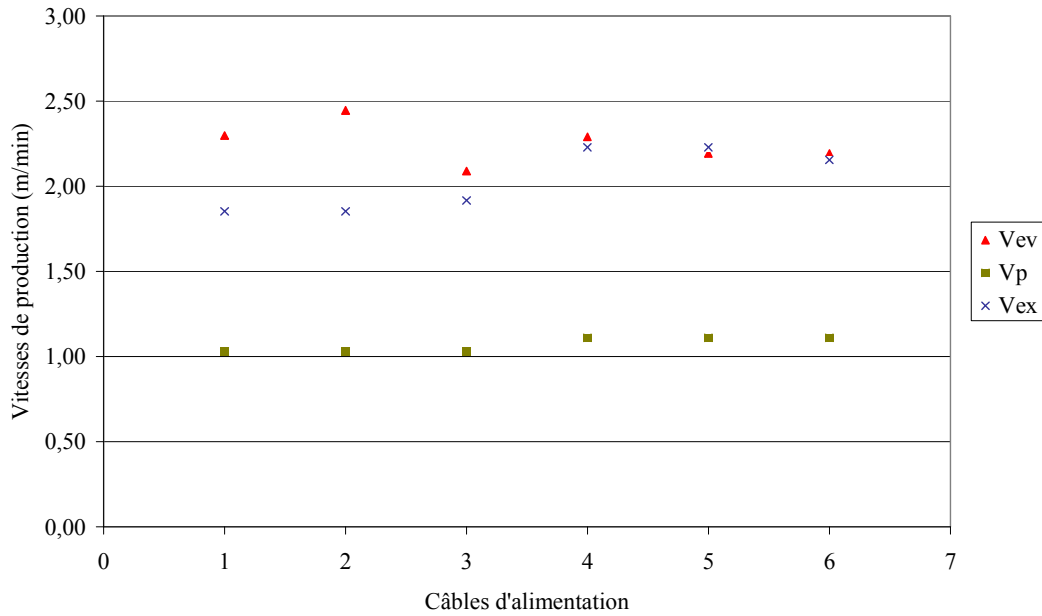


Figure 32. Variation des vitesses de production lors de la campagne d'essais N° 1

1.2.2. Paramètres de température

1.2.2.1. La zone de plissage

La zone de plissage est équipée d'un radiateur infra rouge qui permet de chauffer les lames des tambours de plissage. Une sonde de température est positionnée sur le côté des tambours. Une température de consigne est fixée au niveau du système de commande de la machine qui pilote le radiateur. Nous avons relevé les trois paramètres de température T_{consigne} , T_{tambours} et T_{sonde} . La Figure 33 illustre les points où ont été effectuées les mesures de température de la sonde et des tambours de plissage ainsi que la position de la sonde de température. Cette dernière était initialement située à une distance d des tambours d'environ 30mm. La température de consigne a varié de 40°C à 65°C. La température de la sonde a varié de 45°C à 73°C. La température des tambours a varié de 70°C à 90°C.

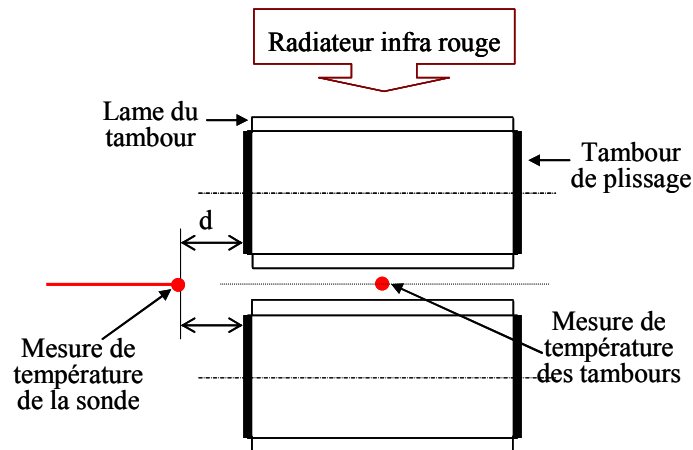


Figure 33. Mesures des températures dans la zone de plissage

Les premiers essais de plissage (câbles 1 à 4) ont mis en évidence des écarts importants entre les paramètres de températures $T_{consigne}$, $T_{tambours}$ et T_{sonde} . Suite à ce constat, la sonde de température a été positionnée au plus près des tambours de plissage comme le montre la Figure 34. Nous avons alors obtenu, lors du plissage des câbles 5 et 6, des valeurs de température identiques entre la consigne et la sonde.

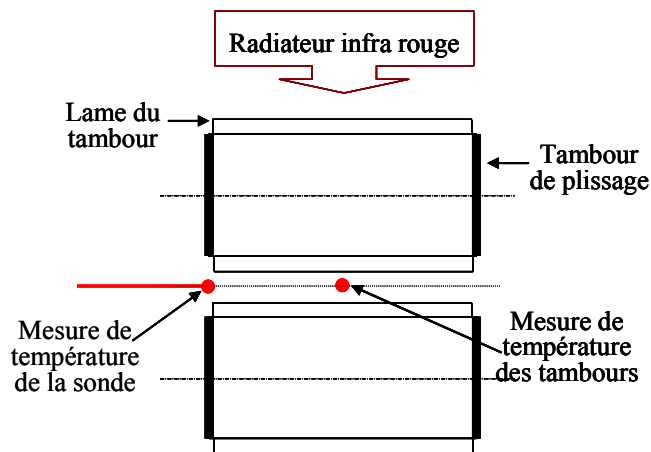


Figure 34. Positionnement de la sonde de température dans la zone de plissage

Sur l'ensemble des essais menés, nous avons observé un écart moyen de 10°C à 20°C entre la température de la sonde et la température des tambours de plissage. Ceci nous a conduits à poser l'approximation suivante :

$$T_{tambours} = T_{consigne} + 10^{\circ}\text{C} \quad \text{Equation (16)}$$

1.2.2.2. La zone de condensation

La zone de condensation est chauffée sur une faible surface à l'aide d'un générateur de chaleur. Ce dernier était initialement situé entre les deux parties de la zone de condensation.

La mesure de sa température T_F a été prise dans l'axe de sortie du flux d'air. Afin de faire varier le moins de réglages possibles, le générateur de chaleur n'a pas été utilisé lors de cette première campagne d'essais.

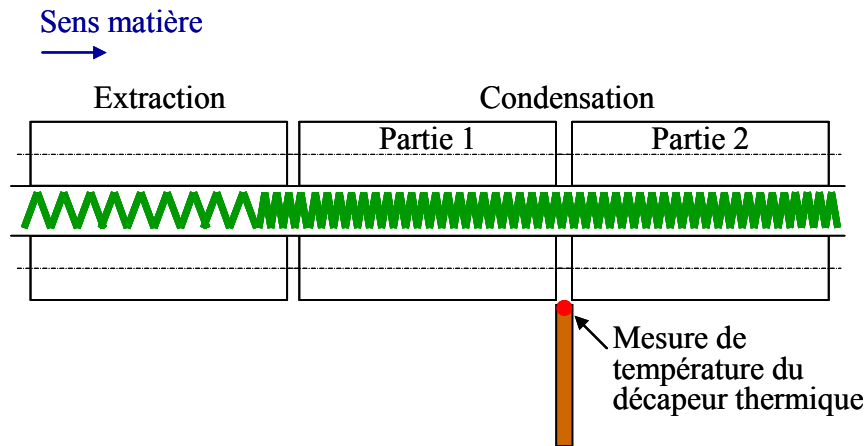


Figure 35. Position du décapeur thermique dans la zone de condensation

1.3. Conclusion

Au cours de cette première campagne de production, nous avons développé une technique de préparation du câble d'alimentation. Nous avons, au travers de la prise en main du prototype expérimental VERTILAP[®] 20cm/6mm, montré l'impact de variation de la laize de la matière d'alimentation sur le réglage des paramètres de vitesses en entrée et en sortie de la zone de plissage. A partir des améliorations apportées pendant la campagne d'essais, nous avons pu corriger le positionnement de la sonde de température dans la zone de plissage.

Les six nappes plissées à partir des six câbles présentés précédemment vont être utilisées pour l'élaboration des méthodes de caractérisation des non-tissés 3D produits.

2. Détermination des méthodes de caractérisation

Les défauts d'irrégularité de distribution des fibres dans le câble d'alimentation vont être retrouvés dans le produit final en sortie de procédé. Par conséquent, il a fallu tenir compte de ceci dans le protocole de prélèvement des échantillons à tester. Ce prélèvement a été effectué de manière à minimiser, au mieux, l'impact de cette irrégularité. Des méthodes de caractérisations physique et mécanique en compression ont été développées en tenant compte de la structure particulière des non-tissés 3D VERTILAP[®].

2.1. Caractérisation physique

Au niveau de la caractérisation physique, nous avons choisi de définir un modèle géométrique de la structure plissée. Les paramètres d'épaisseur et de masse surfacique ont également été pris en compte dans cette caractérisation.

2.1.1. Modélisation géométrique

La géométrie du pli peut être modélisée par un triangle isocèle (Figure 36) caractérisé par une hauteur e_0 , un angle θ , un pas, une hypoténuse a et l'épaisseur de la paroi fibreuse e_p qui est d'environ 1mm. Cette dernière sera considérée comme négligeable afin de simplifier le modèle. La hauteur du triangle correspond à l'épaisseur e_0 de la structure plissée. L'angle du triangle correspond à l'angle du pli θ formé par les deux côtés du pli. La base du triangle correspond au pas noté p , c'est-à-dire la longueur d'un pli. L'hypoténuse a correspond à la longueur du côté du pli. Cette modélisation tient également compte du nombre de plis n_p contenus dans la structure pour une longueur donnée.

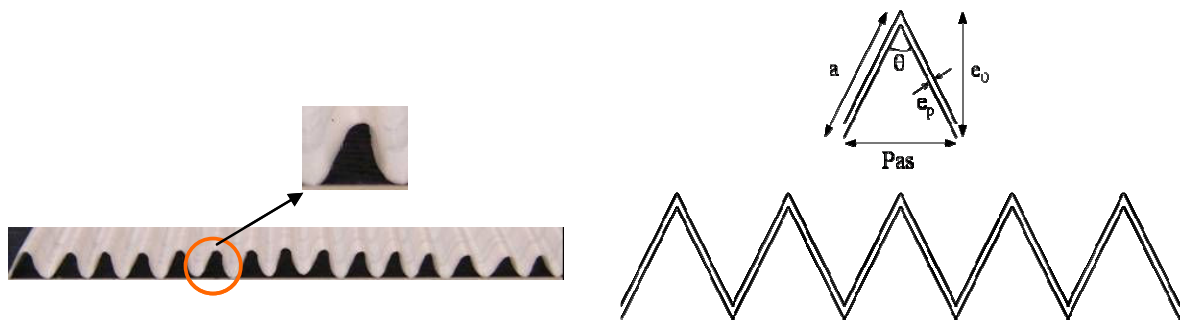


Figure 36. Modèle géométrique du pli

L'épaisseur e_0 du pli a été déterminée à l'aide du module de compression du KES-F (cf. 2.2.1 de ce chapitre) sous une pression de 50 Pa. Les masses surfacique et volumique ont été déterminées par pesée d'un échantillon de dimensions 10 cm x 10 cm. Au moins 10 mesures ont été réalisées pour chaque évaluation.

Nous avons défini les longueurs apparente l_a et réelle l_r de la structure plissée. La longueur apparente correspond à la longueur de l'échantillon lorsqu'il est aplati tandis que la longueur réelle correspond à la longueur lorsque l'échantillon est plissé. Les paramètres géométriques p , a , l_a , et θ sont définis par les relations suivantes :

$$p = \frac{l_r}{n_p} \quad \text{Equation (17)}$$

$$a = \sqrt{e_0^2 + \frac{p^2}{4}} \quad \text{Equation (18)}$$

$$l_a = 2.a.n_p \quad \text{Equation (19)}$$

$$\theta = 2.\arctan \frac{P}{2.e_0} \quad \text{Equation (20)}$$

A partir de ces paramètres, nous avons calculé le taux de condensation T_{xc} de la structure plissée. Il apporte une indication en pourcentage sur le tassement des plis les uns par rapport aux autres. Il est défini par la relation :

$$T_{xc} (\%) = 100. \frac{l_a - l_r}{l_a} \quad \text{Equation (21)}$$

2.1.2. Résultats et analyse

Des échantillons de dimensions 10 cm x 10 cm issus des six nappes plissées précédentes ont été testés. Les masses surfacique et volumique, l'épaisseur, le nombre de plis, l'angle de pli et le taux de condensation sont présentés dans le Tableau 6.

Tableau 6. Paramètres physiques des non-tissés 3D testés

Echantillons testés	M (g/m ²)	Nombre de pli/cm	e ₀ (mm)	Densité (kg/m ³)	T _{xc} (%)	Θ (degrés)
1	161	1,1	4,9	33	32	86
2	237	1,2	5,3	45	38	76
3	244	1,0	4,9	50	29	91
4	347	1,1	5,0	69	33	84
5	275	1,4	5,0	55	42	71
6	368	1,6	4,9	75	47	65
<i>Moyenne</i>	<i>272</i>	<i>1,2</i>	<i>5,0</i>	<i>54</i>	<i>37</i>	<i>79</i>
<i>CV (%)</i>	<i>28</i>	<i>18</i>	<i>3</i>	<i>28</i>	<i>18</i>	<i>13</i>
<i>Min</i>	<i>161</i>	<i>1,0</i>	<i>4,9</i>	<i>33</i>	<i>29</i>	<i>65</i>
<i>Max</i>	<i>368</i>	<i>1,6</i>	<i>5,3</i>	<i>75</i>	<i>47</i>	<i>91</i>

L'épaisseur des différents échantillons est égale à 5 mm. Ce résultat permet de conclure que, pour un réglage d'écartement donné, les tambours de plissage réalisent un plissage reproductible dans le temps en terme de hauteur du pli formé. Le nombre de plis par cm est de l'ordre de 1,2.

Les échantillons testés présentent une masse surfacique moyenne d'environ 270 g/m². Nous pouvons noter que les non-tissés 3D obtenus à partir du câble entrant et des réglages de la machine utilisés sont encore relativement lourds. L'objectif d'une faible masse surfacique, en

vue du remplacement de la mousse polyuréthane, n'est donc pas encore atteint. La valeur de masse surfacique de la mousse PU est donnée au paragraphe 1.2.1 du chapitre 1. Les résultats de masse surfacique sont présentés à la Figure 37.

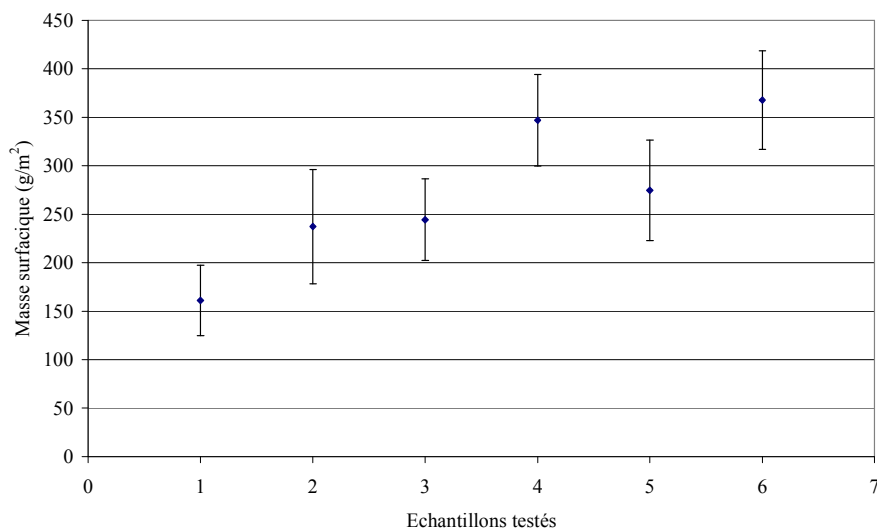


Figure 37. Masses surfaciques des échantillons testés

Le taux de condensation moyen est de 37%. Ceci traduit un faible tassement des plis. La structure plissée peut être appelée « ouverte ». Lors de la production, on observe que la condensation des plis est directement influencée par l'étirage et la vitesse d'extraction. De par le principe de la condensation, il faut freiner davantage la matière plissée dans la zone de condensation afin que la structure soit parfaitement condensée. Les faibles valeurs de taux de condensation des échantillons testés confirment bien la non maîtrise des paramètres de tension et de vitesse dans la zone d'extraction du prototype expérimental étudié.

L'angle de pli est en moyenne de 80°. Cette valeur assez élevée indique que l'orientation du pli est loin de la verticale. En effet, d'après le modèle géométrique, plus cet angle est faible, plus l'orientation du pli sera verticale.

2.2. Caractérisation mécanique en compression

Les tests de compression ont été effectués sur le module de compression du « Kawabata Evaluation System for Fabrics » (KES-F).

2.2.1. Kawabata Evaluation System for Fabrics – KES-FB3 compression tester

Le KES-F est un ensemble d'appareillages destiné à la caractérisation des textiles sous de faibles contraintes proches des contraintes d'usage. Nous avons choisi d'effectuer une première approche de l'étude du comportement en compression de ces non-tissés 3D avec le module de compression KES-FB3 du KES-F. Le principe de la méthode consiste à comprimer

un échantillon placé entre deux plateaux, l'un fixe et l'autre mobile. L'essai est réalisé sur une surface d'échantillon définie et à vitesse constante. [47] Dans un premier temps, nous avons utilisé la méthode d'essai standard que nous avons adaptée par la suite à la structure plissée des non-tissés 3D. De par leur fabrication, ces non-tissés 3D présentent une épaisseur minimale de l'ordre 5 mm, ce qui nécessite des réglages particuliers du module de compression.

2.2.1.1. Conditions standards d'essai

Dans les conditions standards d'essai, la configuration de l'appareil de mesure est telle que la surface du plateau mobile de compression est de 2 ou 10 cm². L'échantillon est comprimé jusqu'à une pression maximale P_m de 5 kPa à une vitesse de 0,2 mm/sec. Au cours de l'essai, on relève la courbe de compression (P) et de décompression (P') représentant le comportement en compression du matériau testé. Le diagramme relevé est illustré à la Figure 39.



Figure 38. Configuration standard du module de compression KES-FB3

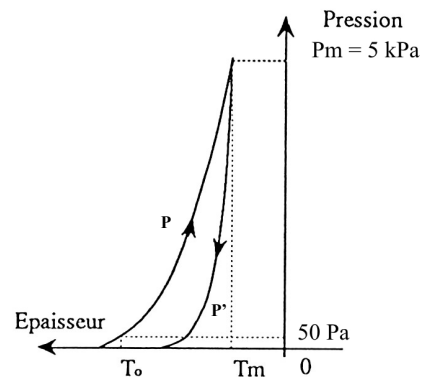


Figure 39. Courbe de compression et décompression du KES-FB3

Les épaisseurs initiale T_0 et finale T_M de l'échantillon sont respectivement mesurées sous une pression P_0 de 50 Pa et P_m de 5 kPa. Les paramètres de compression relevés sont les suivants :

- LC (SD) : linéarité de la courbe de compression
- WC, WC' (cN.cm/cm²) : énergies de compression et de décompression
- RC (%) : résilience de compression
- T_0 (mm) : épaisseur initiale
- T_M (mm) : épaisseur finale
- EMC (%) : compressibilité de l'échantillon

Les paramètres de compression WC, WC', RC et EMC sont calculés par les relations suivantes :

$$WC = \int_{x=T_0}^{x=T_M} P \cdot dx \quad \text{Equation (22)}$$

$$WC' = \int_{x=T_M}^{x=T_0} P' \cdot dx \quad \text{Equation (23)}$$

$$RC = \frac{WC'}{WC} \cdot 100 \quad \text{Equation (24)}$$

$$LC = \frac{WC}{(T_0 - T_M) \cdot \frac{P_m}{2}} \quad \text{Equation (25)}$$

$$EMC = \frac{T_0 - T_M}{T_0} \cdot 100 \quad \text{Equation (26)}$$

La résilience de compression renseignera sur la performance mécanique du matériau en terme de résistance à la compression. L'énergie dissipée lors de la compression renseignera sur la sensation de toucher « soft ». Plus le matériau dissipera d'énergie, plus il présentera un toucher « soft » et contribuera ainsi à la sensation de confort à l'assise. [48]

Des méthodes de test ont été mises au point afin de déterminer la méthode la mieux adaptée à la structure particulière des nouveaux non-tissés 3D étudiés. L'orientation verticale des fibres de ces textiles laisse supposer un fort comportement résilient, soit des valeurs de résilience au moins supérieures ou égales à 50%. Les résultats de compression issus de ces méthodes de test sont présentés en *annexe IV.2*.

Compte tenu de la faible quantité de matière plissée dont nous disposons, les méthodes de test ont été réalisés avec des échantillons de dimensions 10 cm x 10 cm. Il est également important de souligner qu'en plus de cette contrainte de quantité de matière disponible, l'homogénéité de la nappe plissée ne permettait pas de maintenir constant le nombre d'échantillons testés d'une nappe plissée à l'autre.

2.2.1.2. Méthode de test n° 1

Nous avons vu précédemment que l'irrégularité de séparation et donc l'ouverture du câble, induisait une irrégularité en terme de répartition de matière dans la nappe plissée. Il a donc fallu prélever les échantillons à tester dans les zones les moins hétérogènes possibles. On

remarque néanmoins des irrégularités dans les échantillons prélevés. Sur l'ensemble des six nappes plissées testées, nous avons pu prélever 10 à 30 échantillons par nappe.

Les échantillons ainsi prélevés ont été comprimés dans les conditions standards du KES-FB3 précédemment décrites. Au cours de ces essais, nous avons observé un phénomène d'indentation pendant la compression du non-tissé plissé se traduisant par une allure atypique de la courbe de compression obtenue. Ce phénomène est expliqué par le fait que le matériau est comprimé sur une surface trop faible (2 cm² ou 10 cm²) par rapport aux grandeurs caractéristiques de la structure. Seul(s) un ou deux plis sont sollicités dans cette configuration.

Les résultats obtenus sont présentés sur un diagramme radar à la Figure 40. Chaque mesure est la moyenne d'au moins 10 essais.

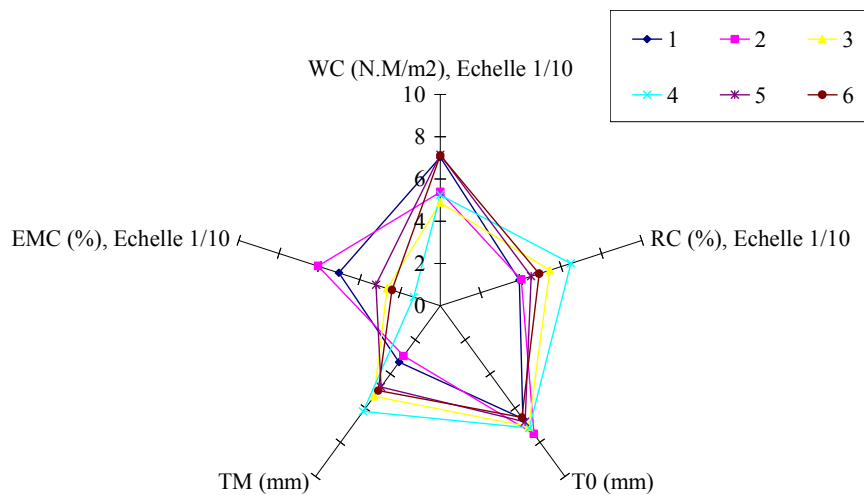


Figure 40. Résultats de compression obtenus à partir de la méthode de test n° 1

Sur l'ensemble des résultats obtenus, l'énergie dissipée lors de la compression est en moyenne de 62 N.m/m² tandis que la résilience est d'environ 49%. Les épaisseurs initiale T₀ et finale T_M sont respectivement de l'ordre de 7 mm et 5 mm pour un taux de compressibilité d'environ 34%. On peut noter que les résultats obtenus au niveau de la résilience en compression, principal paramètre à mettre en évidence, sont inférieurs à la valeur minimale de 50% attendue.

Pour chacun des paramètres relevés, le coefficient de variation CV est très élevé, de l'ordre de 20% et pouvant atteindre 60%. Cette forte variation s'explique principalement par les défauts d'irrégularité de distribution des filaments induits par l'irrégularité de la matière entrante. Ceci met en évidence l'importance de la régularité de distributions des filaments et d'ouverture du câble sur la régularité du produit sortant. En effet, dans ce procédé, la matière

entrante ne subit pas de doublage et toute irrégularité entrante se retrouvera sur le produit final.

Au vu des résultats obtenus, la méthode de test n° 1 n'a pas été retenue pour la caractérisation des non-tissés plissés car elle présente des défauts d'indentation lors du test. Nous avons donc décidé de définir une deuxième méthode de test.

2.2.1.3. Méthode de test n° 2

Le prélèvement des échantillons à tester dans la nappe plissée a été effectué de façon plus sélective en évitant au maximum les surfaces présentant des défauts. Toutefois, le défaut d'irrégularité bien que moins prononcé, a toujours été observé dans les échantillons prélevés (Figure 41). Sur l'ensemble des six nappes plissées testées, nous avons prélevé 10 à 15 échantillons par nappe.

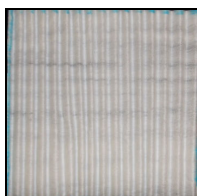


Figure 41. Irrégularité d'aspect observée dans les échantillons issus de la méthode de test n° 2

Le test de compression a été réalisé de manière à s'affranchir du phénomène d'indentation précédemment observé. Pour ce faire, des plateaux de compression circulaires de surfaces plus importantes ont été fabriqués de manière à solliciter un nombre plus important de plis. Le plateau mobile a été monté par simple emboîtement sur le capteur de force de l'appareil de mesure. Un plateau fixe de diamètre 150 mm et un plateau mobile de diamètre 100 mm ont été utilisés. La pression relevée sur le module de compression a été corrigée en fonction des surfaces réelles des plateaux utilisés. La vitesse de compression a été fixée à 0,2 mm/sec. L'épaisseur initiale T_0 a été mesurée sous une pression P_0 de 50 Pa tandis que l'épaisseur finale T_M a été mesurée sous une pression de 5 kPa. La configuration non standard mise en place et la courbe de compression obtenue par cette configuration sont présentées à la Figure 42. L'allure de cette courbe nous permet de conclure à l'absence de phénomène d'indentation. Nous pouvons alors valider la configuration matérielle de l'essai qui a été mise en place.

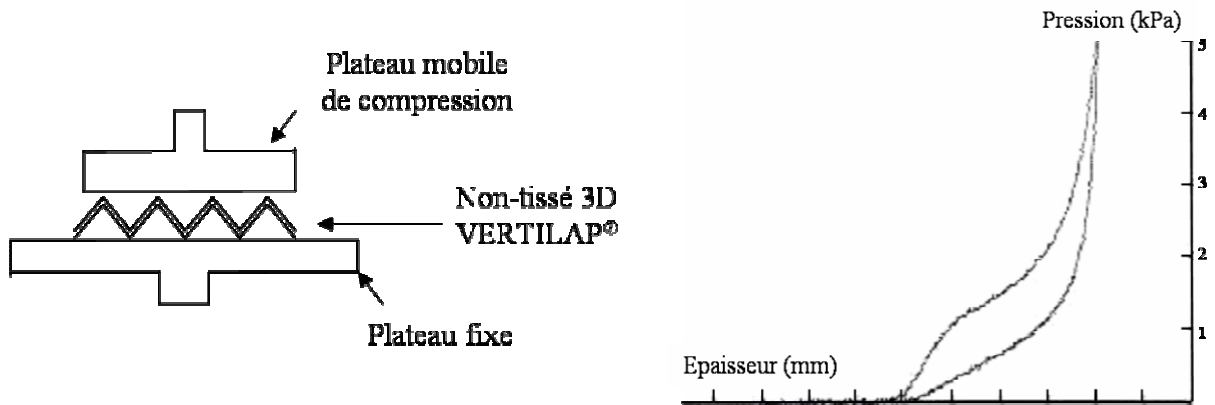


Figure 42. Configuration non standard du KES-FB3 (à gauche), courbe de compression (à droite)

Les résultats obtenus sont présentés sur un diagramme radar à la Figure 43. Chaque mesure est la moyenne d'au moins 10 essais.

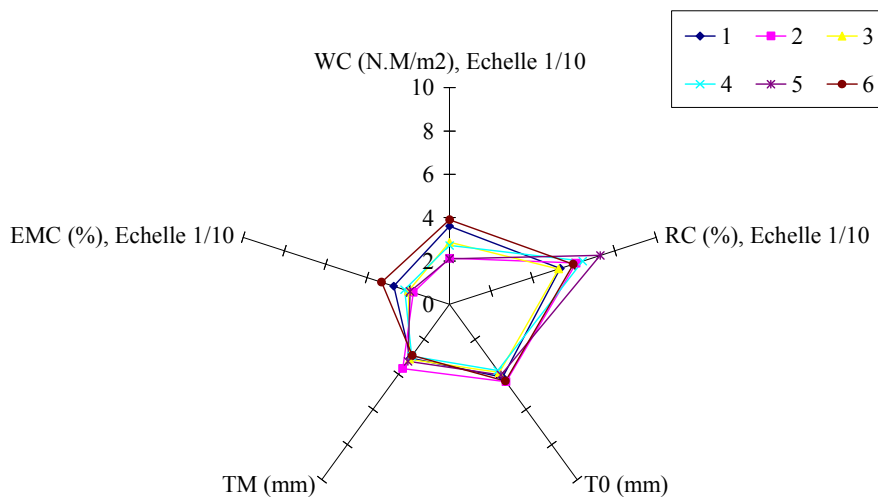


Figure 43. Résultats de compression obtenus à partir de la méthode de test n° 2

Sur l'ensemble des résultats obtenus, l'énergie dissipée lors de la compression est en moyenne de 29 N.m/m² tandis que la résilience est d'environ 61%. Les épaisseurs initiale T_0 et finale T_M sont respectivement de l'ordre de 4 mm et 3 mm pour un taux de compressibilité d'environ 23%. On peut noter que les résultats obtenus au niveau de la résilience en compression correspondent plus à ceux attendus, soit une résilience supérieure à 50%. Ce résultat met clairement en évidence le fort caractère résilient du non-tissé plissé.

Comme dans la méthode n° 1, on observe des valeurs très élevées du coefficient de variation allant de 20% à 40%. Ceci nous montre une fois de plus l'influence de l'irrégularité de distribution de la matière entrante.

Au vu des résultats obtenus, la méthode de test n° 2 a permis de mettre en évidence le caractère résilient du non-tissé 3D plissé et nous a permis de nous affranchir du phénomène d'indentation observé dans la méthode de test n° 1. Ces résultats nous permettent de valider les conditions d'essai de compression définies dans cette méthode. La méthode de test n° 2 sera utilisée par la suite pour la caractérisation en compression des non-tissés 3D plissés.

2.2.1.4. Conclusion

Deux méthodes de test en compression ont été définies de façon progressive de manière à déterminer la plus adaptée à la caractérisation en compression des non-tissés VERTILAP®. Les différents résultats obtenus nous ont permis de valider la méthode de test n° 2 qui donne des valeurs de résilience les plus proches de nos attentes avec le moins de variation dans les résultats. Le tracé de ces résultats est illustré à la Figure 44. Ce tracé montre que les non-tissés 3D VERTILAP® testés présentent une résilience en compression de l'ordre de 60% et sont peu compressibles, soit une compressibilité de l'ordre de 10%. On peut donc en conclure qu'ils ne présentent pas un toucher « soft » et ne peuvent pas être utilisés en vue du remplacement de la mousse PU.

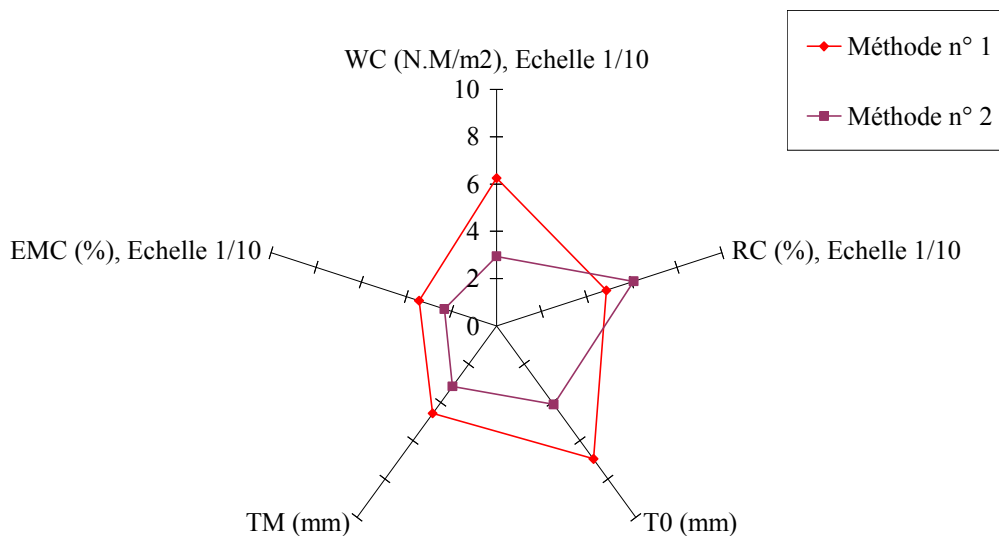


Figure 44. Moyenne des résultats de compression obtenus à partir des méthodes de test n° 1 et 2

Il est également important de noter que le défaut d'irrégularité de distribution massique du câble d'alimentation a un impact considérable sur le produit final. Cet impact se traduit par des valeurs élevées des coefficients de variation dans les résultats obtenus. Ceci implique qu'il faudra tester un plus grand nombre d'échantillons lors des essais de caractérisation afin d'avoir des résultats statistiquement fiables et représentatifs.

3. Recommandations pour l'amélioration du prototype expérimental

A partir des observations menées lors de cette première campagne d'essais, nous pouvons apporter un certain nombre de recommandations tant au niveau de la production des non-tissés 3D plissés qu'au niveau de leur caractérisation.

3.1. Recommandations en production

La technique de préparation de la matière par une séparation manuelle du câble induit un défaut de variation de masse tout au long de la longueur. Une solution pour y remédier serait de réaliser un dispositif permettant de mettre le câble sous tension avant d'effectuer la séparation afin de faciliter la séparation des monofilaments entre eux et éviter des variations trop importantes de la masse linéique des produits entrants.

La configuration de la zone de plissage, dans le prototype expérimental, ne permettait pas de contenir le flux thermique émis par l'élément de chauffe. Ceci génèrait une inhomogénéité dans le chauffage de l'élément de plissage et des pertes énergétiques importantes. La maîtrise de la température de plissage est un facteur important dans la formation du pli. Une solution a donc été de placer un capot dans cette zone afin de minimiser les pertes de chaleur et permettre ainsi d'homogénéiser la température tout au long des éléments plisseurs. Les configurations avant et après modification sont présentées à la Figure 45.

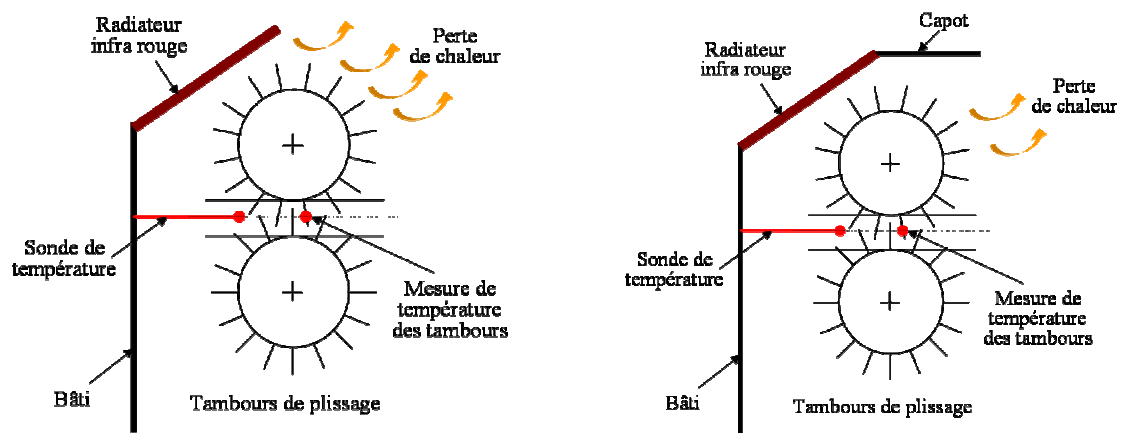


Figure 45. Configuration de la zone de plissage avant (à gauche) et après modification (à droite)

Il a été aussi observé un défaut de suralimentation (Figure 46) des tambours de plissage principalement dû à la non maîtrise des réglages de vitesses entre l'entrée et la sortie du plissage. En effet, la chaîne cinématique du prototype expérimental est telle que les vitesses d'entrée de verticalisation et d'extraction sont toutes les deux dépendantes de la vitesse du tambour. Ce problème peut être résolu en réduisant l'écartement entre les manchons d'extraction de manière afin que la nappe plissée puisse être correctement saisie par ces

derniers. La vitesse d'extraction doit également être adaptée par action sur l'indicateur d'étirage d'extraction I_{Ex} .

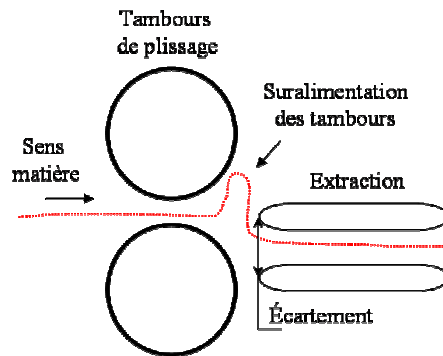


Figure 46. Schématisation du phénomène de suralimentation des tambours de plissage

3.2. Recommandations pour la caractérisation

Les premiers résultats de caractérisation obtenus ont mis en évidence l'influence du défaut d'irrégularité de structure dans le comportement final de la nappe plissée. Une méthode d'évaluation de ce défaut devra être développée et utilisée.

4. Conclusions

Cette première campagne de production a permis de montrer que les vitesses de production notamment les vitesses d'entrée de verticalisation, de plissage et d'extraction n'évoluent pas toutes proportionnellement les unes des autres. Ceci rend plus difficile les réglages de la machine.

Les premiers essais ont permis de déterminer les méthodes de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques en compression des nouveaux non-tissés 3D plissés. Les résultats obtenus ont confirmé le fort caractère résilient de ces produits.

Il est nécessaire de diminuer la masse surfacique du produit sortant. Pour réaliser cet objectif, une meilleure maîtrise dans la préparation de la nappe entrante doit être menée. Le retour d'expérience de cette première campagne va permettre d'améliorer le procédé de fabrication et par conséquent les performances du produit fini. Les modifications et recommandations suggérées ont été appliquées avant et pendant la campagne d'essais N° 2.

CHAPITRE 4.3
CAMPAGNE D'ESSAIS N° 2

Ce chapitre décrit le déroulement de la production de non-tissés 3D VERTILAP[®] au cours de la seconde campagne de production. Il présente les résultats des caractérisations physiques et mécaniques en compression ainsi que l'analyse statistique de ces résultats. Comme dans le chapitre précédent, les recommandations à apporter au procédé de fabrication en vue de son amélioration sont également énumérées.

1. Production de non-tissés 3D VERTILAP[®]

Les recommandations apportées, suite à la première campagne d'essais, ont été en partie appliquées au prototype 20cm/6mm initial. La position de la sonde de température a été modifiée de manière à fournir une information la plus proche de la température de plissage. La zone de plissage a été partiellement fermée par un capot afin de réduire les pertes de chaleur et permettre une meilleure homogénéité de la température sur les tambours de plissage. La technique de préparation de la matière a été améliorée.

1.1. Préparation de la matière d'alimentation

Lors de cette deuxième campagne d'essais, nous avons appliqué la technique manuelle décrite au chapitre 4.1 pour préparer les câbles d'alimentation en donnant cette fois de la tension au câble. Cette tension a pour effet de défibrer, c'est-à-dire d'individualiser les filaments accolés les uns aux autres. Il est important de noter que cette solution reste tout de même une solution intermédiaire qui permet d'améliorer légèrement la qualité de défibrage du câble sans toute fois obtenir un résultat acceptable en termes industriels. En effet, on observe toujours un défaut d'irrégularité massique dans la nappe filamentaire qui se traduit par une irrégularité en densité de matière. Cette irrégularité sera évaluée au niveau de la caractérisation physique du matériau.

1.2. Paramètres de production

Dans cette étude, nous avons utilisé huit câbles de titres compris entre 19 ktex et 25 ktex. Les essais de production ont été menés en maintenant constants les étirages d'alimentation E_a et de défibrage E_{def} ainsi que la température T_F du générateur de chaleur situé dans la zone de condensation. Les étirages E_a et E_{def} ont été fixés respectivement à 1,06 et 1,35. Le générateur de chaleur a été utilisé et réglé à la position P1 qui correspond à une température T_F de 233°C avec un flux d'air chaud de 1,6m/s. Compte tenu de la difficulté à maîtriser le flux thermique dans la zone de plissage, seule la température de consigne sera considérée comme paramètre de réglage dans l'analyse des résultats obtenus. Cette température a varié entre 67°C et 72°C. Nous avons fait varier les indicateurs des étirages de suralimentation I_{sa} et d'extraction I_{Ex}

ainsi que le rapport de condensation C. Ces paramètres ont varié respectivement dans les intervalles [-20% ; 15%], [-5% ; 50%] et [2,1 ; 2,7].

D'après le modèle cinétique du système, les vitesses d'entrée V_2 , de défibrage V_3 et de condensation V_c sont respectivement proportionnelles aux vitesses d'entrée de verticalisation V_{ev} et d'extraction V_{ex} et évoluent donc de la même façon que ces deux dernières. Les vitesses V_{ev} , V_{ex} et la vitesse de plissage V_p ont varié dans les intervalles respectifs suivants : [2,1m/min ; 3,6m/min], [2,1m/min ; 2,4m/min] et [1,1m/min ; 1,5m/min]. Les différents réglages de production sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7. Paramètres de production lors de la deuxième campagne d'essais

Câbles	Titre (ktex)	Températures (°C)				Réglages machine				Vitesses de production (m/min)					
		T _{consigne}	T _{sonde}	T _{tambours}	T _F	C	I _{sa} (%)	V _T	I _{Ex} (%)	V ₂	V ₃	V _{ev}	V _p	V _{ex}	V _c
1	21	72	69	68	233	2,7	15	15	50	1,96	2,64	2,80	1,11	2,23	0,83
2	21	72	69	68	233	2,7	-8	15	50	1,57	2,11	2,24	1,11	2,23	0,83
3	21	72	69	68	233	2,7	-12	15	50	1,50	2,02	2,14	1,11	2,23	0,83
4	25	72	72	68	233	2,7	-8	15	50	1,57	2,11	2,24	1,11	2,23	0,83
5	19	70	70	70	233	2,7	-20	20	5	1,85	2,49	2,64	1,31	2,11	0,78
6	22	67	60	70	233	2,1	-10	24	0	2,51	3,39	3,60	1,47	2,42	1,15
7	22	67	60	70	233	2,1	-10	24	-3	2,51	3,39	3,60	1,47	2,35	1,12
8	22	67	60	70	233	2,1	-10	24	-5	2,51	3,39	3,60	1,47	2,30	1,10
Moy	22	70	66	69	233	2,5	-8	19	25	2,00	2,70	2,86	1,27	2,26	0,93
CV (%)	8	4	8	2	-	12,5	-	24	-	22,73	22,73	22,73	14,09	4,21	17,17
Min	19	67	60	68	233	2,1	-20	15	-5	1,50	2,02	2,14	1,11	2,11	0,78
Max	25	72	72	70	233	2,7	15	24	50	2,51	3,39	3,60	1,47	2,42	1,15

Lors des essais de production, nous avons observé un phénomène de glissement (Figure 47) de la matière, de la droite vers la gauche, dans la zone de défibrage. Ce glissement pourrait s'expliquer par le pas élevé des hélices des cylindres défibrants (2) et (3). Nous avons pensé que le centrage de la matière dans la largeur de la machine pourrait être obtenu en enlevant la pression dans la zone de défibrage. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons travaillé avec et sans pression d'air au niveau des cylindres dans la zone de défibrage. Les câbles 1 – 5 ont été plissés en appliquant de la pression dans la zone de défibrage tandis que les câbles 6 – 8 ont été plissés sans application de pression dans cette zone.

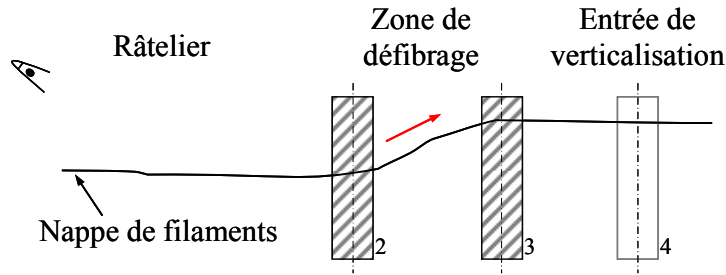


Figure 47. Glissement de la nappe filamentaire dans la zone de défibrage

1.2.1. Variation des vitesses de production

La Figure 48 représente le tracé des vitesses de production V_{ev} , V_p et V_{ex} des différents câbles plissés. Comme déjà observé lors de la première campagne d'essais, ce tracé montre une variation des vitesses notamment au niveau de l'entrée de verticalisation. Cette dernière semble très sensible à la variation de densité de matière dans la nappe filamentaire. Il est important de rappeler que cette variation de densité de matière est induite par le fait que la séparation du câble ne se fait pas à « droit filament ».

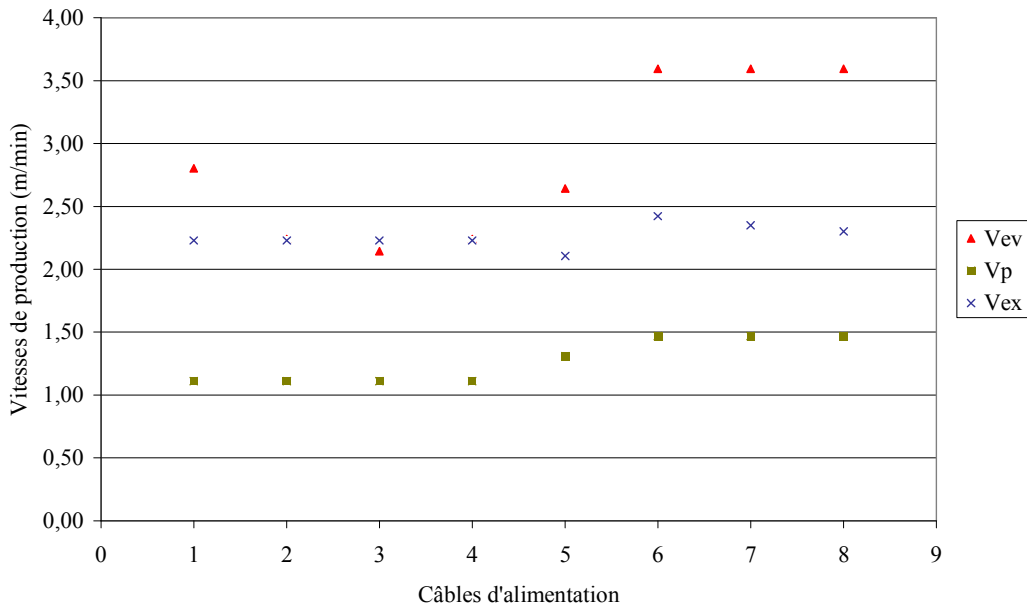


Figure 48. Vitesses de production lors de la campagne d'essais N°2

Les regroupements des câbles {1, 2, 3} et {6, 7, 8} nous permettent de mettre en évidence un seul paramètre variable qui est la vitesse d'entrée V_{ev} dans le premier cas et la vitesse d'extraction V_{ex} dans le second cas. On peut également regrouper les câbles {1, 2, 3, 4} avec comme paramètres variables le titre et la vitesse V_{ev} . Ces regroupements sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Regroupements des câbles par paramètres variables de fabrication

Groupe	Câbles d'alimentation	Paramètres variables
1	{1, 2, 3}	$V_{ev} = [2,14 \text{ m/min} ; 2,80 \text{ m/min}]$
2	{6, 7, 8}	$V_{ex} = [2,30 \text{ m/min} ; 2,42 \text{ m/min}]$
3	{1, 2, 3, 4}	$V_{ev} = [2,14 \text{ m/min} ; 2,80 \text{ m/min}]$ $\text{Titre} = [21 \text{ ktex} ; 25 \text{ ktex}]$

1.2.2. Conclusions

Nous avons mis au point une technique de préparation de la matière d'alimentation qui nous a permis d'obtenir des câbles de masses linéiques différentes. Ces derniers ont été plissés en faisant varier le moins de paramètres possibles sur la machine. Lors de cette campagne de production, la température de plissage ainsi que les vitesses en entrée, V_{ev} , et en sortie, V_{ex} , de la zone de plissage ont varié. Les huit nappes plissées à partir des huit câbles d'alimentation présentés précédemment ont été caractérisées en utilisant les méthodes développées lors de la première campagne d'essais.

2. Méthode de caractérisation de l'irrégularité d'aspect

La caractérisation du défaut d'irrégularité, dû à l'ouvrison de la nappe filamentaire, a été déterminée par une analyse d'images en 2D. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Matlab[®] et la fonctionnalité de traitement d'images. Dans la nappe plissée, les zones d'irrégularité sont caractérisées par une faible densité de matière. Le principe de la méthode d'évaluation mise en place consiste à considérer les zones de faible densité par des zones noires et les zones de forte densité par des zones blanches. Ainsi, l'image acquise de l'échantillon non-tissé 3D est transformée en une image uniquement constituée de pixels noirs et blancs. Un programme de calcul permet de calculer le nombre de pixels noirs contenus dans l'image. Ce résultat est rapporté au nombre de pixels total afin de déterminer le pourcentage de tâches noires qui renseigne sur l'irrégularité générale de l'échantillon. Ces calculs tiennent compte de la dimension de l'échantillon testé. Le programme de calcul prend également en compte le seuil de ressemblance entre l'image originelle et celle à traiter. La valeur du seuil est déterminée par l'opérateur de manière à obtenir une image la plus fidèle possible de l'image originale. La Figure 49 montre un exemple d'image traitée avec le programme de calcul (*annexe V.1*) à partir d'une image initiale. Le paramètre d'irrégularité obtenu est noté I_{reg} et s'exprime en pourcentage.

L'acquisition des images a été effectuée dans une chambre noire sur fond noir dans les mêmes conditions d'éclairage. L'appareil photo était toujours situé à la même position en hauteur au-dessus de l'échantillon et réglé en mode automatique.

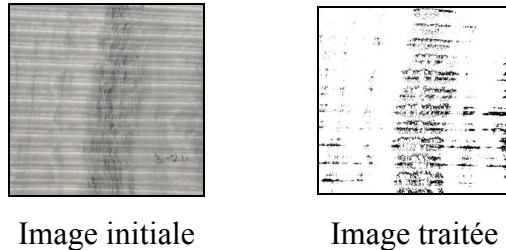


Figure 49. Résultats du traitement d'images

3. Résultats de caractérisation

L'objectif de cette caractérisation est de dégager les tendances de comportement du non-tissé 3D en fonction des paramètres de production. Les propriétés physiques telles que les caractéristiques géométriques, la masse surfacique et l'épaisseur seront présentées ainsi que l'évaluation du défaut d'irrégularité d'aspect. Les propriétés en compression telles que la résilience, l'énergie dissipée, etc. seront présentées et analysées. Les essais de caractérisation ont été réalisés sur des échantillons de dimensions 10 cm x 10 cm. Les échantillons ont été caractérisés à partir des méthodes développées lors de la première campagne d'essais (cf. paragraphe 2 du chapitre 4.2). L'annexe V.2 présente les tableaux de résultats des paramètres mesurés lors de la caractérisation. Ce paragraphe présente les observations des résultats obtenus. L'analyse de ces résultats au travers d'outils statistiques sera présentée par la suite au paragraphe 4. Cette analyse permettra de valider et de compléter les observations obtenues.

3.1. Propriétés physiques

Comme dans le cas de la première campagne d'essais, les caractéristiques géométriques ont été évaluées à partir du modèle sous forme de triangle isocèle du pli. La masse surfacique est déterminée par pesée et l'épaisseur est celle calculée avec le module de compression du KES-F sous une pression de 50 Pa.

Le Tableau 9 présente l'ensemble des résultats des caractéristiques physiques des échantillons testés issus des huit câbles d'alimentation précédents. Les échantillons testés présentent une masse surfacique moyenne, M , de 260 g/m² pour une épaisseur, T_0 , de 6 mm et une densité moyenne, d , de 43 kg/m³. Le nombre de pli moyen par cm est de 1,3 pour des valeurs moyennes du taux de compactage, Tx_c , et d'angle de pli, θ , respectives de 43% et 70°. L'irrégularité, I_{reg} , est en moyenne de 15%.

Tableau 9. Résultats de la caractérisation physique

Echantillons testés	M (g/m ²)	Nombre de plis/cm	Pas (cm)	T ₀ (mm)	d (kg/m ³)	T _{Xc} (%)	θ (degrés)	I _{reg} (%)
1	302	1,2	0,83	4,8	63	34	82	12
2	301	1,3	0,77	5,4	55	42	71	13
3	286	1,2	0,83	5,2	55	38	77	12
4	220	1,2	0,81	5,6	39	41	72	13
5	197	1,6	0,64	5,9	33	52	57	40
6	257	1,2	0,81	5,9	43	43	69	8
7	245	1,3	0,78	5,9	42	45	67	13
8	272	1,3	0,77	6,3	43	47	63	10
<i>Moy</i>	<i>260</i>	<i>1,3</i>	<i>0,78</i>	<i>5,6</i>	<i>47</i>	<i>43</i>	<i>70</i>	<i>15</i>
<i>CV (%)</i>	<i>15</i>	<i>8,9</i>	<i>7,85</i>	<i>8,4</i>	<i>21</i>	<i>13</i>	<i>11</i>	<i>66</i>
<i>Min</i>	<i>197</i>	<i>1,2</i>	<i>0,64</i>	<i>4,8</i>	<i>33</i>	<i>34</i>	<i>57</i>	<i>8</i>
<i>Max</i>	<i>302</i>	<i>1,6</i>	<i>0,83</i>	<i>6,3</i>	<i>63</i>	<i>52</i>	<i>82</i>	<i>40</i>

La Figure 50 et l'annexe V.3 présentent le tracé des caractéristiques d'irrégularité d'aspect, d'épaisseur et de masse surfacique des échantillons testés. Pour chaque échantillon testé, on observe une forte dispersion des résultats avec des coefficients de variation de 10% à 40%, voire plus élevés notamment dans le cas de l'irrégularité. Ces fortes valeurs de dispersion peuvent s'expliquer par la qualité du câble d'alimentation qui n'est pas homogène en terme de répartition en densité de filaments contenus dans la nappe.

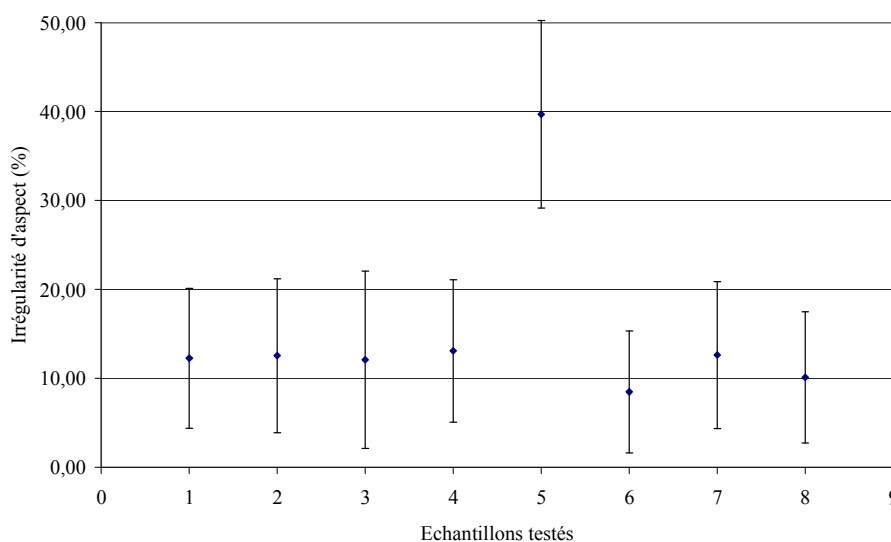


Figure 50. Irrégularité d'aspect des échantillons testés

Les résultats de masse surfacique, de l'irrégularité, de l'angle de pli et du taux de compactage sont présentés sur un diagramme radar à la Figure 51. Chaque mesure est la moyenne d'au

moins 40 essais. Au vu de ces résultats, nous pouvons dire que l'échantillon 1 est le plus lourd, le moins compacté et présente l'orientation la moins verticale des plis. A l'inverse, l'échantillon 5 est le plus léger et présente l'orientation la plus verticale des plis. Il est également le plus irrégulier, l'échantillon le moins irrégulier étant l'échantillon 6. A priori, tous les échantillons, à l'exception de l'échantillon 5 sembleraient identiques pour ce qui est de l'irrégularité et différents pour les autres paramètres. L'analyse statistique de comparaison des moyennes permettra de vérifier cette observation et de conclure quant à la similitude des propriétés physiques des différents échantillons.

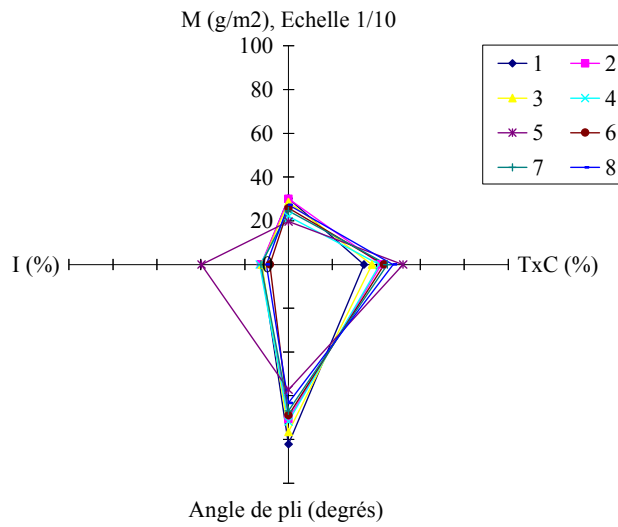


Figure 51. Tracé des paramètres de masse surfacique, d'irrégularité, d'angle de pli et taux de compactage

La Figure 52 représente le tracé des résultats de densité des échantillons testés. Ils montrent que les échantillons {1, 2, 3} sont plus denses que les échantillons {4, 5, 6, 7, 8}. La densité d , est déterminée par le rapport entre la masse surfacique M et l'épaisseur T_0 . La relation est donnée par :

$$d(kg / m^3) = \frac{M(g / m^2)}{T_0(mm)} \quad \text{Equation (27)}$$

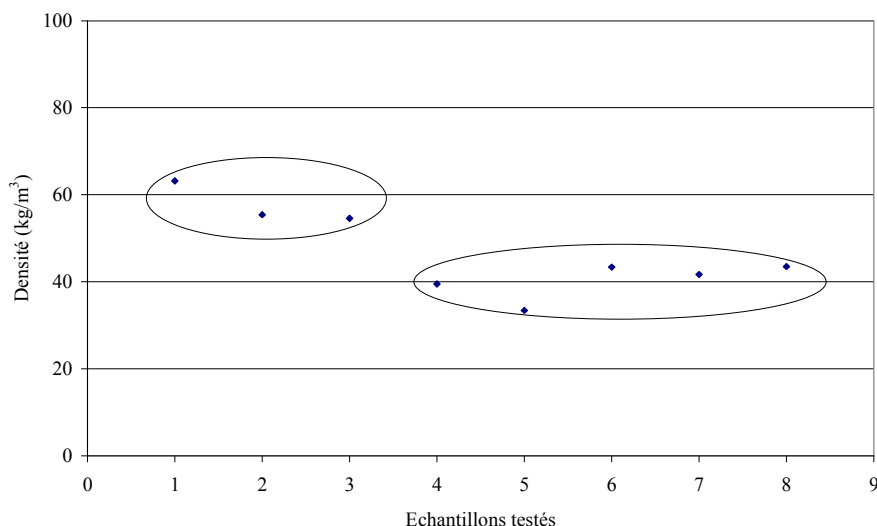


Figure 52. Densité des échantillons testés

3.2. Propriétés en compression

Le Tableau 10 présente les paramètres de compression de l'ensemble des échantillons testés. Compte tenu des défauts d'irrégularité observés dans la nappe filamentaire, la nappe plissée obtenue présente une forte irrégularité de structure et nous avons testé un grand nombre d'échantillons afin d'avoir des résultats statistiquement interprétables. Sur l'ensemble des échantillons testés, on obtient des valeurs moyennes de résilience de 72%, d'énergie dissipée de 34 N.m/m² et de compressibilité de 21%.

Tableau 10. Résultats de compression des échantillons testés

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	WC (N.m/m ²)		RC (%)		Epaisseur initiale T ₀ (mm)		Epaisseur finale T _M (mm)		EMC (%)	
		Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type
1	77	25	8,87	82	13,93	4,8	0,80	3,8	0,52	20	8,49
2	100	30	15,74	69	12,97	5,4	1,03	4,4	0,83	19	7,34
3	63	29	12,68	74	13,30	5,2	0,91	4,2	0,67	20	6,77
4	48	35	18,10	64	16,56	5,6	1,21	4,4	0,98	21	7,30
5	80	28	11,71	77	16,80	5,9	1,01	4,8	0,88	19	7,31
6	51	38	9,20	72	6,42	5,9	0,59	4,6	0,39	23	4,13
7	40	41	10,40	69	8,11	5,9	0,47	4,5	0,36	24	5,86
8	71	43	8,33	72	5,20	6,3	0,52	4,7	0,35	25	4,48
<i>Moy</i>	<i>66</i>	<i>34</i>	<i>11,88</i>	<i>72</i>	<i>11,66</i>	<i>5,6</i>	<i>0,82</i>	<i>4,4</i>	<i>0,62</i>	<i>21</i>	<i>6,46</i>
<i>Min</i>	<i>40</i>	<i>25</i>	<i>8,87</i>	<i>64</i>	<i>5,20</i>	<i>4,8</i>	<i>0,52</i>	<i>3,8</i>	<i>0,39</i>	<i>19</i>	<i>4,13</i>
<i>Max</i>	<i>100</i>	<i>43</i>	<i>18,10</i>	<i>82</i>	<i>16,80</i>	<i>6,3</i>	<i>1,21</i>	<i>4,8</i>	<i>0,98</i>	<i>25</i>	<i>8,49</i>
<i>CV moyen (%)</i>		<i>35</i>		<i>17</i>		<i>17</i>		<i>25</i>		<i>29</i>	

La Figure 53 et l'annexe V.4 présentent le tracé des caractéristiques de résilience, d'épaisseur après compression, de compressibilité et d'énergie dissipée. On observe de fortes dispersions des résultats obtenus, comme dans le cas des caractéristiques physiques. Les coefficients de variation sont de l'ordre de 10% à 40%. Ces valeurs élevées de dispersion peuvent toujours s'expliquer par la qualité du câble d'alimentation.

Au vu de ces résultats, les échantillons {1, 2, 3, 4, 5} semblent moins compressibles que les échantillons {6, 7, 8}. L'échantillon 4 semble être le moins résilient tandis que l'échantillon 1 semble être le plus résilient et dissipe le moins d'énergie. Il présentera un toucher moins « soft ». L'échantillon 9 semble être le plus dissipatif en terme d'énergie et présentera donc un meilleur toucher « soft ». Une analyse statistique de ces résultats par la méthode des comparaisons de moyennes permettra de dire si les différences observées entre les différents non-tissés 3D testés sont significatives ou non.

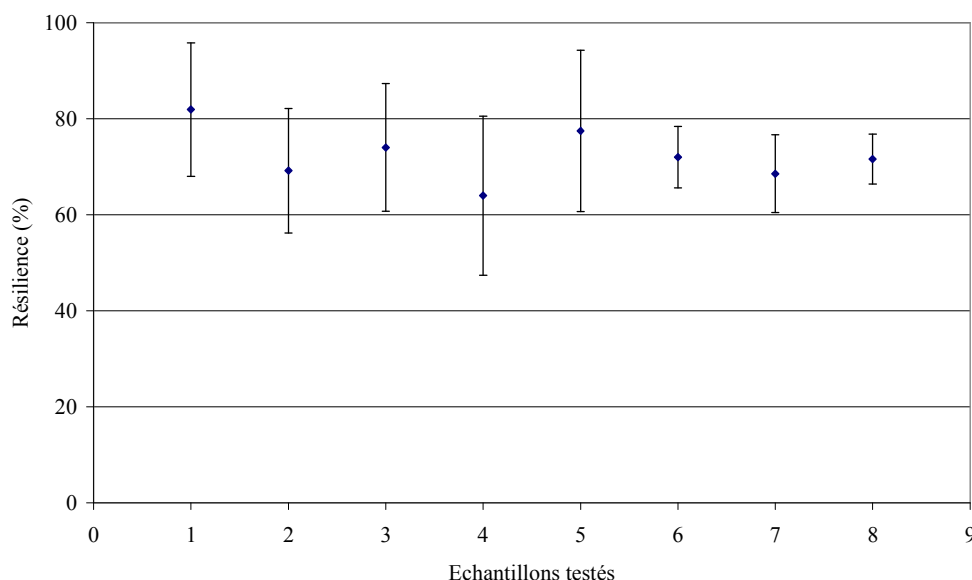


Figure 53. Résilience de compression des échantillons testés

La Figure 54 présente le diagramme radar des caractéristiques de compression. Ce diagramme montre bien le caractère fortement résilient des non-tissés 3D.

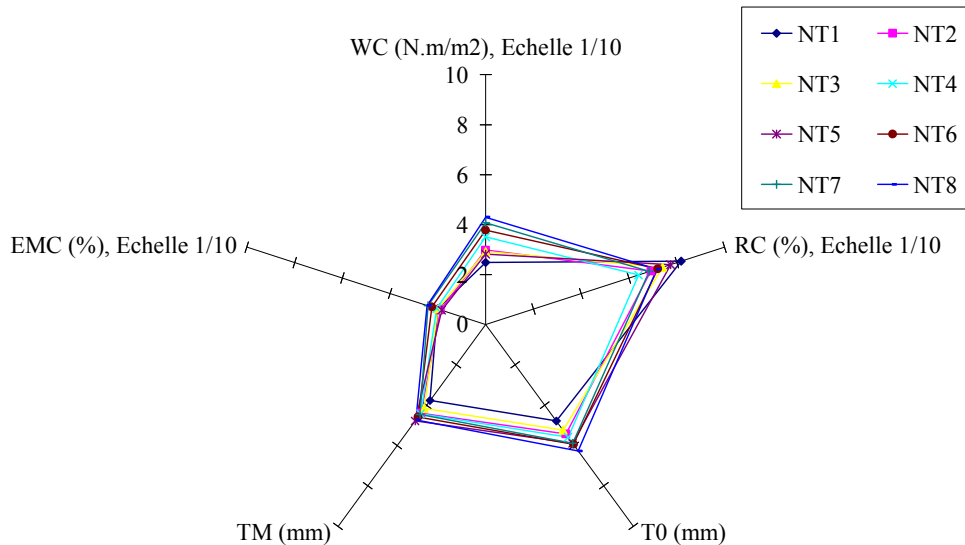


Figure 54. Caractéristiques de compression des échantillons testés

3.3. Conclusion

Au vu des résultats de caractérisation des échantillons de cette seconde campagne, on peut dire que les non-tissés 3D produits sont principalement caractérisés par un comportement fortement résilient et une forte irrégularité en terme de répartition de la densité de matière dans la nappe plissée.

Les fortes dispersions observées tant au niveau des propriétés physiques que celles en compression peuvent s'expliquer par ce défaut originel du câble d'alimentation. L'analyse de ces résultats permettra de mieux comprendre le comportement de ces matériaux et de trouver, le cas échéant, des corrélations entre les paramètres de fabrication et les caractéristiques physiques et mécaniques en compression du non-tissé 3D.

4. Analyse des résultats

Nous avons choisis de réaliser deux types d'analyses statistiques pour examiner les résultats obtenus. La première analyse porte sur le test de comparaison des variances et des moyennes [49, 50]. Ce test permettra de déterminer si les différences statistiques observées entre deux échantillons sont dues à la variabilité naturelle du produit et du procédé ou si elles sont dues aux variations des paramètres de production. La seconde analyse porte sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) [51, 52]. Cette dernière permettra de décrire et de mettre en évidence le groupe de grandeurs qui influencent le comportement du produit. Ces deux types d'analyses nous permettront de dégager des tendances de comportement du non-tissé 3D produit connaissant ses paramètres de fabrication. Les analyses statistiques ont toutes été effectuées avec un risque d'erreur de 5%. L'annexe V.5 décrit le principe des méthodes

statistiques (tests d'ajustement, comparaison des variances et des moyennes, ACP) présentées dans cette étude.

4.1. Principe du test de comparaison des variances et des moyennes

L'application du test de comparaison des variances et des moyennes nécessite de vérifier au préalable que les échantillons soient issus d'une population dont la fonction de distribution suit une loi normale. La conformité des données par rapport à la loi normale a été vérifiée par les tests d'ajustement de Khi2 et de Kolmogorov-Smirnov. Si l'hypothèse de normalité est acceptée par au moins un de ces deux tests, on peut effectuer le test de comparaison des variances et des moyennes. Dans le cas où l'hypothèse de normalité est rejetée par les deux tests d'ajustement, on effectue le test de Friedman pour déterminer si les différences des moyennes entre les échantillons sont significatives. Ces tests d'ajustement ont été appliqués à l'aide du logiciel *TASTEL*[®].

Le test de comparaison des moyennes est réalisé après avoir vérifié l'égalité des variances des échantillons à comparer. Ces deux tests tiennent compte de la taille de la population d'échantillons, c'est-à-dire si elle est réduite (effectif < 30 échantillons) ou si elle est élevée (effectif \geq 30 échantillons). La comparaison des moyennes s'effectue entre deux échantillons.

4.2. Principe de l'Analyse en Composantes Principales

Le principe de l'ACP consiste à optimiser la représentation des données dans un espace avec le moins d'axes possibles.

Les résultats sont présentés sous forme d'un cercle de corrélations présentant les corrélations entre les variables et sous forme d'une carte des produits permettant de visualiser les produits par rapport aux variables. Dans l'analyse des graphes, on s'intéressera aux composantes principales donnant le plus d'informations (au moins 80%). Au niveau de l'interprétation du cercle de corrélations, on considérera que les résultats sont d'autant significatifs que les variables sont le plus éloignées du centre et donc le plus proche du cercle. Les valeurs des coefficients de corrélations supérieures ou égales à 0,8 seront considérées comme étant significatives. Au niveau de l'interprétation de la carte des produits, on considérera que la proximité visuelle des produits et/ou des variables décrivant ces derniers induit des caractéristiques liées en termes de données et donc de comportement.

4.3. Application

La conformité par rapport à la loi normale à un risque d'erreur de 5% a été acceptée par le test de Kolmogorov-Smirnov et refusée par le test du Khi2. Ceci nous permet de procéder au test

de comparaison des moyennes. L'annexe V.6 présente les résultats obtenus des tests de comparaison des variances et des moyennes et de l'ACP.

4.3.1. Résultats du test de comparaison des variances et des moyennes

Ces tests ont été réalisés pour les paramètres mesurés de masse surfacique, d'irrégularité, d'épaisseur, de compressibilité, d'énergie dissipée et de résilience de compression. Dans les tableaux de résultats (Tableau 11 et annexe V.6.1), on désignera par *S* les différences significatives et par *NS* les différences non significatives.

4.3.1.1. Masse surfacique

Au niveau de la masse surfacique, on observe une différence non significative entre les échantillons 1-2, tous les autres étant différents. On peut donc considérer que ces deux échantillons sont identiques au vu de leur poids. Si on considère les échantillons {1, 2, 3}, {6, 7, 8}, issus de câbles de titres identiques, on peut conclure que la différence observée est principalement due à la variation de laize dans le câble d'alimentation. Cette variation est elle-même induite par la séparation du câble qui n'est pas à « droit filament » et faite de façon manuelle.

Tableau 11. Résultats de masse surfacique

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	NS						
u(moy)		NS						
u(var)	3	S	S					
u(moy)		S	S					
u(var)	4	NS	NS	S				
u(moy)		S	S	S				
u(var)	5	S	S	NS	S			
u(moy)		S	S	S	S			
u(var)	6	S	S	S	S	S		
u(moy)		S	S	S	S	S		
u(var)	7	S	S	S	S	S	S	
u(moy)		S	S	S	S	S	S	
u(var)	8	S	S	S	S	S	NS	S
u(moy)		S	S	S	S	S	S	S

4.3.1.2. Irrégularité

Au niveau de l'irrégularité, on observe une différence non significative entre tous les échantillons à l'exception de l'échantillon 5. Si on considère les masses linéiques des câbles d'alimentation, on observe que l'échantillon 5 est issu d'un câble de titre inférieur à 20 ktex, à l'inverse des autres échantillons issus de câbles de titres supérieurs à 20 ktex. Les résultats d'irrégularité ont montré que l'échantillon 5 est le plus irrégulier.

L'analyse effectuée nous permet donc de conclure que plus le titre du câble d'alimentation est faible, plus l'irrégularité sera prononcée dans la nappe plissée, ce qui est cohérent avec les théories de distribution développées par Martindale [53]. On peut en conclure que la variation de laize diffère d'un câble à un autre et qu'elle n'est pas encore maîtrisée dans le procédé de fabrication.

4.3.1.3. Epaisseur initiale

Au niveau de l'épaisseur du matériau, on observe une différence non significative entre les échantillons 2-3, 2-4 et 6-7, tous les autres étant différents. On peut conclure que ces échantillons présentent la même épaisseur.

4.3.1.4. Epaisseur finale après compression

Au niveau de l'épaisseur finale du matériau, on observe une différence non significative entre les échantillons 2-3, 2-4, 6-7 et 7-8. On peut conclure que ces échantillons présentent la même épaisseur après compression.

4.3.1.5. Compressibilité

Au niveau de la compressibilité, on observe une différence non significative entre les échantillons {1, 2, 3, 4, 5} et 7-8. On peut conclure que ces échantillons présentent le même comportement concernant leur compressibilité.

4.3.1.6. Résilience

Au niveau de la résilience en compression, on observe une différence non significative entre les échantillons 1-5, 3-5 et 6-8. On peut conclure que ces échantillons présentent le même comportement résilient.

4.3.1.7. Energie de compression

Au niveau de l'énergie de compression, on observe une différence non significative entre les échantillons 2-3, 2-4, 3-5, 6-7 et 7-8. On peut conclure que ces échantillons présentent le même comportement dissipatif.

4.3.2. Résultats de l'ACP

Nous avons réalisé une première étude pour déterminer les corrélations entre les différentes caractéristiques physiques et mécaniques en compression. Une seconde étude a été menée pour déterminer s'il existe des corrélations entre les paramètres réglables de fabrication et les caractéristiques du produit.

4.3.2.1. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

Nous avons déterminé les corrélations existantes entre les propriétés physiques (masse surfacique, irrégularité, etc.) et les propriétés en compression (résilience, énergie, etc.). Le Tableau 12 présente les coefficients de corrélations entre les différentes caractéristiques. Le cercle de corrélations et la carte des produits sont présentés aux Figures 55 – 56.

Tableau 12. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques du produit

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Irrégularité	Taux de compactage	Angle de pli
Energie dissipée	1,00							
Résilience	-0,58	1,00						
Epaisseur	0,71	-0,40	1,00					
Compressibilité	0,93	-0,29	0,61	1,00				
Masse surfacique	-0,20	0,27	-0,79	-0,04	1,00			
Irrégularité	-0,40	0,30	0,23	-0,48	-0,66	1,00		
Taux de compactage	0,41	-0,20	0,72	0,23	-0,70	0,63	1,00	
Angle de pli	-0,43	0,20	-0,73	-0,26	0,69	-0,61	-1,00	1,00

Les variables *irrégularité*, *angle de pli* et *énergie dissipée* sont situées sur le cercle de corrélations. Les autres variables, à l'exception de la variable *résilience* sont très proches du cercle. Les composantes principales A1 et A2 représentent 80% de l'information dont 51% sur l'axe A1. Les interprétations seront donc effectuées suivant cet axe. Les résultats montrent que :

- Le taux de compactage et l'angle de pli sont anti-corrélés. Plus la structure plissée est compactée, plus le pli est vertical car l'angle de pli tend vers zéro.
- La résilience est anti-corrélée avec l'énergie dissipée et la compressibilité. Plus la résilience est importante, moins la structure plissée est compressible et moins elle dissipera de l'énergie.

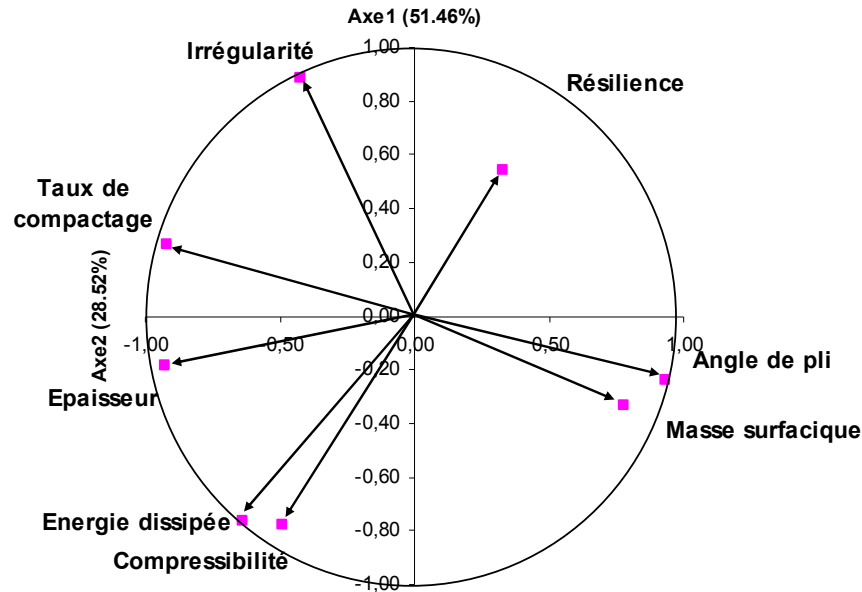


Figure 55. Cercle de corrélations – Propriétés physiques et mécaniques en compression

Au niveau de la carte des produits (Figure 56), on trace les axes des différentes variables qui nous permettront d'effectuer des regroupements de produits. La projection orthogonale des produits sur ces différents axes nous permet d'enrichir les observations obtenues en dégagant des tendances de comportement. L'annexe V.6.2 présente un exemple de projection orthogonale des produits suivant l'axe de la variable *résilience*. Les résultats montrent que :

- L'on peut regrouper les échantillons (1, 2, 3), (5) et (4, 6, 7, 8). Le premier groupe est plus lourd, plus vertical, plus résilient, moins compacté, moins compressible et dissipatif que le second.
- Au niveau de l'épaisseur, les échantillons 1 et 8 sont respectivement les moins et les plus épais. Les échantillons 5, 6 et 7 sont très proches entre eux et moins épais que les échantillons 2 et 3.
- Au niveau de la résilience, les échantillons 1 et 8 sont respectivement les plus et les moins résilients. Les échantillons 2 et 3 présentent un comportement similaire. Il en est de même pour les échantillons 6 et 7. Les échantillons 4 et 5 se situent dans un plan médian entre tous les autres échantillons.
- Au niveau de l'irrégularité, l'échantillon 5 est le plus irrégulier et se distingue nettement des autres qui sont quasiment identiques.

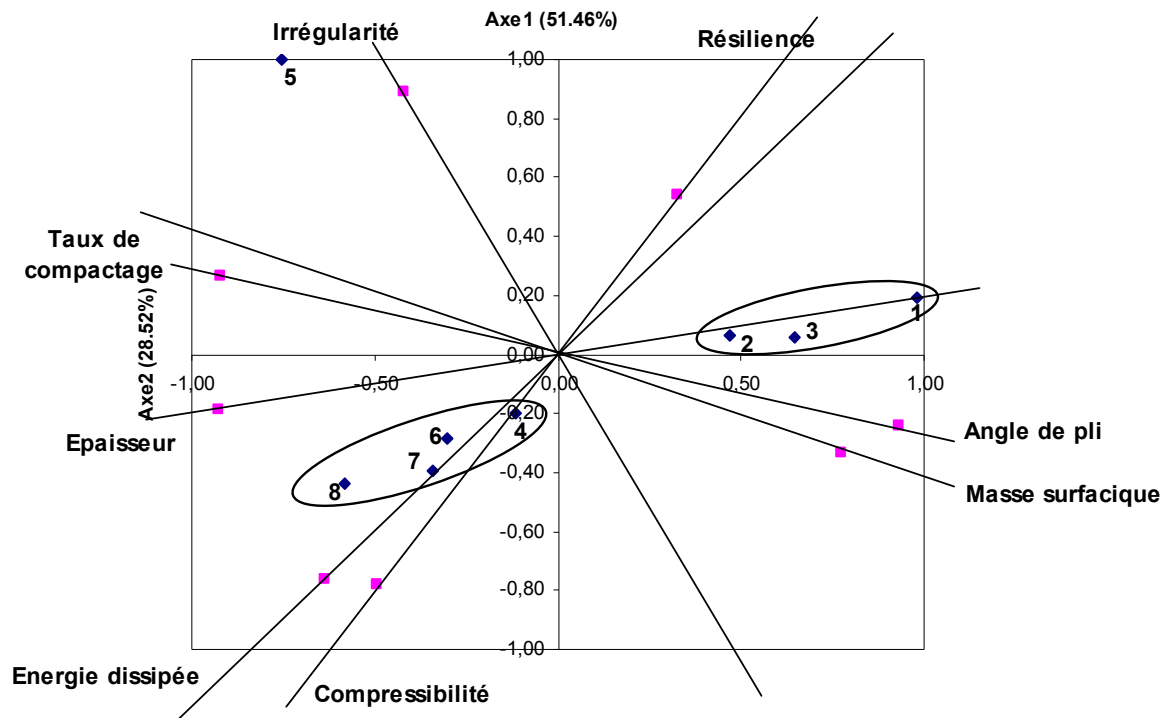


Figure 56. Carte des produits

4.3.2.2. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication

Les corrélations entre les caractéristiques précédemment étudiées et les paramètres de réglage lors de la fabrication des nappes plissées testées ont été déterminées. L'annexe V.6.2 présentent les valeurs des coefficients de corrélations, la carte des produits et la projection suivant l'axe des variables *titre* et *irrégularité*. La Figure 57 présente le cercle des corrélations obtenues.

Seules les variables *énergie dissipée*, *résilience*, *température de consigne*, *vitesse d'entrée de verticalisation*, *vitesse de plissage* et *vitesse de condensation* seront considérées comme significatives car elles sont situées le plus près du cercle de corrélations. Les composantes principales A1 et A2 représentent 82% de l'information dont 56% sur l'axe A1. Les résultats montrent une anti-corrélation entre l'énergie dissipée et la température de plissage et une corrélation entre l'énergie dissipée et la vitesse de condensation. On observe une anti-corrélation entre le titre et l'irrégularité. On peut regrouper les échantillons (1, 2, 3, 4) et (6, 7, 8).

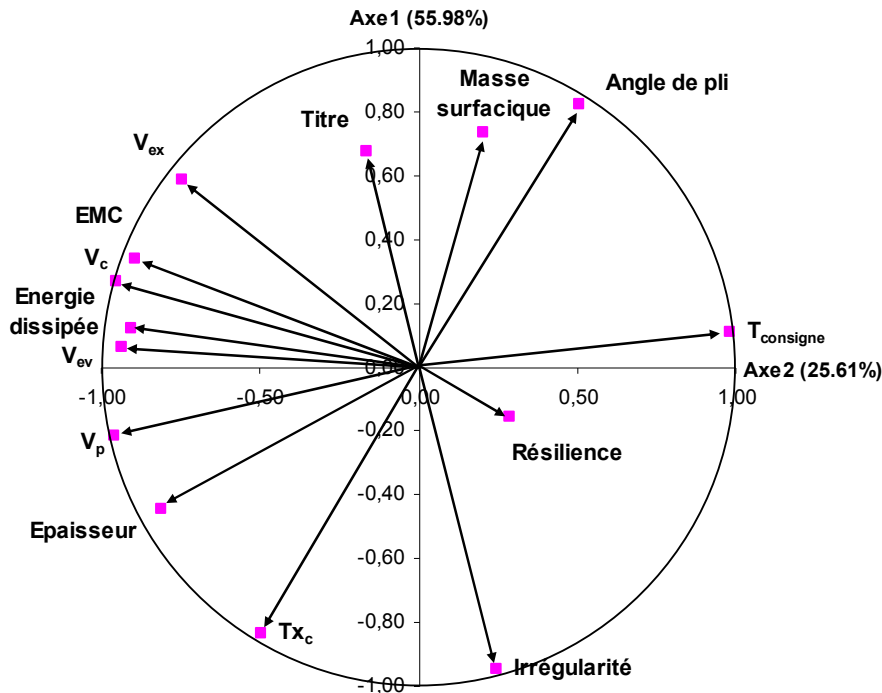


Figure 57. Cercle de corrélations – Caractéristiques physiques et mécaniques en compression et paramètres de fabrication

4.4. Conclusions

Le test de comparaison des moyennes a permis de mettre en évidence les différences observées entre les différents non-tissés 3D testés ainsi que l'impact de la préparation et du titre du câble d'alimentation sur les propriétés physiques du non-tissé 3D. Nous pouvons conclure que les échantillons de non-tissés 3D testés ne présentent pas tous le même comportement tant au niveau des propriétés physiques que celles de compression. Cette analyse démontre bien notre manque de savoir-faire en terme de transformation du câble dans le procédé de fabrication VERTILAP[®] par voie filamentaire. Ce résultat montre l'importance de la nature et de la qualité (homogénéité, etc.) de la matière d'alimentation sur la qualité du produit final.

L'ACP a montré de fortes corrélations entre les propriétés physiques suivantes, taux de compactage et angle de pli et entre les propriétés mécaniques en compression énergie dissipée, compressibilité et résilience. Nous avons pu relever que plus la structure du non-tissé 3D est compacte, plus l'orientation des plis est verticale. De même, plus le non-tissé 3D est résilient, moins il est compressible et dissipatif en énergie. L'idéal pour obtenir un bon toucher « soft » serait d'obtenir un équilibre entre résilience et énergie dissipée. Il a également été mis en évidence les regroupements des échantillons (1, 2, 3), (5) et (4, 6, 7, 8) présentant des comportements différents d'un groupe à l'autre. Il est difficile, à ce stade du

développement du prototype, de déterminer clairement les corrélations entre les paramètres de fabrication et les caractéristiques des non-tissés 3D testés.

5. Recommandations pour le développement du prototype expérimental

Comme lors de la première campagne d'essais, nous allons émettre un certain nombre de modifications à apporter en vue de l'amélioration du procédé de production et de la caractérisation des non-tissés 3D obtenus.

5.1. Recommandations en production

Les résultats de caractérisation obtenus nous ont permis d'identifier de façon plus précise les paramètres les plus influents du procédé de fabrication. Il a donc été impératif d'opter pour des solutions intermédiaires (non encore industrialisées) permettant d'obtenir des améliorations immédiates. L'objectif de cette démarche a aussi été de pouvoir produire le plus rapidement possible un non-tissé 3D de qualité acceptable avec les moyens mis à notre disposition.

5.1.1. Ouverture et préparation du câble d'alimentation

Afin d'améliorer l'opération de défibrage réalisée entre les cylindres (2) et (3) sur le prototype expérimental, nous avons choisi de réaliser cette opération sur une machine de convertissage industrielle. Cette machine va permettre d'optimiser le défibrage, c'est-à-dire l'individualisation des filaments contenus dans la nappe d'alimentation. A ce moment, la préparation de la matière devra être organisée en deux tâches ; une première tâche de séparation manuelle du câble et une deuxième tâche de défibrage sur une machine de convertissage (Figure 58), un « Converter TT12 » [54] fabriqué par le constructeur de machines N. SCHLUMBERGER. Cette machine est usuellement utilisée pour transformer des câbles de filaments synthétiques continus ou des fibres discontinues dont la longueur et le coefficient de variation sont compatibles avec les diagrammes de fibres de type laine. Le « Converter TT12 » est essentiellement utilisé pour convertir des câbles de polyester ou de polyamide en ruban de fibres discontinues. On distingue quatre principales fonctions de la machine : le râtelier d'alimentation, la zone de défibrage, une zone de découpe des filaments en sortie du défibrage, une sortie constituée de pots. Notre utilisation du Converter se limitera à la zone de défibrage en sortie de laquelle, la nappe défibrée sera stockée dans des pots.

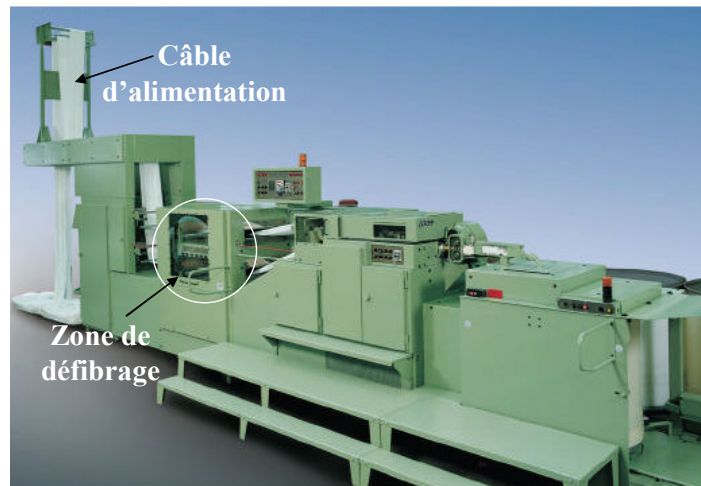


Figure 58. Machine de convertissage – Converter TT12 [54]

5.1.2. Chauffage des zones de plissage et de condensation

Afin d'optimiser le flux thermique dans le processus de formation des plis, la solution envisagée a été de rapprocher le générateur de chaleur de sorte qu'il soit le plus près possible de la zone d'extraction. Il faut également noter que jusqu'à présent, la réception de la nappe plissée était réalisée sur une plaque d'environ 30 cm de long. Ceci ne laissait pas suffisamment de temps à la matière pour se refroidir et donc fixer sa structure plissée avant son conditionnement. Une solution a donc été de remplacer la plaque de réception existante par une plaque plus longue d'environ 80 cm. Ces deux solutions sont illustrées à la Figure 59.

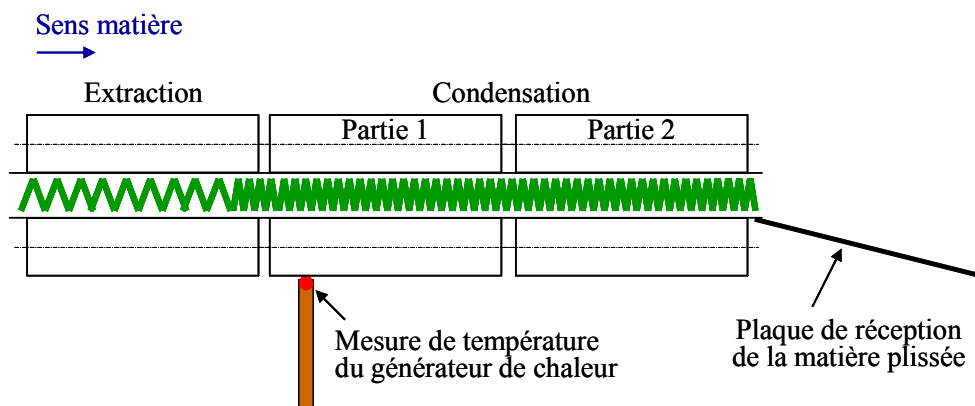


Figure 59. Modification dans la zone de condensation et en sortie du procédé

5.2. Recommandations pour la caractérisation

Les améliorations du procédé, suite aux recommandations préconisées au niveau de la production, devront conduire à des non-tissés 3D plissés de meilleures qualités. Ceci devra nous permettre d'élargir le champ de caractérisation de ces produits vers des aspects tels que la perméabilité à l'air et la conductivité thermique qui semblent intéressants à étudier surtout

dans une optique de remplacement de la mousse polyuréthane dans certaines applications d'habillage intérieur automobile.

6. Conclusions

Cette deuxième campagne d'essais a permis d'améliorer le procédé de fabrication au travers de l'application des préconisations énoncées suite à la première campagne d'essais. L'analyse des résultats de caractérisations physiques et mécaniques en compression a mis en évidence les facteurs les plus influents de production sur le comportement du matériau. Ces facteurs sont la préparation du câble d'alimentation, le titre de ce dernier, les vitesses d'entrée et de sortie du plissage ainsi que la température des tambours de plissage.

Le retour d'expérience de cette deuxième campagne nous a conduit à prendre des mesures en vue d'améliorer le procédé de fabrication. Ces améliorations du procédé devront permettre la fabrication de produits les moins irréguliers possibles, nous permettant alors de procéder à des études comparatives avec la mousse polyuréthane que nous souhaitons remplacer dans le complexe automobile.

CHAPITRE 4.4
CAMPAGNE D'ESSAIS N° 3

Ce chapitre présente la réalisation des non-tissés 3D VERTILAP[®] après modification du prototype expérimental suite à la campagne d'essais N° 2. Les non-tissés 3D mono couches, réalisés au cours de cette troisième campagne de production ont été contrecollés à sec sur une presse Meyer[®] (cf. 1.2.4 du chapitre 3) mise à disposition par PROTECHNIC afin d'obtenir des produits multicouches. L'étude des produits VERTILAP[®] mono couches et multicouches obtenus sera présentée. Tout comme lors de la campagne d'essais N° 2, des recommandations seront apportées afin de mettre au point le prototype expérimental.

1. Réalisation de produits VERTILAP[®]

Comme présenté dans le chapitre précédent, la production des non-tissés 3D VERTILAP[®] a été effectuée en deux étapes principales avec cette fois, une modification de la procédure au niveau de la préparation de la matière d'alimentation.

1.1. Production de non-tissés 3D VERTILAP[®]

1.1.1. Préparation de la matière d'alimentation

Lors de cette troisième campagne d'essais, nous avons amélioré la technique décrite au chapitre 4.2 en défibrant les câbles d'alimentation à l'aide d'un Converter. Le câble défibré est d'aspect plus volumineux et présente une meilleure répartition en terme de densité de matière. La Figure 60 illustre l'aspect du câble avant et après le passage au Converter.



Figure 60. Câble d'alimentation avant (à gauche) et après (à droite) défibrage au Converter

1.1.2. Paramètres de production

Les quatre câbles travaillés dans cette troisième campagne de production sont plus légers que ceux utilisés précédemment dans la deuxième campagne. Leur masse linéique est comprise entre 14 ktex et 18 ktex. Les étirages d'alimentation E_a et de défibrage E_{def} , la température de consigne $T_{consigne}$, la température du générateur de chaleur T_F , le rapport de condensation C et la vitesse de plissage V_p ont été maintenus constants. Nous avons fait varier les indicateurs de suralimentation I_{sa} et d'étirage d'extraction I_{Ex} , qui sont liés aux vitesses en entrée et en sortie du plissage.

Les étirages E_a et E_{def} ont été fixés respectivement à 1,06 et 1,35. Le décapeur thermique a été réglé à la position P1, ce qui correspond à une température T_F de 233°C et un flux d'air chaud de 1,6m/s. La température de consigne a été fixée à 67°C. Le rapport de condensation a

été fixé à 2,1 et la vitesse des tambours de plissage à 1,6m/min. Les vitesses V_{ev} et V_{ex} ont respectivement varié entre [4,0m/min ; 4,6m/min] et [2,6m/min ; 2,7m/min]. Les différents réglages de production sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Paramètres de production de la troisième campagne de production

Câbles d'alimentation	Titre (ktex)	Températures (°C)		Réglages machine				Vitesses de production (m/min)					
		$T_{consigne}$	T_F	C	I_{sa} (%)	V_T	I_{Eex} (%)	V_2	V_3	V_{ev}	V_p	V_{ex}	V_c
1	14	67	233	2,1	-2	28	-14	3,21	4,33	4,59	1,63	2,44	1,16
2	15	67	233	2,1	-13	28	-4	2,86	3,86	4,09	1,63	2,74	1,30
3	16	67	233	2,1	-12	28	-5	2,88	3,89	4,12	1,63	2,70	1,28
4	18	67	233	2,1	-15	28	-5	2,80	3,78	4,00	1,63	2,70	1,28
Moy	16	67	233	2,1	-10	28	-7	2,94	3,96	4,20	1,63	2,64	1,26
CV (%)	9	0	233	0,0	55	0	69	6,33	6,33	6,33	0,00	5,14	5,14
Min	9	0	233	0,0	-55	0	-69	2,80	3,78	4,00	0,00	2,64	1,26
Max	18	67	233	2,1	-2	28	-4	3,21	4,33	4,59	1,63	2,74	1,30

La Figure 61 représente le tracé des vitesses de production V_{ev} , V_p et V_{ex} des différents câbles plissés. Comparativement à la campagne N° 2, ce tracé montre que nous avons pu réduire les variations de vitesses en entrée et en sortie de plissage de façon nette. Ceci s'explique notamment par la qualité du défibrage du câble entrant. Bien que la séparation du câble ne s'effectue toujours pas à « droit filament », l'amélioration du défibrage a contribué à réduire partiellement l'irrégularité entrante.

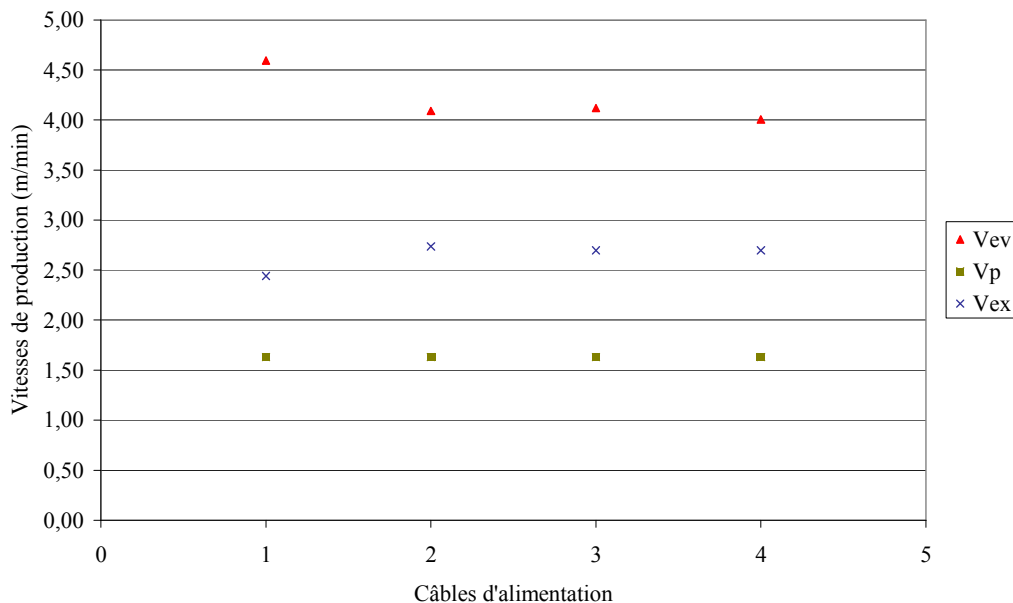


Figure 61. Vitesses de production lors de la campagne d'essais N° 3

1.1.3. Observation du procédé de fabrication

Afin de mieux comprendre la formation de la structure plissée, nous avons observé le procédé à l'aide de caméras numériques. L'observation a été effectuée entre les zones d'extraction et de condensation au moment du compactage des plis comme l'indique la Figure 62. Cette observation nous a permis de mettre en évidence un défaut d'irrégularité lors du tassement des plis les uns sur les autres. Ce défaut génère une irrégularité en terme d'épaisseur dans la structure plissée. Ce problème a été résolu en réglant les écartements des organes mécaniques dans la zone de condensation pour une meilleure maîtrise de la nappe plissée pendant cette phase. Ceci nous a, par la suite, permis d'obtenir une bonne régularité du compactage. Il a également été observé que la température du produit final était de l'ordre de 50 à 55°C au point A et de l'ordre de 30 à 35°C au point B sur le plateau de réception (Figure 62). Ceci fait un différentiel de température de 20°C entre l'instant où la matière plissée sort du procédé et l'instant où elle est conditionnée dans les cartons. Cette observation montre que le processus de consolidation des plis n'est pas optimisé. Une solution pour y remédier serait de refroidir la matière dans la partie 2 de la zone de condensation.

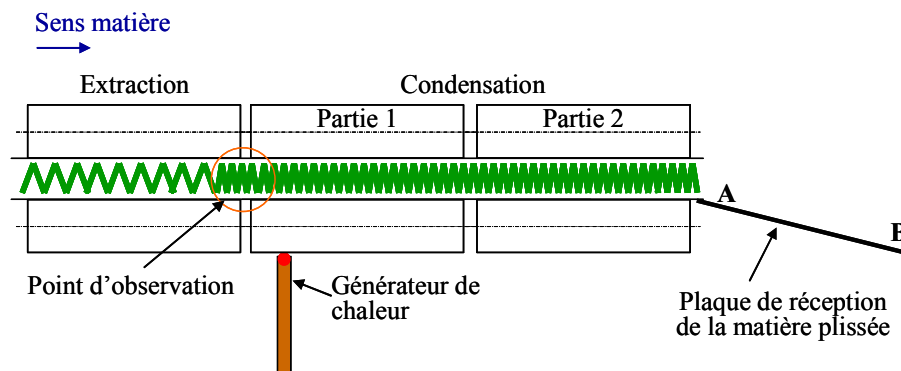


Figure 62. Zones d'observation du procédé de fabrication

1.2. Contrecollage des non-tissés 3D VERTILAP®

Les quatre nappes plissées présentées précédemment ont été contrecollées à l'aide d'une presse de contrecollage à sec Meyer®. Les différents produits multicouches ont été réalisés sous différents réglages de la machine.

1.2.1. Paramètres de contrecollage

L'opération de contrecollage nécessite de fixer les paramètres tels que la température, la pression, la vitesse et l'espacement entre les tapis (paramètre lié à la pression). Le choix du liant doit également tenir compte de la température de contrecollage fixée. Il est également recommandé de conditionner le produit final obtenu pendant au moins 72h afin de permettre à la colle d'achever son processus de cristallisation, nécessaire pour un bon assemblage des différentes couches.

Dans la famille des produits épais, dont l'épaisseur est généralement comprise entre 5 et 50 mm, les non-tissés 3D VERTILAP[®] sont classés dans la gamme des produits de faible épaisseur. Compte tenu de l'épaisseur de ces non-tissés, nous avons souhaité ne pas appliquer une trop forte pression sur les tapis lors du contrecollage. En effet, cette dernière aurait écrasé la structure plissée. C'est la raison pour laquelle, nous avons choisi de ne travailler qu'avec la pression exercée par le poids des tapis. Pour cela, nous avons réglé l'écartement entre tapis de manière à donner suffisamment de pression sans toutefois écraser la structure plissée. Cet écartement est calculé en mesurant l'épaisseur des différentes couches assemblées. Nous avons fixé ce paramètre à 6,5 mm. Etant donné la nature expérimentale de notre étude, nous avons travaillé à une faible vitesse fixée à 2m/min. Les essais ont été réalisés à des températures comprises entre 130°C et 150°C. Les différentes couches ont été assemblées avec un liant sous forme de voile non-tissé copolyester de 25 g/m² ayant une température de fusion comprise entre 120°C - 125°C. Les liants ont été fournis par PROTECHNIC.

1.2.2. Produits multicouches VERTILAP[®]

Des tricots et des non-tissés ont été utilisés pour réaliser les produits multicouches. Le tricot utilisé est un tricot velours en polyester de type automobile de masse surfacique 200 g/m² (T200). Quatre couches différentes de non-tissés ont été utilisées : un non-tissé aiguilleté en polyester de 40 g/m² (NT40), un non-tissé aiguilleté en polyester de 145 g/m² (NT145), un non-tissé thermolié en polyester de 44 g/m² (NT44) et un non-tissé aiguilleté en polypropylène de 90 g/m² (NT90). Les supports en polyester nous ont permis de réaliser des produits mono matériau en vue du remplacement du revêtement automobile, classiquement en polyester/polyuréthane/polyamide. Nous avons également souhaité comparer les produits mono matériau avec un produit bi matériau. Dans la mesure où le polypropylène est très utilisé dans l'habitacle automobile, nous avons également choisi un non-tissé en polypropylène.

Pour chacun des non-tissés 3D (NT3D), nous avons réalisés cinq types de produits multicouches à partir des supports présentés précédemment. Le liant est disposé entre les différentes couches. Les cinq types de produits réalisés ont été les suivants :

- a : NT40/NT3D/NT40
- b : NT44/NT3D/NT44
- c : NT145/NT3D/T200
- d : NT145/NT3D/NT145/T200
- e : NT90/NT3D/NT90/T200

2. Etude des produits VERTILAP®

Trois études différentes ont été menées afin de comprendre le comportement des produits VERTILAP® mono et multicouches obtenus. La première étude a porté sur les non-tissés 3D mono couches. La seconde étude a porté sur l'influence des couches de contrecollage sur le comportement global du produit multicouche. La troisième étude a porté sur l'influence de la température du procédé de contrecollage sur le comportement du produit final. Cette partie présente les résultats de ces différentes études ainsi que l'analyse de ces résultats par le biais de la comparaison des moyennes et de l'analyse en composantes principales.

2.1. Etude des non-tissés 3D VERTILAP®

Les quatre nappes plissées à partir des câbles d'alimentation 1, 2, 3 et 4 seront appelées NT1, NT2, NT3 et NT4. Les caractéristiques physiques et mécaniques en compression ont été réalisées sur des échantillons de dimensions 10 cm x 10 cm pour chacun des non-tissés 3D. L'*annexe VI.A* présente l'ensemble des résultats de cette étude.

2.1.1. Complément de caractérisations

Compte tenu de l'amélioration du défibrage au niveau de la production des non-tissés 3D, nous avons pu obtenir une structure plissée compactée de meilleure qualité que celle obtenue dans la campagne N° 2. Ceci nous a permis d'élargir le champ de caractérisation du non-tissé 3D vers des aspects tels que la modélisation géométrique du pli après contrecollage, la perméabilité à l'air et l'isolation thermique. La perméabilité à l'air a été déterminée sous une pression de 98Pa tandis que le coefficient de conductivité thermique a été déterminé à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Ces deux derniers aspects ont été évalués en adaptant la configuration des appareillages aux non-tissés 3D plissés. En effet, ces adaptations ont pour rôle de minimiser les pertes en terme de flux thermique lors des essais. L'*annexe VI.A.1* décrit les méthodes d'essais des caractéristiques de perméabilité à l'air et de conductivité thermique (isolation thermique) [55, 56].

2.1.1.1. Modélisation géométrique du pli après contrecollage

Nous avons observé une modification de la géométrie du pli après l'opération de contrecollage. En effet, sous l'action de la pression des tapis de la presse de contrecollage, le pli s'écrase légèrement. La géométrie du pli après contrecollage peut alors être modélisée par une boucle comme le montre la Figure 63. Cette boucle est caractérisée par une hauteur e_0 qui correspond à l'épaisseur de la structure plissée, un angle θ' , une hypoténuse a' , un pas noté p , deux demi cercles de rayon r tel que $r = p/2$ et d'une épaisseur de paroi e_p qui est d'environ

1 mm. Comme dans la modélisation du pli avant contrecollage, l'épaisseur de la paroi sera considérée comme négligeable afin de simplifier le modèle. Dans ce modèle, plus l'angle θ' va tendre vers 0° , plus l'orientation du pli sera verticale.

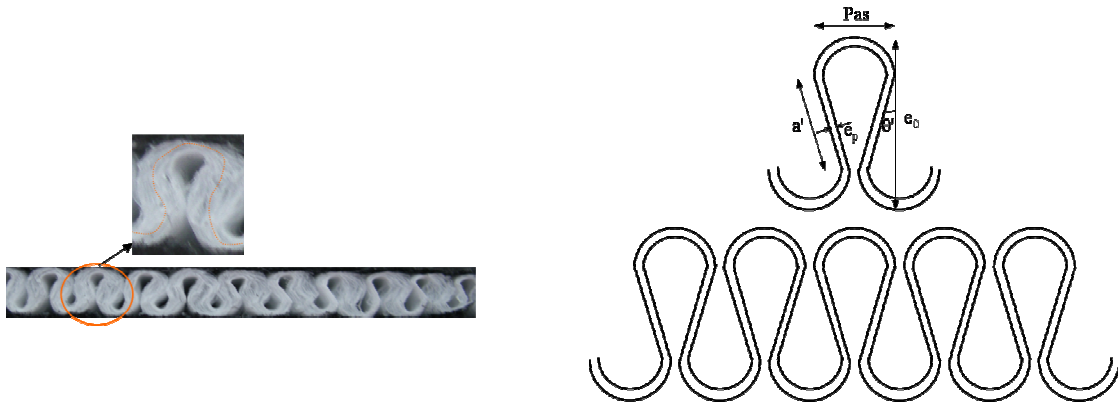


Figure 63. Modélisation géométrique du pli après contrecollage

Comme pour la modélisation du pli avant contrecollage, nous avons défini les longueurs apparente l'_a et réelle l'_r de la structure plissée. Le nombre de plis n_p et la longueur de la boucle l_{boucle} sont également pris en compte dans cette modélisation. Les caractéristiques du modèle sont déterminées par les relations suivantes :

$$p = \frac{l'_r}{n_p} = 2.r \quad \text{Equation (28)}$$

$$a' = \sqrt{(e_0 - p)^2 + \frac{p^2}{4}} \quad \text{Equation (29)}$$

$$l_{boucle} = \pi.p + 2.a' \quad \text{Equation (30)}$$

$$l'_a = n_p.l_{boucle} \quad \text{Equation (31)}$$

$$\theta' = \arctan \frac{p}{2.(e_0 - p)} \quad \text{Equation (32)}$$

Le taux de condensation calculé à partir de ces paramètres est déterminé par la relation :

$$T'x_c (\%) = 100. \frac{l'_a - l'_r}{l'_a} \quad \text{Equation (33)}$$

Il est également important de noter que le modèle géométrique précédemment décrit pourrait être utilisée dans une démarche de modélisation du comportement en compression du produit multicouche. Ceci permettrait alors de prévoir le comportement du non-tissé 3D uniquement à partir de caractéristiques telles que l'épaisseur de la structure, l'épaisseur de la paroi fibreuse,

l'angle de pli, etc. Il serait alors possible de modéliser la loi de comportement du matériau non-tissé 3D en fonction des paramètres de fabrications du procédé. Cette démarche de modélisation du comportement en compression n'a pas été étudiée dans ce travail car il ne s'agissait pas des objectifs initiaux que nous nous étions fixés dans le cadre du projet.

2.1.2. Résultats de caractérisation

2.1.2.1. Propriétés physiques

Le Tableau 14 et l'annexe VI.A.2 présentent les résultats de caractérisations physiques obtenus. Ces résultats montrent que les échantillons testés présentent en moyenne une masse surfacique, M , de 450 g/m² pour une épaisseur, T_0 , de 6 mm et une densité, d , moyenne de 76 kg/m³. On peut noter que les produits obtenus sont plus lourds de près de 40% que ceux de la campagne N° 2. Le nombre de pli moyen par cm est de 2,2 pour des valeurs moyennes du taux de compactage, T_{x_c} , et d'angle de pli, θ , respectives de 65% et 41°. L'irrégularité, I_{reg} , définie au paragraphe 2 du chapitre 4.3, est en moyenne de 1%. Le degré de compactage augmente en moyenne de 16% après le contrecollage tandis que l'angle de pli augmente en moyenne de 28%. Ceci se traduit par une amélioration de la verticalisation des plis après le contrecollage. La perméabilité à l'air est en moyenne de 408 l/m²/s pour un coefficient de conductivité thermique de l'ordre de 0,04 W/m.K.

Tableau 14. Caractéristiques physiques

Echantillons testés	M (g/m ²)	Nombre de plis/cm	p (cm)	T ₀ (mm)	d (kg/m ³)	T _{x_c} (%)	T' _{x_c} (%)	θ (°)	θ' (°)	I _{reg} (%)	Pair (l/m ² /s)	K (W/m.K)
NT1	399	2,1	0,48	6	68	63	77	43	62	2,01	434	0,04
NT2	483	2,2	0,46	6	81	64	77	42	58	0,78	428	0,04
NT3	452	2,2	0,46	6	77	65	77	41	57	0,82	450	0,05
NT4	459	2,2	0,45	6	78	67	78	39	51	0,30	321	0,03
<i>Moy</i>	<i>448</i>	<i>2,2</i>	<i>0,46</i>	<i>6</i>	<i>76</i>	<i>65</i>	<i>77</i>	<i>41</i>	<i>57</i>	<i>0,98</i>	<i>408</i>	<i>0,04</i>
<i>CV (%)</i>	<i>8</i>	<i>3,2</i>	<i>3,29</i>	<i>1</i>	<i>7</i>	<i>2</i>	<i>0</i>	<i>4</i>	<i>8</i>	<i>74,54</i>	<i>14</i>	<i>13,00</i>
<i>Min</i>	<i>399</i>	<i>2,1</i>	<i>0,45</i>	<i>6</i>	<i>68</i>	<i>63</i>	<i>77</i>	<i>39</i>	<i>51</i>	<i>0,30</i>	<i>321</i>	<i>0,03</i>
<i>Max</i>	<i>483</i>	<i>2,2</i>	<i>0,48</i>	<i>6</i>	<i>81</i>	<i>67</i>	<i>78</i>	<i>43</i>	<i>62</i>	<i>2,01</i>	<i>450</i>	<i>0,05</i>

La Figure 64 et l'annexe VI.A.3 présentent les résultats d'irrégularité d'aspect, de masse surfacique, de densité, d'épaisseur, d'angle de pli, de taux de compactage, de perméabilité à l'air et de conductivité thermique des échantillons testés. A l'exception de la caractéristique d'irrégularité, on observe pour chacun des échantillons testés des coefficients de variation de l'ordre de 4 à 20%. Ces variations sont supérieures à 80% dans le cas de l'irrégularité. Ceci montre que la méthode d'évaluation par un traitement d'images en 2D n'est plus adaptée aux

non-tissés 3D. Les résultats montrent que les nappes plissées de cette troisième campagne d'essais présentent de meilleures caractéristiques et des dispersions plus faibles comparativement aux nappes plissées lors de la campagne d'essais N° 2. Nous pouvons donc conclure que les améliorations apportées au prototype expérimental et à la procédure de préparation de la matière ont contribué significativement à l'amélioration du produit final.

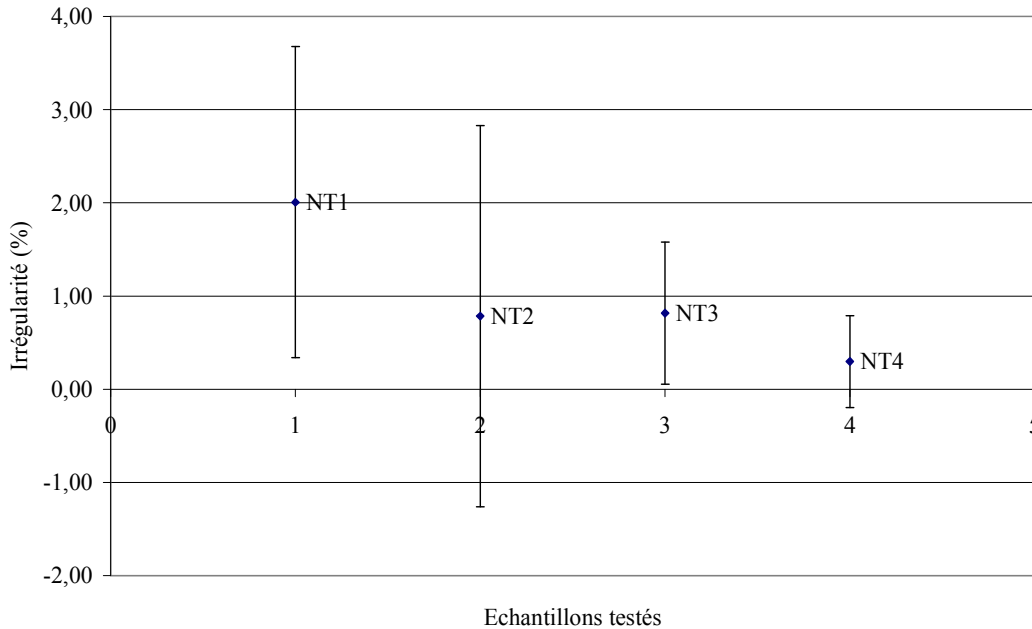


Figure 64. Irrégularité des échantillons testés

La Figure 65 présente le diagramme radar des principales caractéristiques physiques des non-tissés 3D testés. Chaque mesure est la moyenne de 31 essais. Ce tracé montre que l'échantillon NT3 est le moins isolant, l'échantillon NT4, le plus isolant thermiquement et le moins perméable à l'air. Tous les échantillons semblent similaires au regard du taux de compactage et de l'angle de pli.

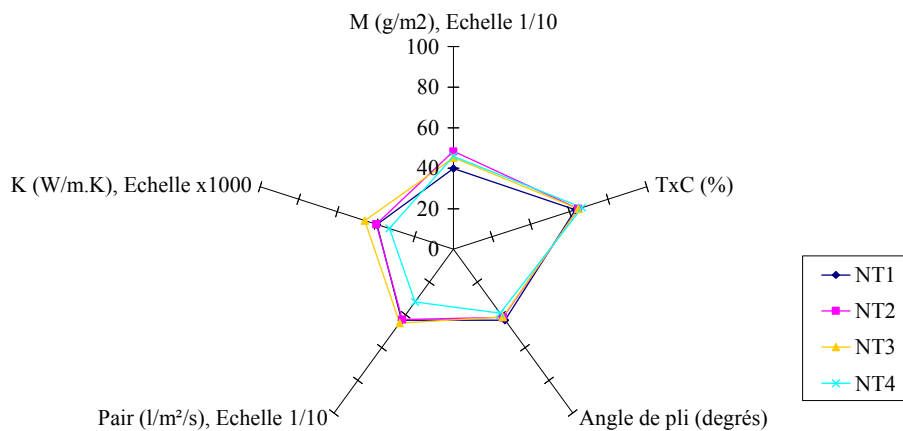


Figure 65. Caractéristiques physiques des échantillons testés

2.1.2.2. Propriétés de compression

Le Tableau 15 présente les résultats de la caractérisation en compression. Les non-tissés 3D présentent une résilience moyenne de l'ordre de 87% pour une énergie dissipée de 27 N.m/m². La compressibilité est de l'ordre de 13%. Comparativement aux non-tissés 3D produits lors de la campagne d'essais N°2, les non-tissés 3D de cette troisième campagne sont plus résilients, moins compressibles et dissipent moins d'énergie lors de la compression. En effet, on observe une augmentation de 16% de la résilience, une réduction de 38% de la compressibilité et de 21% de l'énergie dissipée. Il est admis que plus le matériau dissipe de l'énergie, plus le toucher sera « soft ». On peut donc dire que les non-tissés 3D de cette troisième campagne d'essais présenteront un toucher moins « soft » que ceux produits lors de la campagne N° 2 car nous avons affaire à une structure bloquée.

Tableau 15. Caractéristiques en compression

Echantillons testés	WC (N.m/m ²)	RC (%)	T ₀ (mm)	T _M (mm)	EMC (%)
NT1	24	87	6	5	11
NT2	29	87	6	5	14
NT3	27	83	6	5	12
NT4	30	86	6	5	14
<i>Moy</i>	<i>27</i>	<i>86</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>13</i>
<i>CV (%)</i>	<i>10</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>11</i>
<i>Min</i>	<i>24</i>	<i>83</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>11</i>
<i>Max</i>	<i>30</i>	<i>87</i>	<i>6</i>	<i>5</i>	<i>14</i>

La Figure 66 et l'annexe VI.A.4 présente le tracé des différentes caractéristiques de compression. Comme dans le cas des propriétés physiques, on observe de faibles dispersions comparées à celles obtenues lors de la campagne N° 2. Les coefficients de variation sont de l'ordre de 4 à 20%.

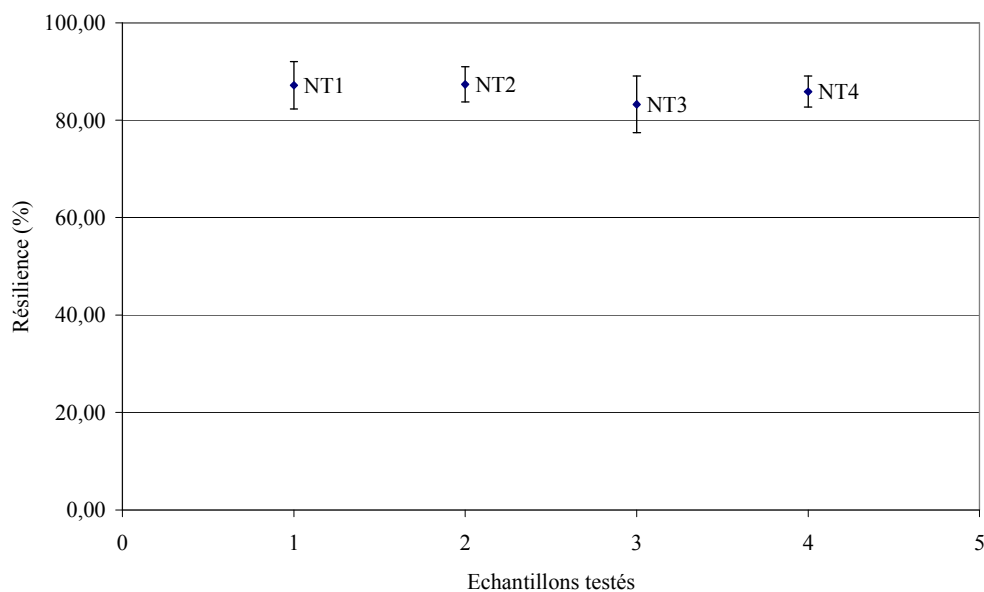


Figure 66. Caractéristiques mécaniques en compression des échantillons testés

Le diagramme radar des caractéristiques mécaniques en compression (Figure 67) montre que les échantillons apparaissent identiques en terme d'épaisseur. L'échantillon NT1 dissipe le moins d'énergie comparé aux autres qui semblent identiques. On peut donc dire que ce dernier aura un toucher moins « soft ».

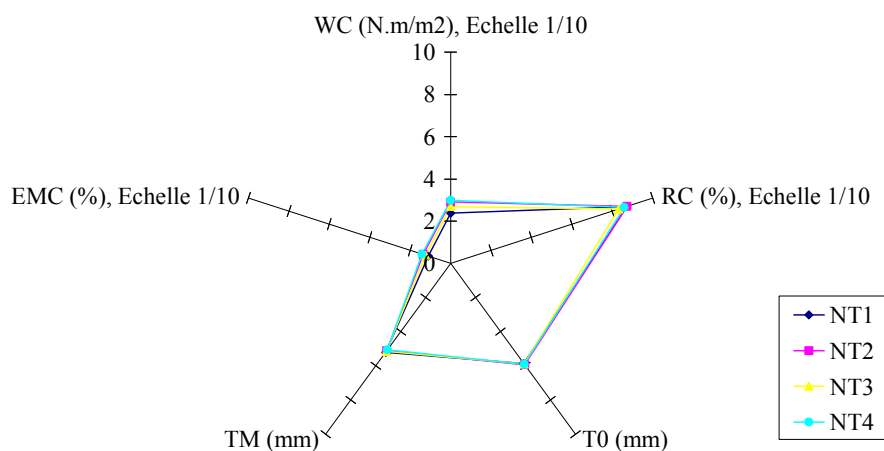


Figure 67. Caractéristiques de compression

Lors de la compression des non-tissés 3D, on observe deux phases distinctes dans le comportement de ces matériaux. En effet, on distingue un écrasement des fibres au niveau de la surface suivi de l'écrasement de la structure plissée. Lorsque le non-tissé 3D est fortement condensé et présente une bonne orientation verticale des plis, l'écrasement de la structure est très peu marqué. Les courbes de compression relevées lors de l'essai sont présentées à la Figure 68. Ces courbes montrent une déformation élastique du matériau dans les conditions

d'essais utilisées. Des essais de fatigue sur plusieurs cycles seront menés afin de confirmer cette observation.

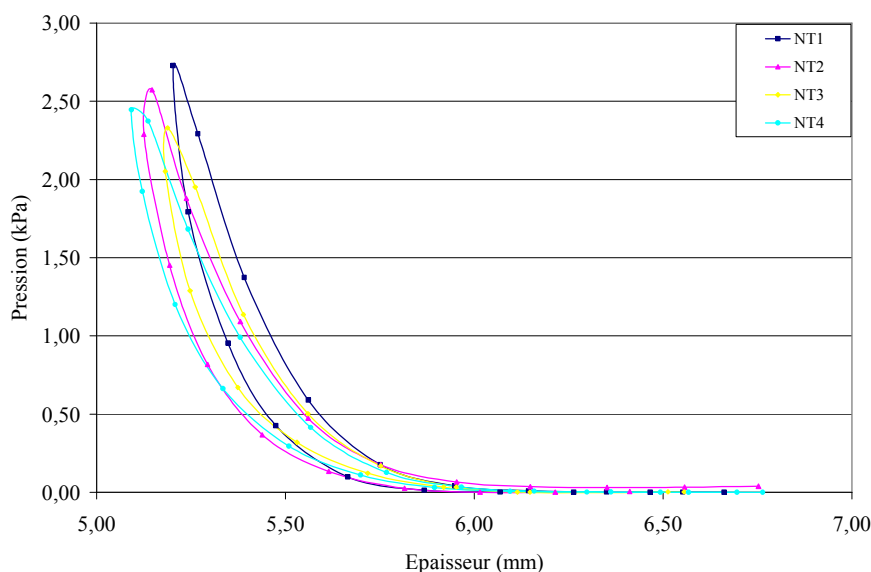


Figure 68. Courbes de compression des non-tissés 3D testés

2.1.2.3. Conclusions

Les résultats de caractérisation ont permis de mettre en évidence l'efficacité des améliorations apportées au prototype expérimental VERTILAP[®]. En effet, les non-tissés 3D produits dans cette troisième campagne présentent de meilleures caractéristiques géométriques en termes de compactage et d'orientation verticale du pli. Ils sont également plus résilients que ceux obtenus lors de la campagne N° 2. Cependant, ils présentent une masse surfacique deux fois plus importante et dissipent moins d'énergie, ce qui se traduit par un toucher moins « soft » et donc une moins bonne contribution au confort à l'assise. A ce stade, nous avons obtenus des non-tissés 3D satisfaisants au vu de la résilience mais pas encore satisfaisants au vu des caractéristiques de masse et d'énergie absorbée. Afin de répondre à la problématique de remplacement des mousses PU, les non-tissés 3D devraient être résilients, légers et présenter un toucher « soft » afin de contribuer à une bonne sensation de confort à l'assise.

2.1.3. Analyse des résultats

La conformité des données pour chacun des non-tissés 3D testés par rapport à la loi normale a été acceptée par le test de Kolmogorov-Smirnov. Ceci nous permet de procéder au test de comparaison des variances et des moyennes. L'analyse en composantes principales sera utilisée pour déterminer s'il existe des corrélations entre :

- Les caractéristiques physiques et les caractéristiques mécaniques en compression.
- Ces caractéristiques physiques et mécaniques et les paramètres de fabrication.

2.1.3.1. Comparaison des variances et des moyennes

L'*annexe VI.A.5.1* présente les résultats du test de comparaison des variances et des moyennes pour les différentes caractéristiques physiques et mécaniques en compression étudiées. Ces résultats montrent que :

- Tous les échantillons sont identiques en terme d'épaisseur. Ceci nous permet de confirmer que pour un réglage d'écartement donné entre les tambours de plissage, ces derniers permettent une hauteur de plissage reproductible dans le temps.
- En terme de masse surfacique, les échantillons NT3 et NT4 sont identiques.
- Au niveau de l'angle de pli et du taux de compactage, on n'observe aucune différence significative entre les échantillons (NT1 et NT3), (NT2 et NT3).
- Au niveau de la perméabilité à l'air, on n'observe aucune différence significative entre les échantillons (NT1 et NT2), (NT2 et NT3).
- Au niveau de la conductivité thermique, aucune différence significative n'est observée entre les échantillons (NT et NT2).
- Au niveau de la compressibilité et de l'épaisseur finale après compression, les échantillons (NT1 et NT3), (NT2 et NT3), (NT2 et NT4) ne présentent pas de différence significative.
- Au niveau de l'énergie dissipée, aucune différence significative n'est observée entre les échantillons (NT2 et NT3), (NT2 et NT4).
- Au niveau de la résilience, les échantillons (NT1 et NT2), (NT2 et NT4) ne présentent pas de différence significative.

Au vu des résultats présentés précédemment, nous pouvons conclure que les non-tissés 3D testés ne présentent pas le même comportement au vu des caractéristiques étudiées.

2.1.3.2. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

Les résultats sont présentés en *annexe VI.A.5.2.1*. Les composantes principales A1 et A2 représentent 84% de l'information dont 64% sur l'axe A1. A l'exception des variables *épaisseur*, *masse surfacique* et *résilience*, toutes les autres sont situées à proximité du cercle de corrélations. Les résultats montrent que :

- Le taux de compactage et l'angle de pli sont anti corrélés. Plus la structure plissée est compactée, moins l'angle de pli est important et donc plus l'orientation du pli est verticale. Cette observation rejoint celle faite lors de la campagne N° 2.
- La compressibilité, l'énergie dissipée, la résilience et le taux de compactage sont corrélés positivement entre eux et négativement avec l'angle de pli. Plus l'orientation des plis est verticale, moins la structure absorbera de l'énergie. On peut en conclure

que le tocher « soft » et donc la sensation de confort à l'assise sera influencée par la verticalisation de la structure.

- La perméabilité à l'air et la conductivité thermique sont corrélées positivement entre elles. Plus le non-tissé 3D est perméable à l'air, moins sa capacité d'isolation thermique est importante. Ce résultat est particulièrement intéressant car il indique que les non-tissés 3D plissés offrent de bonne sensation de confort en termes de ventilation et d'isolation thermique.

La carte des produits montre que les différents non-tissés 3D testés présentent des comportements différents. Les projections orthogonales des produits sur chacun des différents axes des variables montrent également des différences entre les produits. Les résultats montrent qu'il n'est pas possible de faire de regroupements homogènes entre les différents produits. Ce résultat confirme celui du test de comparaison des moyennes.

2.1.3.3. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication

Les résultats sont présentés en *annexe VI.A.5.2.2*. Les composantes principales A1 et A2 représentent 84% de l'information dont 67% sur l'axe A1. A l'exception des variables *épaisseur, résilience, et vitesse de plissage* toutes les autres sont situées à proximité du cercle de corrélations. Les résultats montrent que la vitesse d'entrée de verticalisation est corrélée négativement avec la masse surfacique. Cette dernière est corrélée positivement avec la vitesse d'extraction. Ce résultat confirme l'observation effectuée au niveau de la production. Lorsque la quantité de matière devient importante en entrée du plissage, la vitesse d'entrée de verticalisation est réduite et inversement la vitesse d'extraction est augmentée. Au niveau de la carte des produits, aucun regroupement entre produits n'est observé.

2.1.3.4. Conclusions

Les résultats de caractérisation ont montré que les non-tissés 3D produits lors de cette troisième campagne d'essais présentent des caractéristiques de résilience, de compactage et d'orientation verticale des plis meilleurs que ceux produits lors de la campagne N° 2. Les dispersions observées sont également plus faibles mais elles restent encore élevées sur l'ensemble des caractéristiques étudiées. L'analyse des résultats a mis en évidence les différences de comportement entre les non-tissés 3D testés en fonction des paramètres de fabrication utilisés. Les résultats de cette analyse ont également montré des corrélations négatives fortes entre l'orientation verticale du pli et les caractéristiques taux de compactage, compressibilité et énergie dissipée. Des corrélations positives fortes ont été observées entre la perméabilité à l'air et la conductivité thermique traduisant l'aptitude de confort des non-tissés

3D. Ces résultats ont aussi mis en évidence les corrélations entre la masse surfacique et les vitesses d'entrée et de sortie du plissage.

Malgré une nette amélioration par rapport aux campagnes précédentes, les produits plissés obtenus ne sont pas encore satisfaisants en termes de légèreté et de sensation de confort (toucher « soft ») liée à l'énergie absorbée pendant la compression. Des améliorations doivent encore être faites sur le prototype et sur la préparation de la matière d'alimentation afin d'obtenir des produits plissés qui permettront de répondre à la problématique de remplacement des mousses PU.

2.2. Influence des couches de contrecollage

L'objectif de cette étude est de déterminer s'il existe des différences de comportement entre les cinq types de produits multicouches a, b, c, d, e et le non-tissé 3D mono couche. Pour cela, nous avons comparé les produits multicouches issus d'une même nappe non-tissé 3D et contrecollés à une température de 150°C. Les produits présentés dans cette étude sont résumés dans le Tableau 16.

Les résultats bruts seront présentés et ensuite analysés au travers de la comparaison des moyennes et de l'analyse en composantes principales. Ces deux analyses statistiques permettront de confirmer ou d'infirmer les observations obtenues sur la base des résultats bruts.

Tableau 16. Produits étudiés dans l'étude de l'influence des couches de contrecollage

Non-tissés 3D	Produits multicouches dérivés	Code
NT1	NT40 / NT1 / NT40	a1
	NT44 / NT1 / NT44	b1
	NT145 / NT1 / T200	150_c1
	NT145 / NT1 / NT145 / T200	150_d1
	NT90 / NT1 / NT90 / T200	150_e1
NT2	NT40 / NT2 / NT40	a2
	NT44 / NT2 / NT44	b2
	NT145 / NT2 / T200	150_c2
	NT145 / NT2 / NT145 / T200	150_d2
	NT90 / NT2 / NT90 / T200	150_e2
NT3	NT40 / NT3 / NT40	a3
	NT44 / NT3 / NT44	b3
	NT145 / NT3 / T200	150_c3
	NT145 / NT3 / NT145 / T200	150_d3
	NT90 / NT3 / NT90 / T200	150_e3
NT4	NT40 / NT4 / NT40	a4
	NT44 / NT4 / NT44	b4
	NT145 / NT4 / T200	150_c4
	NT145 / NT4 / NT145 / T200	150_d4
	NT90 / NT4 / NT90 / T200	150_e4

* Les produits de types a, b, c et d sont ceux présentés au paragraphe 1.2.2.

La caractérisation a porté sur l'évaluation des paramètres de masse surfacique, de perméabilité à l'air, de conductivité thermique, d'épaisseur, de compressibilité, d'énergie dissipée et de résilience. Les résultats obtenus ont été examinés au travers du test de comparaison des moyennes et de la carte des produits donnée par l'analyse en composantes principales. L'*annexe VI.B* présente l'ensemble des résultats de cette étude.

2.2.1. Résultats de caractérisation

Les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des échantillons testés ont été évaluées à partir des méthodes d'essais utilisées au chapitre 4.3. Les échantillons testés sont de dimensions 10 cm x 10 cm. L'*annexe VI.B.1* présente les résultats des caractéristiques physiques et mécaniques en compression étudiées.

2.2.1.1. Propriétés physiques

Le Tableau 17 présente les valeurs moyennes des caractéristiques physiques étudiées. Les mesures ont été réalisées sur au moins 6 échantillons. Sur l'ensemble des échantillons testés, on relève une épaisseur moyenne de l'ordre de 6 mm avec un coefficient de variation de l'ordre de 10%. La masse surfacique moyenne est de 600 g/m² et la densité de 100 kg/m³ avec des coefficients de variation compris entre 15 et 20%. La perméabilité à l'air est de l'ordre de 700 l/m²/s et le coefficient de conductivité thermique de l'ordre de 0,02 W/m.K. Ces résultats nous montrent que les produits testés sont relativement lourds et denses. Ils sont également très perméables à l'air et présentent une bonne capacité d'isolation thermique. Les fortes dispersions observées peuvent s'expliquer par l'irrégularité originelle du non-tissé 3D mono couche de base.

Tableau 17. Caractéristiques physiques des échantillons testés

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	M (g/m ²)	Densité (kg/m ³)	Perméabilité à l'air (l/m ² /s)	K (W/m.K)
NT1	31	5,85	399	68	433,90	0,04
NT2	31	5,93	483	81	427,90	0,04
NT3	31	5,88	452	77	449,90	0,05
NT4	31	5,90	459	78	321,13	0,03
a1	15	6,19	519	84	452,87	0,00
a2	15	6,05	554	92	504,93	0,00
a3	15	6,36	644	101	407,53	0,02
a4	15	6,22	587	94	521,53	0,01
b1	15	5,45	519	95	719,00	0,01
b2	15	5,33	604	113	707,07	0,00
b3	15	5,55	677	122	581,20	0,02
b4	15	5,39	602	112	750,07	0,01
150_c1	10	6,22	581	93	270,90	0,04
150_c2	10	6,42	658	103	275,90	0,04
150_c3	6	6,33	652	103	253,50	0,04
150_c4	10	6,46	677	105	250,00	0,05
150_d1	10	6,69	719	108	182,00	0,02
150_d2	10	6,70	763	114	215,10	0,02
150_d3	6	6,63	829	125	176,00	0,02
150_d4	10	6,66	810	122	195,10	0,02
150_e1	6	7,27	680	93	182,67	0,02
150_e2	6	7,41	741	100	221,17	0,03
150_e3	6	7,35	714	97	235,00	0,03
150_e4	6	7,29	731	100	203,83	0,03
<i>Moyenne</i>	<i>14</i>	<i>6,31</i>	<i>627</i>	<i>99</i>	<i>372,43</i>	<i>0,02</i>
<i>CV%</i>	<i>60</i>	<i>9,74</i>	<i>18</i>	<i>15</i>	<i>49,04</i>	<i>59,77</i>
<i>Min</i>	<i>6</i>	<i>5,33</i>	<i>399</i>	<i>68</i>	<i>176,00</i>	<i>0,00</i>
<i>Max</i>	<i>31</i>	<i>7,41</i>	<i>829</i>	<i>125</i>	<i>750,07</i>	<i>0,05</i>

La Figure 69 et l'annexe VI.B.2 présentent les résultats des caractéristiques physiques. Ces résultats devront nous permettre de dégager des tendances de comportement entre les différents types de produits multicouches testés.

1. Masse surfacique

Les résultats obtenus confortent ce qui était attendu, c'est-à-dire que le contrecollage a pour effet d'augmenter la masse surfacique du produit final. Plus le nombre de couches de revêtement est important, plus le produit sera lourd. La masse du revêtement a également une influence sur la masse finale. A partir de là, on remarque que si on veut réduire la masse surfacique des produits complexes, on peut agir sur le choix des revêtements et pour un

revêtement donné, produire un non-tissé 3D le plus léger possible. Une combinaison associant directement le textile d'apparence sans revêtement intermédiaire permet aussi d'obtenir un produit présentant une masse surfacique plus légère.

De ces résultats, on peut conclure que l'objectif de légèreté du produit final ne pourra être atteint que si les non-tissés 3D mono couches présentent initialement une faible masse surfacique.

2. Epaisseur

Les résultats montrent que les produits de type b présentent les plus petites valeurs en termes d'épaisseur. Ceci peut s'expliquer par l'écrasement de la structure plissée du non-tissé 3D mono couche lors de l'opération de contrecollage. On peut donc conclure que la pression des tapis de contrecollage aura un impact sur l'épaisseur du produit final, ce qui est visualisé au niveau de la forme du pli qui se transforme en boucle par écrasement.

Tous les produits multicouches, à l'exception des produits de type b, sont plus épais que les non-tissés 3D mono couches. Les produits de types b et e sont respectivement les moins et les plus épais. On note des différences entre ces différents types de produits. Le nombre de couches de revêtement ainsi que le type de revêtement vont donner lieu à des produits d'épaisseurs différentes. Un choix judicieux du nombre de revêtement et du positionnement du textile d'apparence permettra de jouer sur ce paramètre d'épaisseur.

3. Perméabilité à l'air

Les résultats montrent que les produits de type b, composés de deux couches de revêtement en non-tissés thermoliés sont les plus perméables à l'air tandis que les produits de types d et e, composés chacun de trois couches de revêtement sont les moins perméables à l'air. De ces résultats, on peut conclure que le revêtement non-tissé thermolié va apporter une meilleure perméabilité à l'air au produit final. Ceci indique également que la sensation de confort en terme de ventilation sera meilleure avec ce type de revêtement. Le revêtement non-tissé aiguilleté permettra également d'obtenir une bonne perméabilité à l'air. Plus le nombre de couches de revêtement est important, moins le matériau est perméable. Ce résultat semble évident puisque l'on va obtenir une perméabilité équivalente, pour un complexe, influencé par le composant le moins perméable.

4. Conductivité thermique

Les résultats montrent que les produits de types a et b présentent les plus faibles coefficients de conductivité thermique. Ils ont donc une meilleure caractéristique d'isolation thermique comparativement aux autres produits testés. Les produits les moins isolants sont les non-tissés

3D mono couches et les produits de type c. On note également que les produits de types d et e ont une bonne capacité d'isolation thermique.

Au vu de ces résultats, on peut dire que la capacité d'isolation thermique du produit final sera meilleure avec des revêtements en non-tissés aiguilletés et thermoliés. Il en sera de même avec le nombre de couches de revêtement.

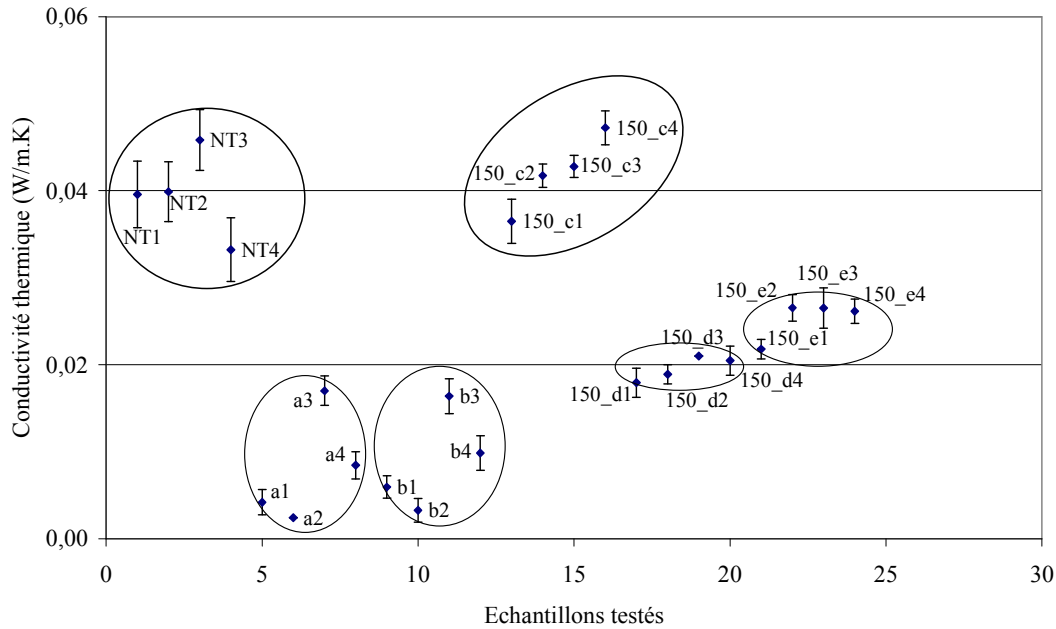


Figure 69. Conductivité thermique

5. Diagrammes radar

Le comportement des différents types de produits multicouches a été observé pour chacun des quatre non-tissés 3D mono couches. La Figure 70 présente le diagramme radar des produits dérivés du non-tissé 3D mono couche NT1.

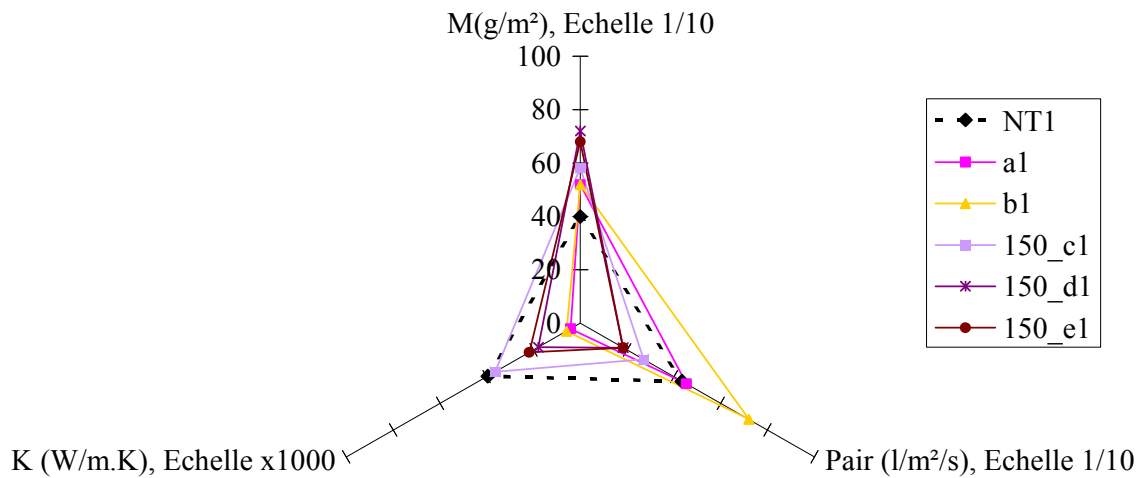


Figure 70. Diagrammes radar des caractéristiques physiques des produits dérivés du NT1

Les diagrammes radar montrent que, quel que soit le non-tissé 3D mono couche, seuls les produits de types d et e présentent le même comportement. Ces produits représentent chacun un assemblage de deux couches de non-tissés aiguilletés et d'une couche de tricot avec le non-tissé 3D mono couche. Dans le cas du produit d, les non-tissés sont en polyester et dans le cas du produit de type e, ils sont en polypropylène. Nous pouvons donc conclure au vu des diagrammes radar, que la nature du non-tissé n'a pas un effet dominant sur les caractéristiques étudiées de ces deux produits.

On observe des différences de comportement entre les produits de type a, b et c. Ceci peut s'expliquer par le type des couches de revêtement. On peut donc conclure que les étoffes de revêtement ont une influence nette sur les caractéristiques du produit final.

2.2.1.2. Propriétés de compression

Le Tableau 18 présente les valeurs moyennes des caractéristiques de compression étudiées. La mesure de chacune de ces caractéristiques a été réalisée sur au moins 6 échantillons. Sur l'ensemble des produits testés, on observe une compressibilité de l'ordre de 10% avec un coefficient de variation de près de 30%. L'énergie dissipée est de l'ordre de 30 N.m/m² et la résilience atteint une valeur de 70%. Pour ces deux caractéristiques, on observe des dispersions comprises entre 15 et 20%. Ces résultats nous permettent de dire que les produits testés sont peu compressibles aux contraintes appliquées et absorbent peu d'énergie. Ceci nous indique un toucher moins « soft ». A l'inverse, ils sont fortement résilients. On peut attribuer les fortes dispersions à l'irrégularité originelle du non-tissé 3D mono couche.

Tableau 18. Caractéristiques de compression

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	T _M (mm)	EMC (%)	WC (N.m/m ²)	RC (%)
NT1	31	5,85	5,20	11,10	23,77	87,17
NT2	31	5,93	5,11	13,62	29,03	87,33
NT3	31	5,88	5,15	12,40	26,87	83,25
NT4	31	5,90	5,06	14,22	29,80	85,89
a1	15	6,19	5,23	15,51	30,93	70,80
a2	15	6,05	5,14	15,03	31,71	71,08
a3	15	6,36	5,44	14,35	31,11	68,31
a4	15	6,22	5,24	15,69	32,68	70,94
b1	15	5,45	5,09	6,54	18,98	86,04
b2	15	5,33	5,01	5,96	20,54	88,13
b3	15	5,55	5,25	5,37	21,81	84,12
b4	15	5,39	5,04	6,39	20,32	88,81
150_c1	10	6,22	5,43	12,70	25,58	66,04
150_c2	10	6,42	5,58	13,10	25,32	65,22
150_c3	6	6,33	5,44	13,95	26,47	64,72
150_c4	10	6,46	5,55	13,86	24,19	66,88
150_d1	10	6,69	5,88	12,09	31,09	63,48
150_d2	10	6,70	5,76	13,94	27,98	65,87
150_d3	6	6,63	5,90	11,03	27,53	66,92
150_d4	10	6,66	5,91	11,25	26,92	66,75
150_e1	6	7,27	5,97	17,87	34,93	63,50
150_e2	6	7,41	5,95	19,66	33,37	65,84
150_e3	6	7,35	5,92	19,50	37,16	59,43
150_e4	6	7,29	5,91	18,88	33,50	63,22
<i>Moyenne</i>	<i>14</i>	<i>6,31</i>	<i>5,47</i>	<i>13,08</i>	<i>27,98</i>	<i>72,90</i>
<i>CV%</i>	<i>60</i>	<i>9,74</i>	<i>6,39</i>	<i>30,81</i>	<i>17,37</i>	<i>13,83</i>
<i>Min</i>	<i>6</i>	<i>5,33</i>	<i>5,01</i>	<i>5,37</i>	<i>18,98</i>	<i>59,43</i>
<i>Max</i>	<i>31</i>	<i>7,41</i>	<i>5,97</i>	<i>19,66</i>	<i>37,16</i>	<i>88,81</i>

La Figure 71 et l'annexe VI.B.3 présentent les résultats des caractéristiques mécaniques en compression. Comme dans le cas des propriétés physiques, ces résultats devront nous permettre de dégager des tendances de comportement entre les différents types de produits multicouches testés.

1. Epaisseur après compression

Les résultats montrent qu'après la sollicitation en compression, les non-tissés 3D mono couches, les produits de types a et b présentent une épaisseur identique. Il en est de même avec les produits de types d et e. Seuls les produits de types c présentent une épaisseur finale différente. Ceci semble normal car leur structure est moins bloquée du fait de la déformabilité du tricot T200 comparativement aux revêtements en non-tissés (NT145, NT40, NT44, NT90).

2. Compressibilité

Les résultats montrent que les produits de type b sont les moins compressibles tandis que ceux de type e présentent des taux de compressibilité plus élevés. Les non-tissés 3D, les produits de types a, c et d peuvent être classés ensemble. Au vu de ces résultats, on peut dire que les couches de revêtement en non-tissés thermoliés vont permettre d'obtenir un produit final moins compressible. On retrouve donc les propriétés attendues des revêtements utilisés ; faible compressibilité pour les revêtements thermoliés et meilleure compressibilité pour les revêtements aiguilletés. On remarque également que dans les conditions de tests utilisés (faibles sollicitations), seules les couches externes sont sollicitées. Compte tenu de la structure des revêtements utilisés, on observe que la compressibilité sera améliorée avec des revêtements en non-tissés aiguilletés.

Une série de test à des taux de compression plus importants serait intéressante à mener dans le futur afin de solliciter non seulement le revêtement mais le non-tissé 3D qui se trouve au milieu de la structure.

3. Energie de compression

Au niveau de l'énergie dissipée, on retrouve les mêmes observations que celles faites dans le cas de la compressibilité. Ceci nous permet de conclure que le contrecollage avec les non-tissés thermoliés va générer des produits présentant un toucher moins « soft ». Pour obtenir un meilleur confort en terme de toucher « soft », il faudra privilégier les revêtements en non-tissé aiguilleté.

4. Résilience de compression

Les résultats montrent que les non-tissés 3D mono couches sont plus résilients que les produits contrecollés. On observe que les produits de type b présentent un caractère résilient proche des non-tissés 3D mono couches. Les produits de type a sont plus résilients que ceux de types c, d et e.

Au vu de ces résultats, on peut conclure que le contrecollage aura pour effet de diminuer le caractère résilient des non-tissés 3D. Un produit contrecollé avec des revêtements en non-tissé aiguilleté sera moins résilient que celui contrecollé avec des revêtements en non-tissés thermoliés. Cette résilience sera d'autant plus faible que le nombre de couches de revêtements sera important.

Tous ces résultats sont cohérents avec ce que nous avons déjà constaté sur les autres paramètres mesurés au cours de notre étude.

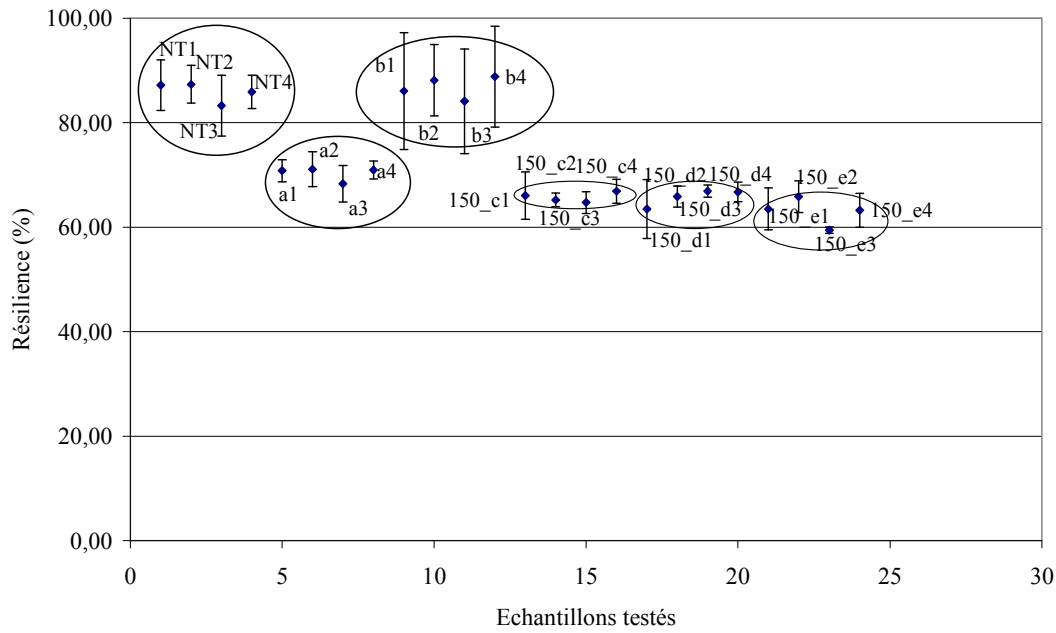


Figure 71. Résilience de compression

5. Diagrammes radar

Comme dans le cas de la caractérisation physique, le comportement global des différents produits multicouches a été observé pour chacun des non-tissés 3D mono couches. La Figure 72 présente le diagramme radar des caractéristiques de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT1.

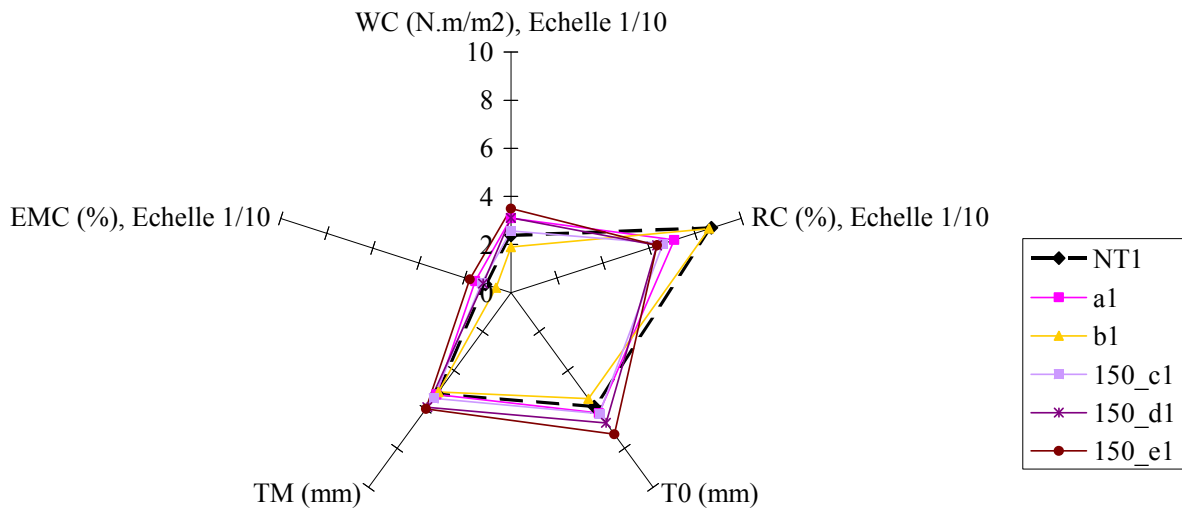


Figure 72. Diagrammes radar des caractéristiques de compression

Quel que soit le non-tissé 3D mono couche, on observe que le produit de type b est aussi résilient que le non-tissé 3D. Dans l'ensemble, on peut dire que tous les produits multicouches ne présentent pas le même comportement en compression.

6. Courbes de compression

La Figure 73 présente les courbes de compression relevées lors des essais. Les résultats montrent que la pression maximale relevée est pratiquement deux fois moins importante que celle relevée dans les conditions standards d'essais. En effet, ceci s'explique par l'augmentation de la surface de pression. On observe que les produits de types d et e, dérivés des non-tissés 3D NT1, NT2 et NT3, semblent présenter le même comportement. Ceci voudrait dire que l'assemblage de deux revêtements en non-tissés aiguilleté et d'un tricot donne lieu à un comportement identique quelle que soit la nature du non-tissé utilisée, à savoir polyester ou polypropylène. On observe également que les produits de types a et c, dérivés du non-tissé 3D NT3, semblent présenter le même comportement.

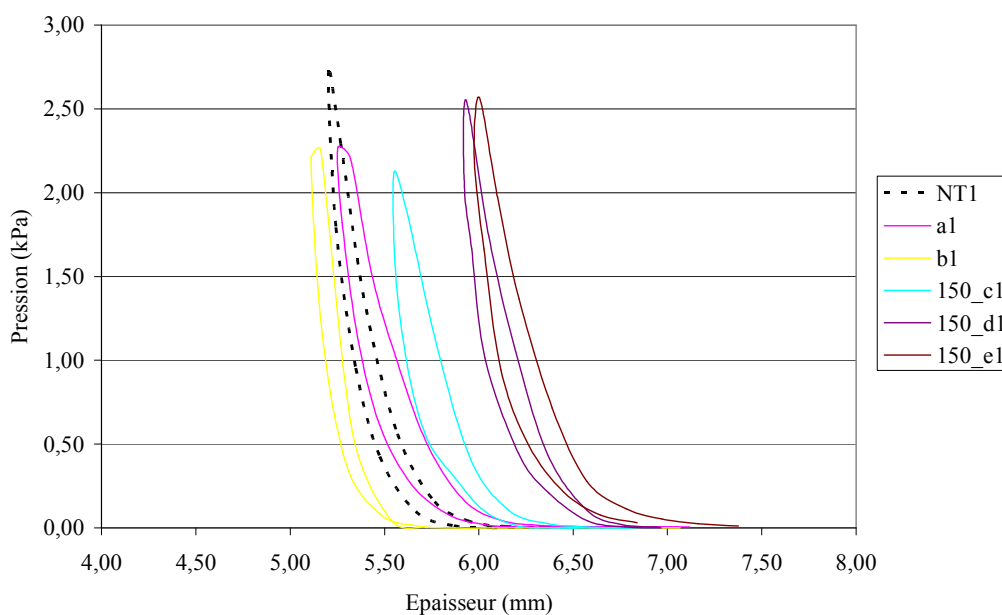


Figure 73. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT1

2.2.1.3. Conclusions

Les résultats de cette étude ont montré que le nombre de couches de contrecollage a un impact sur les caractéristiques de masse surfacique, d'épaisseur et de perméabilité à l'air. Plus il y aura de couches, plus le produit complexe sera lourd, épais et moins il sera perméable à l'air. Il faudra donc minimiser le nombre de couches de revêtements en vue d'obtenir un produit léger présentant de bonne sensation de confort liée à la perméabilité à l'air, à l'isolation thermique et au toucher « soft ».

Nous avons également observé que les revêtements en non-tissés thermoliés génèrent un produit final perméable à l'air, isolant thermiquement et aussi résilient que le non-tissé 3D mono couche. Cependant, ce type de produit est très peu compressible et dissipe peu d'énergie, ce qui lui donne un toucher moins « soft » traduisant une moins bonne sensation de

confort. Par contre, les revêtements en non-tissés aiguilletés procurent au produit final de bonne sensation de confort au vu des caractéristiques de perméabilité à l'air, d'isolation thermique et d'énergie dissipée en compression. L'utilisation de ce type de revêtement est donc à privilégier dans l'optique de remplacement des revêtements automobiles à base de mousses polyuréthane. Nous avons observé que l'usage de revêtements en non-tissé aiguilleté et tricot donnait des résultats satisfaisants en terme de confort précédemment décrit.

Sur l'ensemble des caractéristiques étudiées, des différences de comportement ont été observées entre les produits multicouches et les non-tissés 3D mono couches et également d'un produit multicouche à l'autre. Ceci traduit l'influence des types de couches de contrecollage sur le comportement global du produit final. Ce résultat est particulièrement intéressant car il montre que le choix des couches de contrecollage peut être réalisé en fonction de l'application finale du produit complexe. On pourra par exemple, pour des applications ne nécessitant que le caractère fortement résilient, utiliser des revêtements en non-tissés thermoliés. Les résultats ont également montré que le contrecollage diminue le comportement résilient des non-tissés 3D mono couches pour le domaine de sollicitations appliqué.

2.2.2. Analyse des résultats

L'analyse des résultats obtenus permettra de déterminer de façon plus approfondie les différences et les regroupements observés au niveau du comportement des produits multicouches testés. L'*annexe VI.B.4* présente les résultats des analyses statistiques de cette étude.

2.2.2.1. Comparaison des moyennes

La conformité des données par rapport à la loi normale a été vérifiée par le test de Kolmogorov-Smirnov, ce qui nous a permis de procéder au test de comparaison des moyennes. Le Tableau 19 présente la synthèse des différences non significatives observées entre les différents produits pour les caractéristiques étudiées. Les échantillons indiqués dans la même parenthèse ne présentent pas de différences significatives entre eux. Dans ce tableau, NT désigne le non-tissé 3D mono couche.

Quel que soit le non-tissé 3D, l'ensemble des résultats montre que tous les produits présentent des comportements différents en terme de conductivité thermique. Si on considère par exemple les produits dérivés du non-tissé 3D NT1, les résultats montrent que le non-tissé mono couche et le produit de type a ne présentent aucune différence significative en termes de masse surfacique, de perméabilité à l'air et d'épaisseur après compression.

Les résultats obtenus ne permettent pas de mettre en évidence des produits identiques au vu de l'ensemble des caractéristiques étudiées. Ceci nous amène à dire que tous les produits testés, bien qu'étant identiques pour certaines propriétés, ne présentent pas un comportement global similaire.

Tableau 19. Observation des différences non significatives entre les produits multicouches testés

	Dérivés de NT1	Dérivés de NT2	Dérivés de NT3	Dérivés de NT4
Masse surfacique	(NT, a)	(d, e)	(a, b, c) (b, e)	(a, b)
Épaisseur	(a, c)	(NT, a)	(a, c)	(c, d)
Perméabilité à l'air	(NT, a)	(d, e)	(NT, a) (c, e)	(d, e)
Conductivité thermique	-	-	-	-
Épaisseur après compression	(NT, a) (d, e)	(NT, a) (a, b)	(a, c) (d, e)	(NT, b) (d, e)
Compressibilité	(NT, c, d)	(NT, a, d) (NT, c, d)	(NT, c) (NT, d) (a, c)	(NT, c)
Énergie dissipée	(d, e)	-	(c, d)	(a, e)
Résilience	(c, d) (d, e)	(NT, b) (c, d, e)	-	(c, d)

2.2.2.2. Corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

Au niveau du cercle de corrélation (cf. *annexe VI.B.4.2*), les composantes principales A1 et A2 représentent 82% de l'information traitée dont 65% sur l'axe A1. Seule la variable *épaisseur* est située sur le cercle. Les résultats montrent une forte corrélation positive entre l'énergie dissipée et la compressibilité. Il en est de même entre la compressibilité et l'épaisseur. On observe également une corrélation négative entre l'épaisseur et la résilience ainsi qu'entre l'épaisseur et la perméabilité à l'air.

Au niveau de la carte des produits testés (Figure 74), on observe, quel que soit le non-tissé 3D de base, des regroupements homogènes en fonction de la structure du produit. Ainsi, les non-tissés 3D mono couches peuvent être regroupés entre eux, de même pour les autres types de produits multicouches. Ces résultats nous permettent de conclure en l'effet dominant des couches de revêtements sur le comportement du produit final.

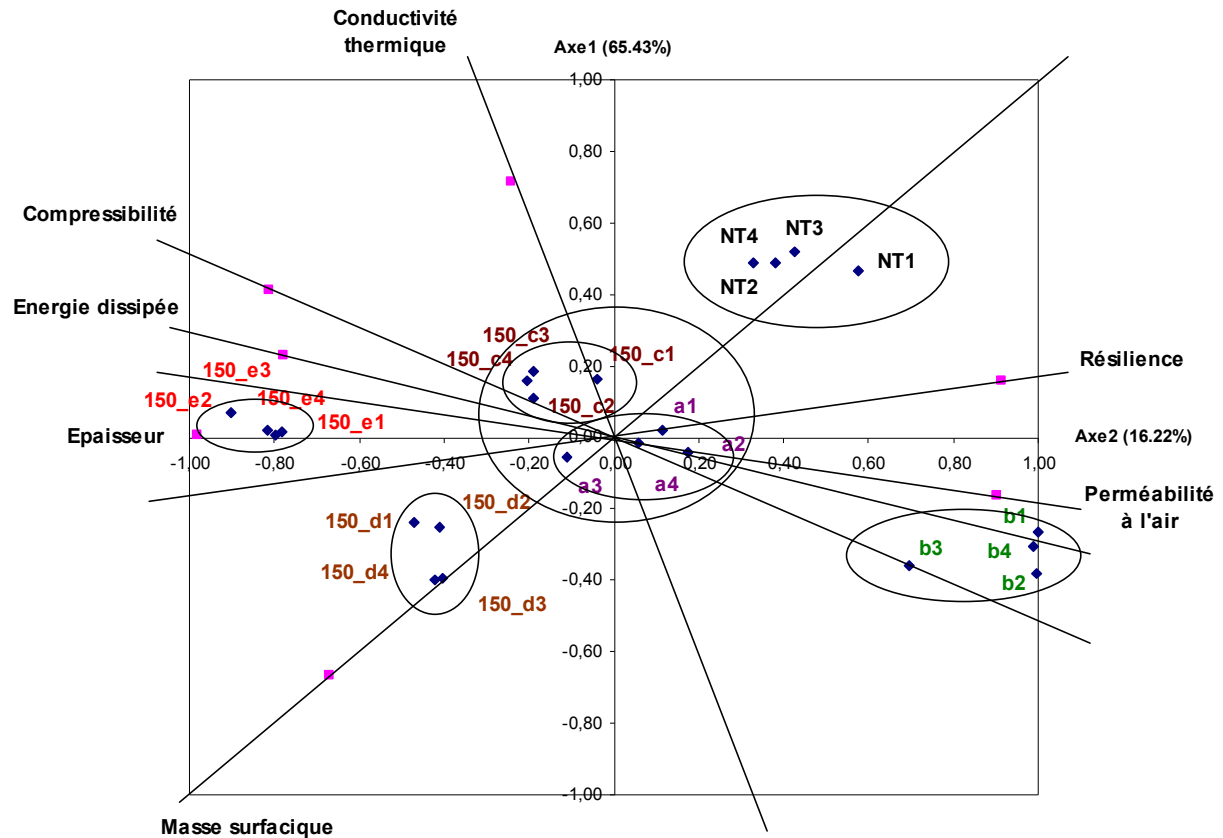


Figure 74. Carte des produits testés

2.2.2.3. Conclusions

Cette étude a permis de mettre en évidence l'impact des types de couches de revêtements sur le produit multicouche final. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence du nombre de couches de revêtements sur la masse surfacique et l'épaisseur du produit final. Nous avons également mis en évidence l'influence du type de revêtement sur les caractéristiques liées au confort telles que la perméabilité à l'air, l'isolation thermique, l'énergie dissipée. L'analyse des résultats nous a permis de conclure que les différents produits multicouches issus d'un non-tissé 3D donné étaient différents au regard des caractéristiques étudiées. Ceci nous permet donc de dire que le choix du type de revêtement, pour un même non-tissé 3D, permettra d'ajuster les propriétés finales du complexe en fonction du cahier des charges du produit à développer. En l'occurrence, nous avons observé que des revêtements en non-tissé aiguilleté avaient pour effet d'améliorer la sensation de confort en termes d'isolation thermique, de perméabilité et d'énergie absorbée donc de confort au toucher (toucher « soft »).

2.3. Influence de la température de contrecollage

L'objectif de cette étude est de déterminer si la température du four lors du procédé de contrecollage a un impact sur les caractéristiques des produits multicouches obtenus. Pour cette étude, nous avons considéré les trois types de produits c, d et e. Pour chaque type, nous avons réalisé des produits multicouches à des températures de contrecollage de 130°C, 140°C et 150°C. Ces produits ont été réalisés à partir des non-tissés 3D mono couches NT1, NT2, NT3 et NT4. Dans cette étude, nous avons comparé pour un type et un non-tissé 3D donné, les caractéristiques des produits obtenus. Le Tableau 20 présente les douze groupes de produits présentés dans cette étude.

Les résultats bruts seront présentés et ensuite analysés au travers de la comparaison des moyennes et de l'analyse en composantes principales. Ces deux analyses statistiques permettront de valider les observations obtenues sur la base des résultats bruts.

Tableau 20. Produits étudiés dans l'étude de l'influence de la température de contrecollage

	Type c NT145 / NT / T200	Type d NT145 / NT / NT145 / T200	Type e NT90 / NT / NT90 / T200
Dérivés de NT1	130_c1	130_d1	130_e1
	140_c1	140_d1	140_e1
	150_c1	150_d1	150_e1
Dérivés de NT2	130_d2	130_d2	130_e2
	140_d2	140_d2	140_e2
	150_d2	150_d2	150_e2
Dérivés de NT3	130_d3	130_d3	130_e3
	140_d3	140_d3	140_e3
	150_d3	150_d3	150_e3
Dérivés de NT4	130_d4	130_d4	130_e4
	140_d4	140_d4	140_e4
	150_d4	150_d4	150_e4

* Les produits de types c, d et e sont ceux présentés au paragraphe 1.2.2.

2.3.1. Résultats de caractérisation

La caractérisation a porté sur l'évaluation des paramètres de masse surfacique, de perméabilité à l'air, de conductivité thermique, d'épaisseur, de compressibilité, d'énergie dissipée et de résilience en compression. L'*annexe VI.C.1* présente les tableaux de valeurs de ces résultats de caractérisations. La comparaison des moyennes ainsi que la carte des produits ont été utilisées pour déterminer si les produits de chacun des douze groupes testés présentent le même comportement.

Comme dans l'étude précédente, les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des échantillons testés ont été évaluées à partir des méthodes d'essais utilisées au chapitre 4.3. La perméabilité à l'air a été déterminée sous une pression de 98 Pa tandis que le coefficient de conductivité thermique a été déterminé à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Les échantillons testés sont de dimensions 10 cm x 10 cm.

2.3.1.1. Propriétés physiques

Le Tableau 21 présente les valeurs moyennes des caractéristiques physiques étudiées. Les mesures ont été réalisées sur, au moins, 6 échantillons. Sur l'ensemble des produits testés, on relève une épaisseur de l'ordre de 7 mm avec un coefficient de variation inférieur à 10%. La masse surfacique est de l'ordre de 700 g/m^2 pour une densité moyenne de 100 kg/m^3 . Les dispersions des résultats sont de l'ordre de 10%. On a donc affaire à des produits lourds. La perméabilité à l'air est de l'ordre de $200 \text{ l/m}^2/\text{s}$ avec un coefficient de variation proche de 20%. Le coefficient de conductivité thermique est assez faible, de l'ordre de $0,03 \text{ W/m.K}$ avec une dispersion de l'ordre de 30%. Au vu de ces valeurs, on peut dire que les produits de types c, d et e sont peu perméables à l'air et fortement isolant thermiquement. Les valeurs élevées de dispersions sont induites par l'irrégularité du non-tissé 3D mono couche, qui est à l'origine, fortement dispersé.

Les différentes caractéristiques physiques ont été étudiées pour chacun des types de produits c, d et e. L'*annexe VI.C.2* présente les résultats des caractéristiques physiques obtenus.

Tableau 21. Valeurs des caractéristiques physiques

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	M (g/m ²)	Densité (kg/m ³)	Perméabilité à l'air (l/m ² /s)	K (W/m.K)
130_c1	8	6,48	568	88	221,13	0,02
130_c2	11	6,49	651	100	253,67	0,02
130_c3	12	6,54	677	104	219,08	0,03
130_c4	12	6,41	660	103	232,25	0,03
140_c1	8	6,26	563	90	223,00	0,03
140_c2	12	6,44	680	106	286,67	0,03
140_c3	9	6,55	721	110	252,22	0,03
140_c4	12	6,72	661	98	239,42	0,04
150_c1	10	6,22	581	93	270,90	0,04
150_c2	10	6,42	658	103	275,90	0,04
150_c3	6	6,33	652	103	253,50	0,04
150_c4	10	6,46	677	105	250,00	0,05
130_d1	10	6,76	721	107	180,10	0,03
130_d2	12	6,73	800	119	166,42	0,03
130_d3	11	7,07	831	118	150,17	0,03
130_d4	9	6,96	767	110	183,18	0,03
140_d1	8	6,69	699	104	165,55	0,01
140_d2	12	6,65	786	118	206,67	0,02
140_d3	10	6,88	842	122	165,45	0,02
140_d4	10	6,70	795	119	206,50	0,02
150_d1	10	6,69	719	108	182,00	0,02
150_d2	10	6,70	763	114	215,10	0,02
150_d3	6	6,63	829	125	176,00	0,02
150_d4	10	6,66	810	122	195,10	0,02
130_e1	6	7,33	687	94	175,33	0,02
130_e2	6	7,58	786	104	187,00	0,02
130_e3	6	7,19	716	100	175,17	0,02
130_e4	6	7,28	644	88	256,17	0,02
140_e1	6	7,02	638	91	159,67	0,02
140_e2	6	7,40	739	100	182,50	0,02
140_e3	6	7,24	705	97	208,67	0,02
140_e4	6	7,39	720	98	216,17	0,02
150_e1	6	7,27	680	93	182,67	0,02
150_e2	6	7,41	741	100	221,17	0,03
150_e3	6	7,35	714	97	235,00	0,03
150_e4	6	7,29	731	100	203,83	0,03
<i>Moyenne</i>	9	6,84	711	104	210,37	0,03
<i>CV%</i>	27	5,67	10	10	17,24	30,73
<i>Min</i>	6	6,22	563	88	150,17	0,01
<i>Max</i>	12	7,58	842	125	286,67	0,05

1. Produits de type c

La Figure 75 et l'annexe VI.C.2.1.1 présentent les graphiques des caractéristiques physiques. Les résultats montrent que, quel que soit le non-tissé 3D mono couche, on observe la même évolution de la conductivité thermique en fonction de la température de contrecollage. Plus cette dernière est élevée (150°C), moins le produit est isolant. A l'inverse, plus la température de contrecollage est faible (130°C), plus le produit est isolant thermiquement. Ce résultat laisse supposer que la température aura un effet significatif sur la propriété d'isolation thermique du produit multicouche en modifiant les caractéristiques du polymère composant le non-tissé 3D. On observe que la masse surfacique et la perméabilité à l'air sont très peu influencées par la température de contrecollage. L'épaisseur diminue avec la température de contrecollage dans le cas des produits dérivés des non-tissés 3D mono couches NT3 et NT4.

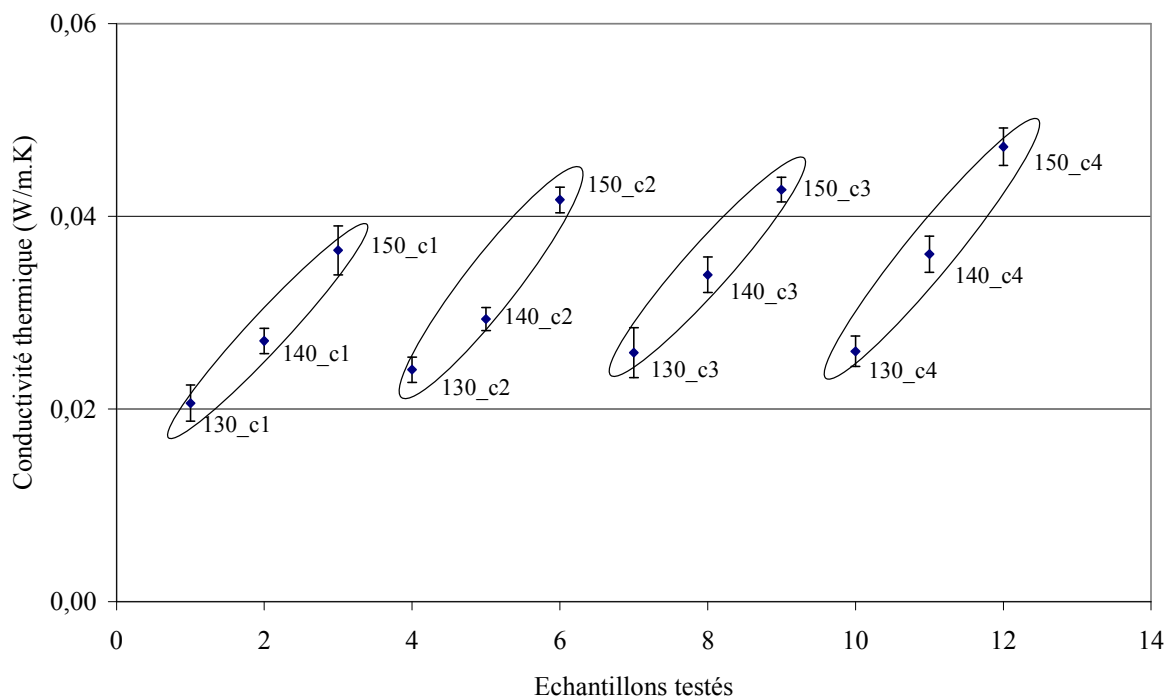


Figure 75. Conductivité thermique des produits de type c

Les diagrammes radar de ces caractéristiques (Figure 76 et en annexe VI.C.2.2.1) montrent que, quel que soit le non-tissé 3D mono couche de base, la propriété d'isolation thermique varie avec la température de contrecollage. Au niveau de la masse surfacique, on n'observe aucune influence de la température de contrecollage au regard de tous les produits à l'exception du produit c3. Au niveau de la perméabilité à l'air, on n'observe aucune influence de la température dans le cas des produits c2 et c4. Les différences observées entre les différents produits peuvent s'expliquer par le fait que les quatre non-tissés 3D mono couches ne présentent pas le même comportement global (cf. 2.1).

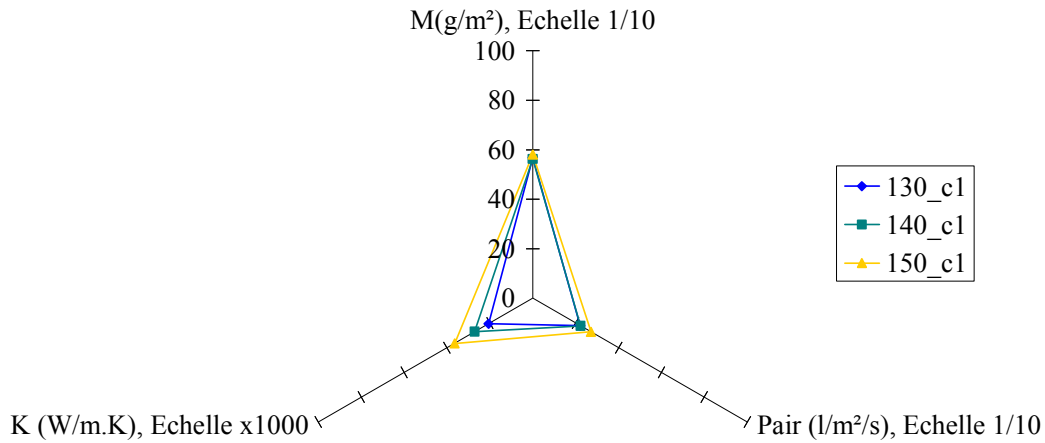


Figure 76. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT1

2. Produits de type d

Les résultats (Figure 77 et *annexe VI.C.2.1.2*) montrent que, quel que soit le non-tissé 3D mono couche, les produits de type d contrecollés à une température de 130°C présentent la moins bonne isolation thermique. Le contrecollage à 140°C donne les produits les plus isolants thermiquement. La masse surfacique et la perméabilité à l'air sont très peu influencées par la température de contrecollage. L'épaisseur diminue avec la température de contrecollage dans le cas des produits dérivés des non-tissés 3D mono couches NT3 et NT4.

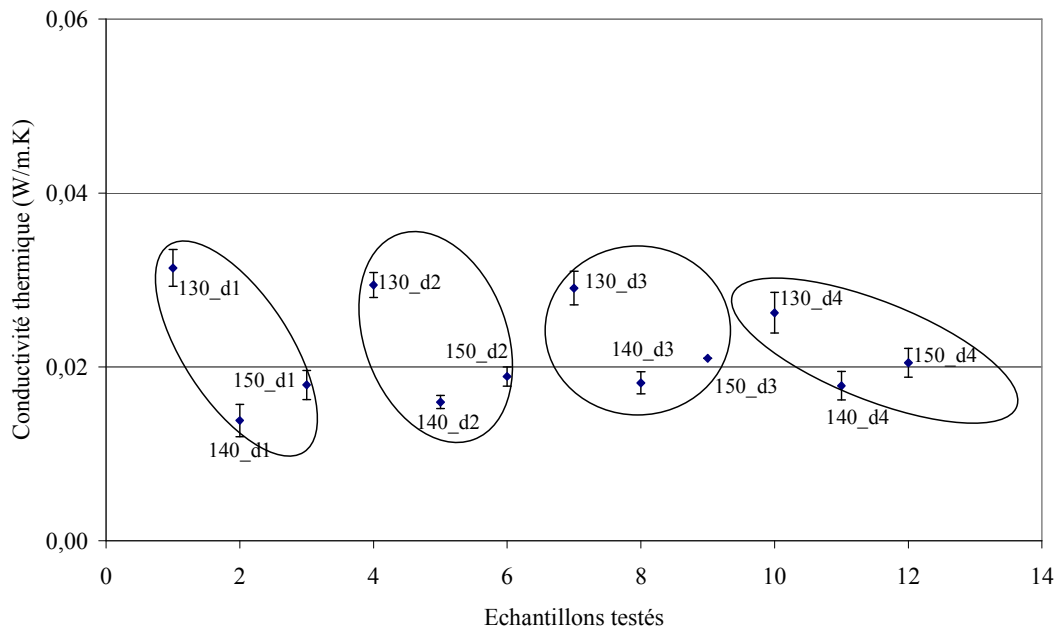


Figure 77. Caractéristiques physiques des produits de type d

Les diagrammes radar présentés à la Figure 78 et en *annexe VI.C.2.2.2* permettent également de conclure à l'influence de la température sur la propriété d'isolation thermique. La

perméabilité à l'air et la masse surfacique semblent ne pas être influencées par la température de contrecollage dans le cas des produits d1, d3 et d4.

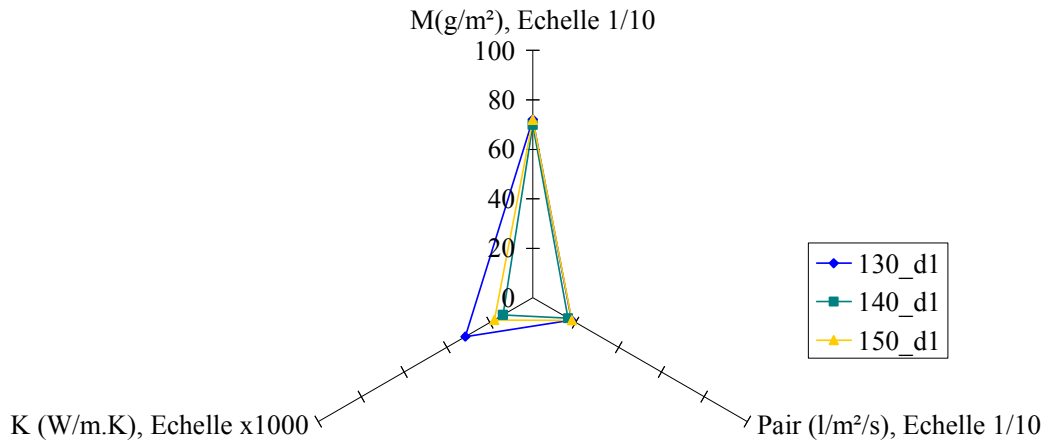


Figure 78. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT1

3. Produits de type e

Les résultats (Figure 79 et *annexe VI.C.2.1.3*) montrent que, la propriété d'isolation thermique est identique aux températures de contrecollage de 130 et 140°C. Les produits contrecollés à 150°C présentent de moins bonne capacité d'isolation thermique. Les résultats laissent supposer que la température de contrecollage n'ait pas d'impact majeur sur la perméabilité à l'air, la masse surfacique et l'épaisseur du produit.

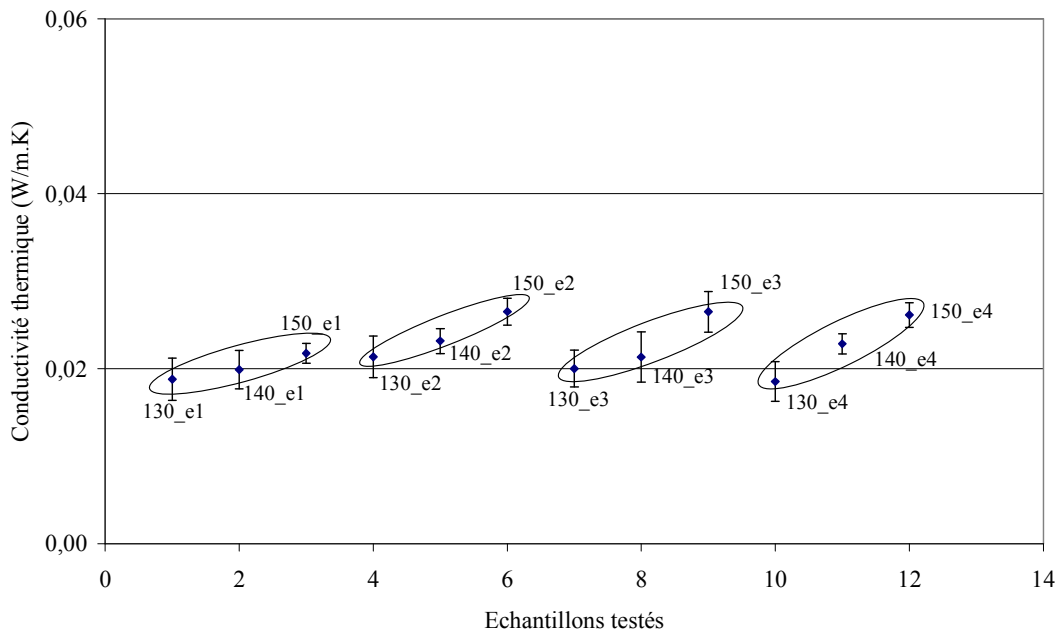


Figure 79. Caractéristiques physiques des produits de type e

Les diagrammes radar présentés à la Figure 80 et en *annexe VI.C.2.2.3* permettent de conclure que la température n'a pas d'impact sur les caractéristiques physiques étudiées dans le cas du produit e1. Dans le cas des autres produits, on peut dire que les différences sont sensiblement faibles.

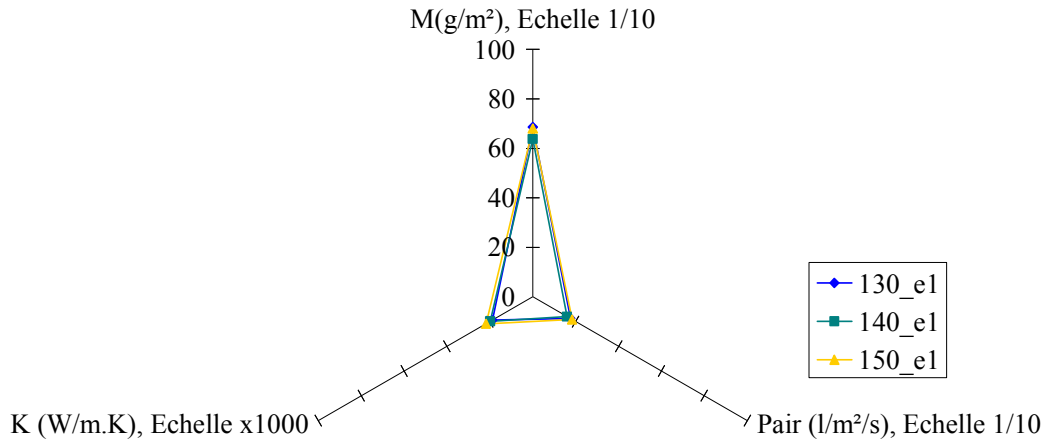


Figure 80. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT1

Les résultats précédents ont permis de dégager nettement l'influence de la température de contrecolleage sur la propriété d'isolation thermique dans le cas des produits c et d. Cette observation est moins marquée avec les produits de type e.

2.3.1.2. Propriétés de compression

Le Tableau 22 présente les valeurs des caractéristiques de compression. Les mesures ont été réalisées sur, au moins, 6 échantillons. Les résultats montrent que sur l'ensemble des produits testés, on relève un taux de compressibilité de l'ordre de 14% avec un coefficient de variation de 20%. Les échantillons testés présentent un caractère fortement résilient pour des valeurs de résilience moyenne de 65% avec des dispersions inférieures à 5%. L'énergie absorbée est en moyenne de 30 N.m/m² avec un coefficient de variation de l'ordre de 10%.

Comme dans le cas des propriétés physiques, les caractéristiques mécaniques en compression de chaque type de produits c, d et e vont être présentées. L'*annexe VI.C.3* présente les résultats des caractéristiques mécaniques en compression obtenus.

Tableau 22. Valeurs des caractéristiques en compression

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	T _M (mm)	EMC (%)	WC (N.m/m ²)	RC (%)
130_c1	8	6,48	5,79	10,63	25,74	64,87
130_c2	11	6,49	5,87	9,59	22,69	65,10
130_c3	12	6,54	5,83	10,83	25,24	65,68
130_c4	12	6,41	5,73	10,54	23,90	64,08
140_c1	8	6,26	5,53	11,64	22,82	65,61
140_c2	12	6,44	5,67	11,85	26,56	66,30
140_c3	9	6,55	5,85	10,67	25,86	63,72
140_c4	12	6,72	5,66	15,61	27,30	62,32
150_c1	10	6,22	5,43	12,70	25,58	66,04
150_c2	10	6,42	5,58	13,10	25,32	65,22
150_c3	6	6,33	5,44	13,95	26,47	64,72
150_c4	10	6,46	5,55	13,86	24,19	66,88
130_d1	10	6,76	6,04	10,65	27,80	64,57
130_d2	12	6,73	6,07	9,72	27,24	62,99
130_d3	11	7,07	6,25	11,65	26,84	64,33
130_d4	9	6,96	6,18	11,14	25,56	68,22
140_d1	8	6,69	5,86	12,36	27,22	66,23
140_d2	12	6,65	5,96	10,43	27,38	67,11
140_d3	10	6,88	6,08	11,56	26,79	66,66
140_d4	10	6,70	6,00	10,36	26,56	65,69
150_d1	10	6,69	5,88	12,09	31,09	63,48
150_d2	10	6,70	5,76	13,94	27,98	65,87
150_d3	6	6,63	5,90	11,03	27,53	66,92
150_d4	10	6,66	5,91	11,25	26,92	66,75
130_e1	6	7,33	6,26	14,53	30,23	62,05
130_e2	6	7,58	6,38	15,84	33,44	61,75
130_e3	6	7,19	6,02	16,19	34,27	64,34
130_e4	6	7,28	6,08	16,45	34,83	56,11
140_e1	6	7,02	5,90	15,85	29,92	66,32
140_e2	6	7,40	6,05	18,24	30,76	67,20
140_e3	6	7,24	6,01	17,06	33,01	65,69
140_e4	6	7,39	6,06	17,96	33,72	64,45
150_e1	6	7,27	5,97	17,87	34,93	63,50
150_e2	6	7,41	5,95	19,66	33,37	65,84
150_e3	6	7,35	5,92	19,50	37,16	59,43
150_e4	6	7,29	5,91	18,88	33,50	63,22
<i>Moyenne</i>	9	6,84	5,90	13,59	28,60	64,70
<i>CV%</i>	27	5,67	3,77	22,70	13,38	3,61
<i>Min</i>	6	6,22	5,43	9,59	22,69	56,11
<i>Max</i>	12	7,58	6,38	19,66	37,16	68,22

Les résultats montrent que dans le cas des produits de type c, les produits testés présentent des comportements différents pour les températures de contrecollage utilisées. Dans le cas des produits de types d et e, l'influence de la température de contrecollage est peu marquée sur les propriétés de compression notamment au niveau de la résilience et de l'énergie dissipée. On observe, quel que soit le type de produits, que l'épaisseur après compression diminue avec la température de contrecollage. Une description plus fine du comportement des produits testés sera faite au travers de l'analyse des résultats.

2.3.2. Analyse des résultats

Selon le test de Kolmogorov-Smirnov, la conformité des données par rapport à la loi normale a été acceptée. Ceci nous permet donc d'effectuer la comparaison des moyennes des différentes caractéristiques étudiées.

L'analyse des résultats a été effectuée pour chaque type de produits, c d et e. L'*annexe VI.C.4* présente les résultats des analyses statistiques de cette étude.

2.3.2.1. Comparaison des moyennes

L'ensemble des résultats détaillés du test de comparaison des variances et des moyennes est présenté en *annexe VI.C.4.1*. Les tableaux 23 – 25 présentent, pour chacun des types de produits c, d et e, la synthèse des résultats du test de comparaison des moyennes. Les données indiquées dans la même parenthèse représentent les températures de contrecollage pour lesquelles aucune différence significative n'a été observée pour la caractéristique étudiée.

Dans le cas des produits de type c, les résultats montrent des différences significatives au niveau de la conductivité thermique et ce pour tous produits confondus. Ceci nous permet de confirmer l'influence de la température sur cette propriété physique. Si on considère par exemple les produits dérivés du non-tissé 3D NT3, on n'observe, quelle que soit la température de contrecollage, il n'existe pas de différence significative à un risque d'erreur de 5% au niveau de la résilience.

Tableau 23. Observation des différences non significatives entre les produits de type c

	Dérivés de NT1	Dérivés de NT2	Dérivés de NT3	Dérivés de NT4
Masse surfacique	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 140) (130, 150)	(130, 140, 150)
Epaisseur	-	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 150) (140, 150)
Perméabilité à l'air	(130, 140)	(130, 140, 150)	(140, 150)	(130, 140, 150)
Conductivité thermique	-	-	-	-
Epaisseur après compression	-	(140, 150)	(130, 140)	(130, 140) (140, 150)
Compressibilité	(130, 140) (140, 150)	(140, 150)	(130, 140)	-
Energie dissipée	-	(140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 150)
Résilience	(130, 140)	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 140)

Dans le cas des produits de type d, on retrouve la même observation énoncée précédemment au niveau de la conductivité thermique. Si on considère par exemple les produits dérivés du non-tissé NT 4, on n'observe, quelle que soit la température de contrecollage, aucune différence significative à un risque d'erreur de 5% au niveau de l'énergie dissipée.

Tableau 24. Observation des différences non significatives entre les produits de type d

	Dérivés de NT1	Dérivés de NT2	Dérivés de NT3	Dérivés de NT4
Masse surfacique	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)	(140, 150)
Epaisseur	(130, 150) (140, 150)	(130, 140) (140, 150)	-	(140, 150)
Perméabilité à l'air	(130, 140, 150)	(140, 150)	(130, 140) (140, 150)	(130, 140) (140, 150)
Conductivité thermique	-	-	-	-
Epaisseur après compression	(130, 140) (140, 150)	(130, 140)	-	(140, 150)
Compressibilité	-	(130, 140)	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)
Energie dissipée	(130, 150)	(140, 150)	(130, 150) (140, 150)	(130, 140, 150)
Résilience	(130, 140)	(140, 150)	(130, 150) (140, 150)	(140, 150)

Dans le cas des produits de type e, si on considère par exemple les produits dérivés du non-tissé 3D NT1, aucune différence significative n'est observée au niveau de la compressibilité et ce quelle que soit la température de contrecollage.

Tableau 25. Observations des différences non significatives entre les produits de type e

	Dérivés de NT1	Dérivés de NT2	Dérivés de NT3	Dérivés de NT4
Masse surfacique	(130, 150)	(130, 150) (140, 150)	(130, 140, 150)	(140, 150)
Epaisseur	(130, 140, 150)	(140, 150)	(130, 140, 150)	-
Perméabilité à l'air	(130, 140, 150)	(130, 140)	(130, 140) (140, 150)	(130, 140) (140, 150)
Conductivité thermique	(130, 140) (140, 150)	(130, 140)	(130, 140)	-
Epaisseur après compression	(140, 150)	(140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 140)
Compressibilité	(130, 140, 150)	(140, 150)	(130, 140) (140, 150)	(130, 140) (130, 150)
Energie dissipée	(130, 140)	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)	(130, 140, 150)
Résilience	(130, 140, 150)	(130, 150) (140, 150)	(130, 140)	(140, 150)

2.3.2.2. Cartes des produits de types c, d et e

L'annexe VI.C.4.2 présente l'ensemble des résultats de l'analyse en composantes principales. Les résultats représentant les produits de types c, d et e montrent que les axes principaux A1 et A2 représentent 74% de l'information traitée, ce qui n'est pas suffisant pour une bonne appréciation des données. Ces dernières ont alors été représentées suivant les axes principaux A1 et A3 représentant 57% de l'information. L'axe principal A1 représente près de 48% de l'information traitée.

Au niveau du cercle de corrélations, aucune variable n'est située sur le cercle. Seules les variables *épaisseur*, *compressibilité* et *énergie dissipée* sont situées à proximité du cercle. Une corrélation positive forte est observée entre ces trois variables.

Au niveau de la carte des produits (Figures 81 – 82), les résultats montrent qu'on peut distinctement regrouper les produits en fonction des types de revêtements utilisés. Ceci rejoint l'observation obtenue lors de l'étude précédente et nous montre bien l'effet dominant des couches de contrecollage sur le comportement global du produit multicouche.

Dans le cas des produits de type c, on peut regrouper les produits en fonction de la température de contrecollage. On peut donc conclure en l'influence de cette dernière sur le comportement du produit multicouche. On observe également que les produits contrecollés à 150°C sont les plus résilients, les plus compressibles, les plus perméables à l'air et les moins isolants thermiquement. A l'inverse, les produits contrecollés à 130°C sont les moins résilients, les moins compressibles, les moins perméables à l'air et les plus isolant thermiquement.

Dans le cas des produits de types d et e, on observe que l'influence de la température de contrecollage est peu dominante sur les caractéristiques physiques et mécaniques en compression étudiées. On peut en conclure que dans la plage de température de contrecollage comprise entre 130°C et 150°C, ces caractéristiques du produit multicouche sont peu sensibles à la variation de température.

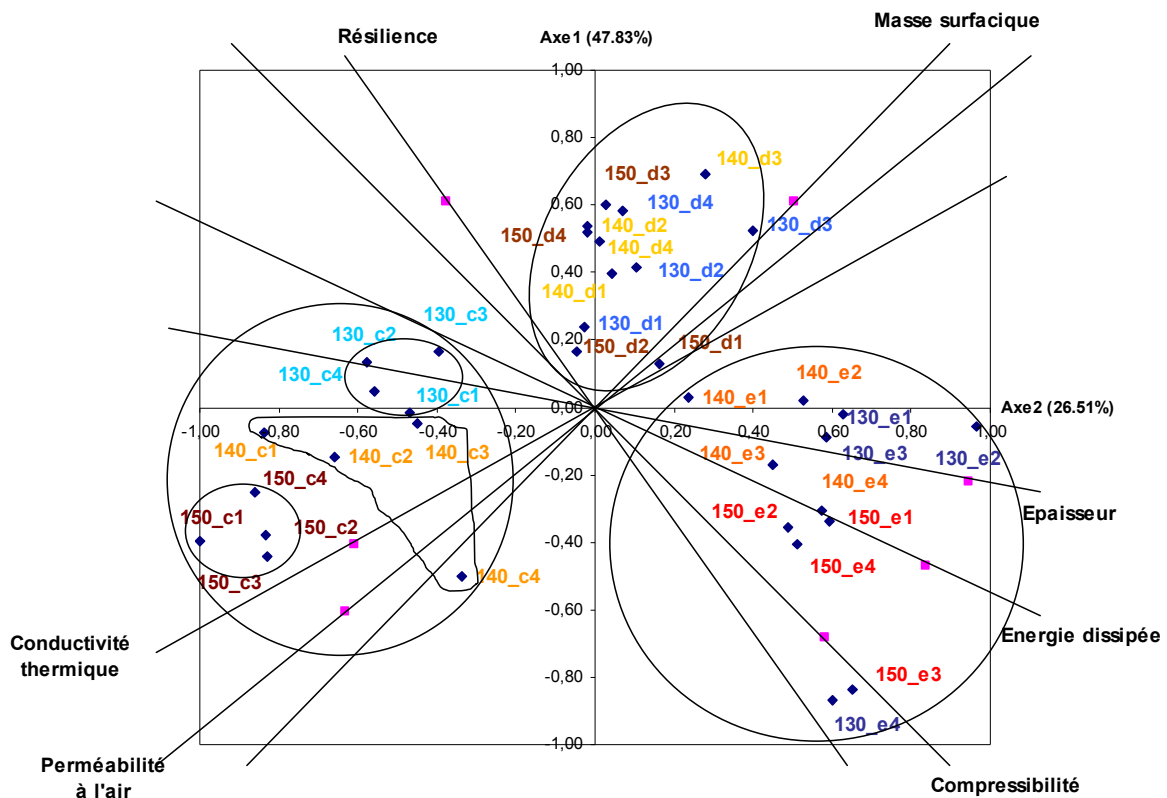


Figure 81. Carte des produits de types c, d et e suivant les axes A1A2

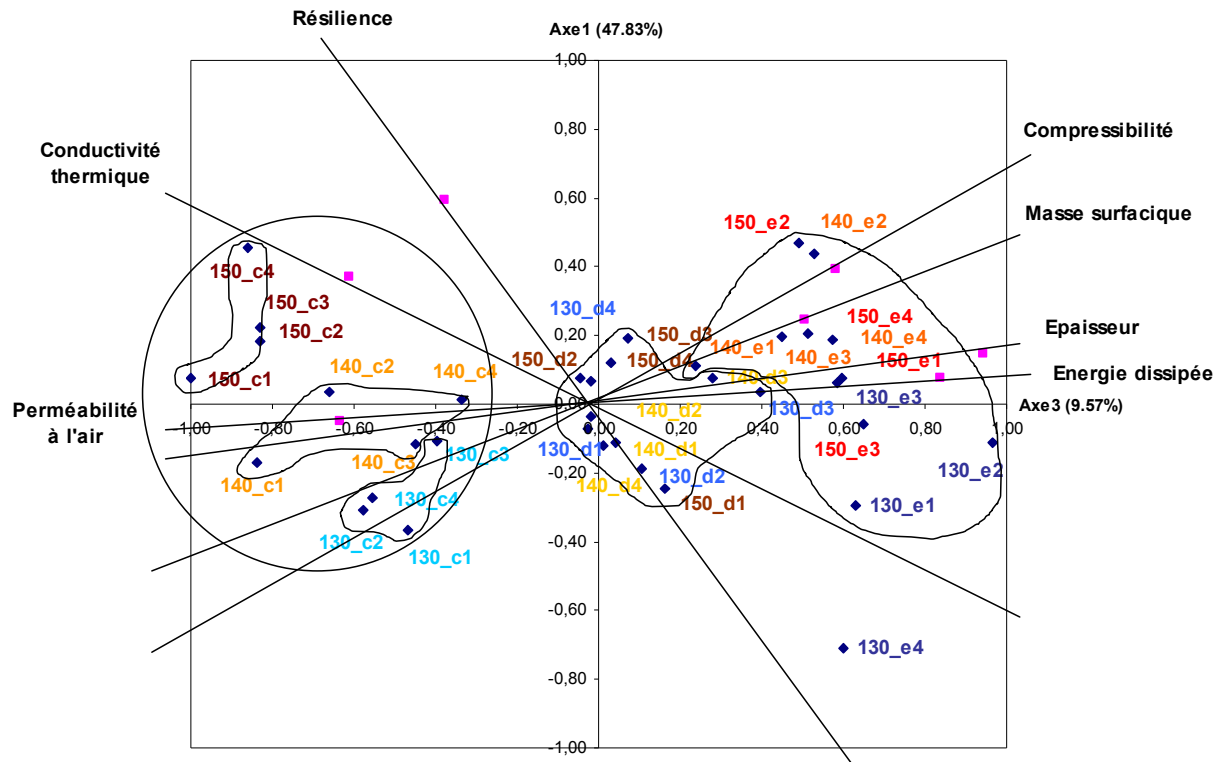


Figure 82. Carte des produits de types c, d et e suivant les axes A1A3

2.3.2.3. Conclusions

L'analyse des résultats a permis de confirmer un certain nombre d'hypothèses émises lors de la présentation des résultats. Elle a surtout permis de confirmer l'influence de la température de contrecollage dans le cas où le produit multicouche est composé de deux couches de revêtements en non-tissé aiguilleté et en tricot. Concernant les autres types de produits multicouches d et e, on observe une influence peu dominante de la température de contrecollage sur les caractéristiques physiques et mécaniques en compression étudiées.

2.4. Conclusion sur l'étude des produits VERTILAP®

L'étude des non-tissés 3D obtenus lors de cette troisième campagne a montré que ces derniers présentent de meilleures caractéristiques de résilience ainsi que géométriques par rapport à ceux de la campagne N° 2. De plus, les dispersions des résultats ont été réduites du fait de l'amélioration du défilage des câbles d'alimentation. Les résultats obtenus nous permettent donc de valider les modifications apportées au prototype expérimental. L'analyse des résultats a permis de déterminer les corrélations existantes entre les caractéristiques des produits et les paramètres de fabrication. Ces résultats ont permis de mettre en évidence l'impact des vitesses d'entrée et de sortie de plissage sur les caractéristiques géométriques et de compression du non-tissé 3D.

Une étude complémentaire a permis de montrer l'influence des types de couches de contrecollage ainsi que le nombre de couches sur le comportement global du produit final. Nous avons ainsi pu observer que l'usage de revêtements en non-tissé aiguilleté augmentait le confort du produit final en termes d'isolation thermique, de perméabilité à l'air et de toucher « soft » (lié à l'énergie absorbée pendant la compression).

Nous avons également montré que dans le cas d'un produit multicouche dont les deux couches de revêtement sont en non-tissé aiguilleté et tricot, on observe une influence de la température de la température de contrecollage sur le comportement global du matériau. Cette influence est moins marquée lorsqu'on augmente le nombre de couches de revêtement.

3. Recommandations pour l'amélioration du prototype expérimental

3.1. Préparation de la matière

Suite à cette troisième campagne d'essais, il a été décidé de réaliser un dispositif qui va permettre de séparer le câble à « droit filament » permettant d'obtenir des câbles d'alimentation plus réguliers en titre. Le schéma descriptif de ce dispositif est illustré par la Figure 83. Le principe consiste à mettre la nappe filamentaire sous tension sur une longueur d'environ 1m. La tension exercée est en réalité une prétension qui aura pour rôle de faciliter la division du câble. Dans le dispositif développé, le câble sera tendu entre deux extrémités par des pinces de serrage. Un système constitué de lames coupantes devra permettre de diviser la nappe initiale en plusieurs nappes de largeurs plus faibles.

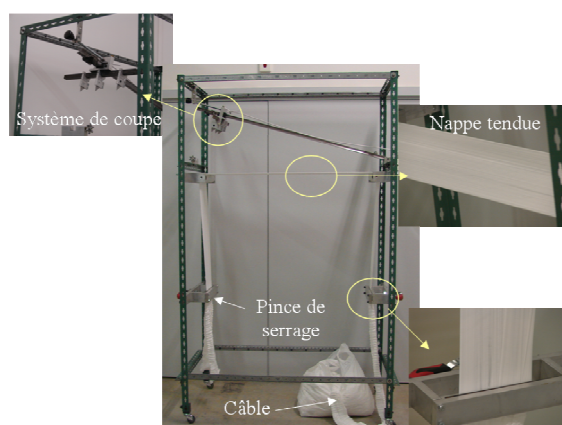


Figure 83. Dispositif de séparation du câble

3.2. Prototype expérimental

Une solution pour optimiser le flux thermique dans la zone de condensation consiste à appliquer l'air chaud sur une grande surface dans la première partie de la condensation et

d'appliquer de l'air frais dans la seconde partie (Figure 84). Ceci aura pour effet d'améliorer la fixation et la consolidation de la structure plissée. Pour ce faire, la partie inférieure de la première partie de la zone de condensation a été ouverte de manière à obtenir un chauffage par convection sur une surface de matière plus importante. L'introduction d'un tube perforé dans la seconde partie permettra d'appliquer de l'air frais pour refroidir la matière. La pression d'air pourra être réglée à l'aide d'un manomètre situé en entrée du tube.

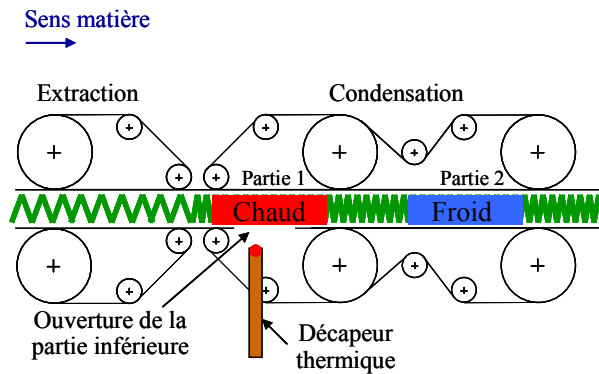


Figure 84. Optimisation du flux thermique dans la zone de condensation

La campagne d'essais N° 4 permettra de mettre en œuvre les recommandations et les modifications proposées ci-dessus.

4. Conclusions

Cette troisième campagne d'essais nous a permis, à partir du retour d'expérience de la campagne d'essai N° 2, de mieux maîtriser le prototype expérimental. En effet, les résultats de caractérisations des non-tissés 3D obtenus ont validé les améliorations apportées au niveau de la machine. Les non-tissés 3D présentaient de meilleures qualités en terme de régularité de compactage des plis. L'amélioration de la qualité des non-tissés 3D nous a alors permis de réaliser des produits multicouches suivants différentes combinaisons avec des couches de revêtements en non-tissé aiguilleté, non-tissé thermolié et tricot. Les résultats de caractérisations de ces produits multicouches ont permis montrer que, bien que ces derniers présentent des masses surfaciques importantes, ils sont particulièrement intéressants en termes de caractéristiques liées au confort. A ce stade, les non-tissés 3D montrent des caractéristiques satisfaisantes et peuvent dès lors être comparés à des produits mousses polyuréthane qu'ils doivent remplacer.

Le retour d'information au niveau de la caractérisation continue de nous guider dans notre démarche d'amélioration du prototype expérimental. A cet effet, un certain nombre de recommandations ont été émises comme lors des précédentes campagnes d'essais. Ces

recommandations, appliquées au prototype expérimental, devront permettre d'obtenir des produits légers. Ceci nous permettra alors de réaliser des garnissages de pièces automobiles afin de pouvoir répondre entièrement à la question du remplacement des mousses polyuréthane par ces non-tissés 3D.

CHAPITRE 4.5

ETUDE COMPARATIVE

NON-TISSES 3D VERTILAP[®] vs. MOUSSES PU

1. Introduction

Suite aux trois campagnes d'essais précédentes et aux différentes améliorations apportées au prototype comme à la procédure de préparation de la matière d'alimentation, nous avons réussi à obtenir des non-tissés présentant des caractéristiques satisfaisantes.

Une étude de comparaison entre les mousses, les complexes automobiles et les produits VERTILAP® a pu être menée en se référant aux mousses PU utilisées dans les applications d'habillage intérieur automobile. L'étude a porté d'une part sur les produits mono couches et d'autre part sur les produits multicouches. Dans le cas des non-tissés 3D, nous avons étudié les produits mono couches NT1, NT2, NT3 et NT4 ainsi que les produits de types a et b contrecollés respectivement avec des revêtements en non-tissés aiguilletés et en non-tissés thermoliés. Dans le cas des mousses PU, nous disposons de deux mousses automobiles représentatives de deux types et d'application de confort différents et d'une étoffe multicouche composée de deux couches de revêtements en tricot polyester et en tricot polyamide. Le Tableau 26 présente les différents produits testés dans cette étude.

Tableau 26. Présentation des produits testés dans l'étude de comparaison

Mono couche		Multicouche	
Produits VERTILAP®	Produits mousses PU	Produits VERTILAP®	Produits mousses PU
NT1, NT2, NT3, NT4	m1, m2	a1, a2, a3, a4 b1, b2, b3, b4	Cm

Ce chapitre présente l'étude de comparaison entre les produits précédemment cités, tant au niveau des caractéristiques physiques qu'au niveau des caractéristiques mécaniques en compression.

Concernant la caractérisation physique des mousses, nous avons utilisé une méthode appliquée dans l'industrie automobile.

Concernant les propriétés mécaniques en compression, nous avons utilisé, dans un premier temps, la méthode développée dans les chapitres précédents. Le test de compression a été effectué sur un cycle à l'aide du module de compression du KES-F. Dans un second temps, nous nous sommes inspirés des conditions d'essais automobile, et nous avons développé une méthode spécifique nous permettant de tester nos produits en les soumettant à 5 cycles de compression / décompression et ceci sur une machine de traction traditionnelle.

2. Méthodes de caractérisation

2.1. Caractéristiques physiques et géométriques de la mousse PU

La mousse PU est constituée de cellules dont la structure peut être géométriquement modélisée par un pentagone. Afin de caractériser ce pentagone, nous nous sommes appuyés sur la méthode de caractérisation utilisée dans l'industrie automobile, elle-même dérivée de la méthode *VISIOCELL*[®] [57] développée par les fabricants de mousse. La méthode permet de déterminer les dimensions de la structure alvéolaire par analyse d'image de la mousse. Cette image est acquise par Microscopie Electronique par Balayage (MEB).

La taille des cellules de la mousse peut être caractérisée dans le sens horizontal et dans le sens vertical (Figure 85). On notera H, la taille suivant l'axe horizontal et V, celle suivant l'axe vertical. Il faut noter que l'axe horizontal correspond au sens d'expansion de la mousse lors de sa fabrication. L'observation au Microscope Electronique par Balayage permettra d'indiquer si la cellule est ouverte ou fermée. [14, 58]

La détermination de H et V a été réalisée à l'aide du logiciel de traitement d'images *ImageJ*[®]. L'acquisition d'images a été effectuée à l'aide du MEB. Les mesures ont été prises dans différentes zones de la mousse. Au moins 10 mesures ont été réalisées par échantillon.

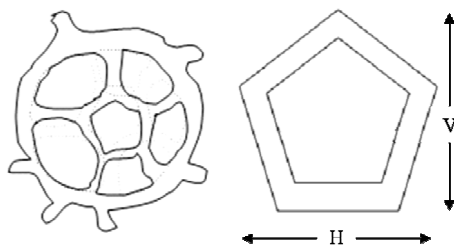


Figure 85. Modélisation de la structure géométrique de la mousse PU [14]

2.2. Caractérisation en compression sur cinq cycles

La caractérisation des propriétés mécaniques en compression a été réalisée en suivant une méthode de mesure basée sur la norme automobile ISO 3386/1 : 1986 [25] et sur la méthode développée par Kawabata pour les essais de compression [44]. En effet, grâce à ces cinq cycles de sollicitation / relaxation, ce test permet de mettre en évidence le comportement asymptotique d'un matériau lorsqu'il est sollicité en compression.

Les essais de compression ont été effectués sur une machine d'essai universelle électromécanique de type Instron 33R4204 (Figure 86). La machine est équipée de deux plateaux de compression de diamètre 150 mm permettant de comprimer toute la surface de l'échantillon. Dans le cas des non-tissés 3D, le plateau inférieur fixe a été recouvert de papier

de verre afin d'éviter le glissement de la structure plissée, glissement qui a été observé lors des premiers essais. La mesure de la force de compression a été réalisée grâce à une cellule de charge de 5 kN, la vitesse de sollicitation ayant été fixée à 0,2 mm/s. L'échantillon a été comprimé jusqu'à un taux de déformation de 50% de son épaisseur initiale et décomprimé par la suite en gardant la même vitesse de relaxation. Ce cycle de compression / décompression a été répété cinq fois avec un temps de repos de 10s entre chaque cycle.



Figure 86. Machine de traction/compression INSTRON 33R4204

Les grandeurs enregistrées au cours de l'essai sont la force et le déplacement. Dans le cadre de l'analyse des résultats, on s'intéressera plus particulièrement au comportement du matériau au 4^{ème} cycle de compression, car c'est souvent à partir de ce cycle que le matériau a atteint ses valeurs asymptotiques de force.

Les données relevées vont permettre de tracer la courbe contrainte déformation (Figure 87) décrivant le comportement en compression de l'échantillon testé. La contrainte maximale ainsi que l'énergie dissipée à 50% de déformation sont également relevées. La contrainte maximale à 50% nous renseignera sur la portance qui correspond à la résistance en compression du matériau. Il est couramment admis que plus la force nécessaire pour comprimer la mousse est importante, plus la mousse est dite « portante » [59]. Cette notion de portance est liée au confort et donc, plus le matériau sera portant, plus il sera confortable. L'énergie dissipée lors de la compression est déterminée à partir de l'aire comprise entre les courbes de compression et de décompression.

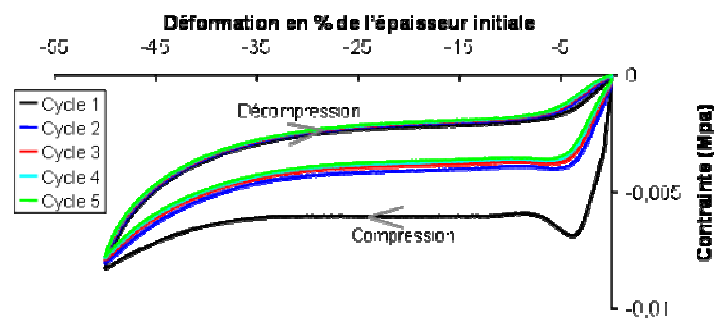


Figure 87. Courbe de contrainte déformation relevée

3. Résultats de caractérisation

Les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits non-tissés 3D et mousses PU, déterminées à partir des méthodes d'essais développées seront présentées dans cette étude. Les observations effectuées sur la base des résultats bruts seront par la suite validées ou infirmées à l'aide des analyses statistiques de comparaison de moyennes et d'ACP. L'*annexe VII.1* présente les valeurs des caractéristiques étudiées des produits mousses PU mono couches et multicouches.

3.1. Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques des produits non-tissés 3D ainsi que celles des produits contrecollés de types a et b sont celles présentées au chapitre 4.3. Le Tableau 27 présente les valeurs des caractéristiques physiques des produits mousses testés. Les produits m1 et m2 présentent une taille de cellule H respective de 250 μ m et de 300 μ m pour des valeurs de dispersions de l'ordre de 10%. Les images prises au MEB (Figure 88) montrent que la mousse mono couche m1 est à cellules fermées et que la mousse mono couche m2 est à cellules ouvertes. Les faibles valeurs de dispersion indiquent la bonne reproductibilité des mesures. La mousse du complexe automobile Cm présente des cellules ouvertes de même taille que celles de la mousse m2.

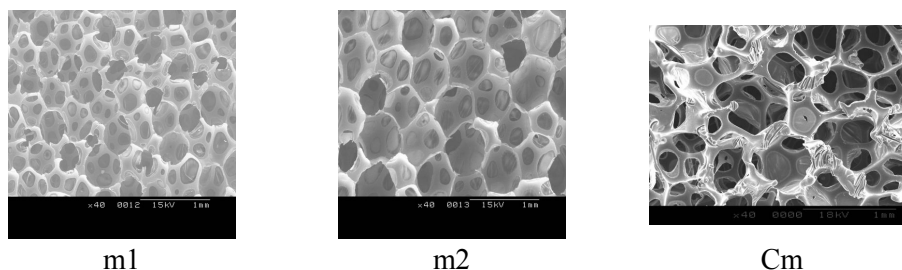


Figure 88. Structures alvéolaires des mousses testées

On note que le produit complexe est moins épais que les mousses m1 et m2. Ceci peut s'expliquer du fait de la perte de matière lors du flammage (cf. 1.3.1 du chapitre 1). Le complexe Cm est pratiquement deux fois plus lourd et plus dense que les mousses mono couches. Au niveau de la perméabilité à l'air, on note que la mousse mono couche m2 est très perméable à l'air comparativement aux deux autres produits m1 et Cm, ce qui est normal puisqu'elle présente une structure à cellules ouvertes. Les produits mousses Cm et m1 sont plus isolants thermiquement que la mousse m2.

Tableau 27. Caractéristiques physiques des produits mousses testés

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	H (mm)	V (mm)	T ₀ (mm)	M (g/m ²)	Densité (kg/m ³)	P _{air} (l/m ² /s)	K (W/m.K)
Cm	31	0,30	0,25	4	386	87	28	0,03
m1	31	0,25	0,21	5	182	36	38	0,03
m2	31	0,31	0,25	5	180	36	296	0,04

Les représentations graphiques de la conductivité thermique, de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la perméabilité à l'air des produits mono couches et multicouches testés sont présentées à la Figure 89 et en *annexe VII.2*.

Au niveau de la masse surfacique, on observe des regroupements illustrant des différences entre les mono couches non-tissés 3D et les mousses, ainsi qu'entre les multicouches mousses et les multi couches non-tissés 3D. Le graphique montre que les mousses mono couches m1 et m2 sont plus légères que les non-tissés 3D mono couches NT1, NT2, NT3 et NT4. De même, les multicouches de types a et b sont plus lourds que le complexe automobile Cm. Ce résultat était attendu, au vu des résultats et des conclusions issus des campagnes 1, 2 et 3.

Au niveau de l'épaisseur, on retrouve la même observation que précédemment avec cette fois des différences entre les multicouches non-tissés 3D. On observe dans le cas des produits mono et multicouches, que les non-tissés 3D sont plus épais que les mousses PU testées. Ce point n'est pas forcément gênant dans le cadre des applications « revêtement intérieur » si la formabilité de ce nouveau complexe est acceptable.

Au niveau de la densité, on observe dans le cas des produits mono couches et multicouches que les non-tissés 3D sont plus denses, et donc plus lourds que les mousses.

Au niveau de la perméabilité à l'air, on observe dans le cas des produits mono couches que les non-tissés 3D sont plus perméables que les mousses m1 et m2. On retrouve la même observation avec les produits multicouches. Ce résultat montre que les produits en non-tissés 3D présentent de meilleure sensation de confort en terme de ventilation. Ceci est particulièrement intéressant dans l'optique du remplacement de la mousse dans les applications d'habillage intérieur comme le garnissage de siège. On peut ainsi imaginer que le confort thermique du passager sur son siège sera meilleur avec l'usage de ces nouveaux matériaux et la sensation d'humidité moins grande.

Au niveau de la conductivité thermique, on observe dans le cas des produits mono couches, que la mousse à cellules fermées m1 est plus isolante que les non-tissés 3D qui présentent une capacité d'isolation thermique identique à la mousse à cellules ouvertes m2.

Dans le cas des produits multicouches, on s'aperçoit que leur conductivité thermique est largement inférieure aux produits mono couches et au complexe mousse Cm. On peut donc dire que les complexes en non-tissés 3D présentent de meilleures propriétés d'isolation thermique que le complexe à base de mousse PU.

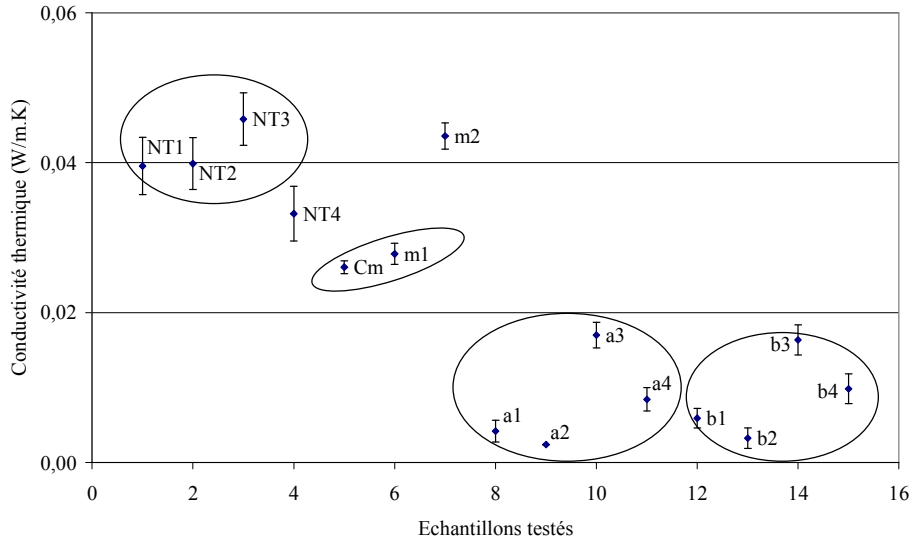


Figure 89. Coefficient de conductivité thermique des produits testés

Les Figures 90 – 91 présentent les diagrammes radar des caractéristiques physiques des produits mono et multicouches. Chaque mesure représente la moyenne d'au moins 15 essais. Ces tracés montrent des différences de comportement entre les produits non-tissés 3D et les produits mousses dans les deux cas de figures mono et multicouches.

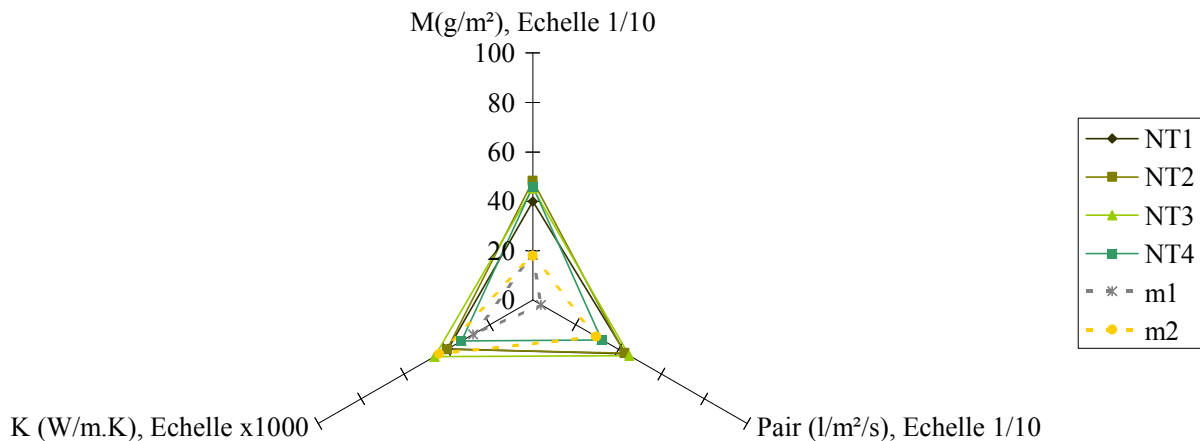


Figure 90. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits mono couches

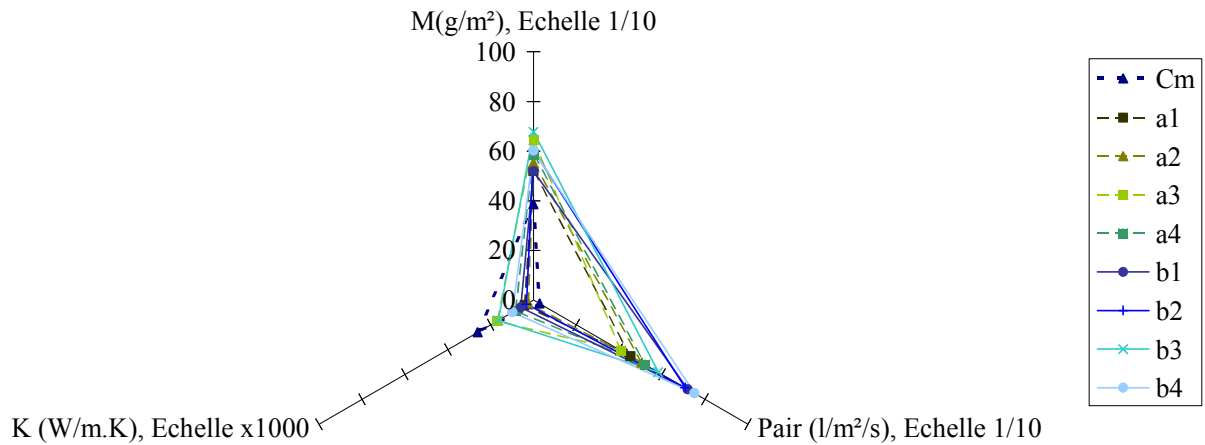


Figure 91. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits multicouches

La caractérisation physique a permis de montrer que dans le cas des produits mono couches, les non-tissés 3D sont plus épais et présentent de meilleures sensations de confort en terme de perméabilité à l'air que les mousses PU testées. Ils présentent des performances égales en terme d'isolation thermique. L'inconvénient majeur de ces produits par rapport aux mousses réside dans leur masse surfacique. En effet, ils sont pratiquement deux fois plus lourds que les mousses. Dans le cas des produits multicouches, les résultats ont permis de montrer que les produits à base de ces non-tissés 3D plissés présentaient de meilleures caractéristiques que le complexe automobile et donc une meilleure sensation de confort en termes de perméabilité à l'air et d'isolation thermique.

3.2. Caractéristiques en compression sur un cycle

Le Tableau 28 présente les caractéristiques de compression KES des produits mousses testés. Ces résultats montrent que le complexe automobile Cm est plus compressible que les mousses mono couches m1 et m2. A l'inverse, il est moins résilient. Comme dans le cas des non-tissés 3D, on retrouve que le contrecollage aura pour effet de réduire le caractère résilient du produit mono couche dans le domaine de sollicitations appliqué. La mousse à cellules ouvertes m2 dissipe plus d'énergie que la mousse à cellules fermées m1. Elle présentera donc un meilleur toucher « soft » et contribuera à une meilleure sensation de confort à l'assise. Son comportement en terme d'énergie dissipée semble identique à celui du complexe automobile qui est également constitué de mousses à cellules ouvertes. Ce résultat nous permet de dire que seule la structure de la mousse (cellules ouvertes ou fermées) aura une influence sur le confort global du produit complexe.

Tableau 28. Caractéristiques en compression des produits mousses PU testés

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	T _M (mm)	EMC (%)	WC (N.m/m ²)	RC (%)
Cm	31	4	3	34	20	74
m1	31	5	4	14	16	88
m2	31	5	4	20	21	86

Les représentations graphiques de la résilience, de l'épaisseur après compression, de la compressibilité et de l'énergie dissipée sont présentées à la Figure 92 et en *annexe VII.3*.

Au niveau de l'épaisseur après compression, on observe des différences de comportement entre les produits non-tissés 3D et les mousses tant dans le cas des produits complexes que dans le cas des mono couches.

Au niveau de la compressibilité, on observe que les produits mono couches non-tissés 3D sont autant compressibles que la mousse m1 à cellules fermées. Ces derniers sont moins compressibles que la mousse m2 à cellules ouvertes. Dans le cas des multicouches, les produits en non-tissés 3D sont pratiquement deux fois moins compressibles que le complexe automobile Cm. Ces résultats montrent qu'une fois complexés, les non-tissés 3D reviennent plus vite à leur position initiale lors d'une sollicitation en compression comparativement au complexe mousse. Ceci nous permet de dire que la structure en forme de plis confère au produit complexe non-tissé un effet ressort particulièrement intéressant en terme de résistance à l'écrasement dans le temps.

Au niveau de l'énergie dissipée, on observe, dans le cas des mono couches, que les non-tissés dissipent plus d'énergie que les mousses PU. Ils présenteront donc un meilleur toucher « soft » et contribueront à une meilleure sensation de confort à l'assise. Dans le cas des produits multicouches, on observe que les produits de type b dissipent autant d'énergie que le complexe automobile Cm. Ces deux produits absorbent moins d'énergie que les produits de type a. Nous pouvons donc conclure que le contrecollage des non-tissés 3D avec des non-tissés aiguilletés fournit un meilleur toucher « soft » comparé au complexe automobile constitué de revêtements en tricots. Le contrecollage de ces non-tissés 3D avec des non-tissés thermoliés confère un toucher « soft » identique à celui donné par le complexe automobile. On peut donc dire que les produits multicouches non-tissés 3D sont aussi confortables, voire plus que le complexe automobile.

Au niveau de la résilience, on observe également que les produits non-tissés 3D présentent les mêmes performances, voire meilleures que les mousses PU. En effet, les produits mono couches présentent le même caractère résilient. Dans le cas des produits multicouches, on observe le même comportement résilient entre le complexe Cm et les produits de type a

contrecollés avec des non-tissés aiguilletés. Les produits de type b, contrecollés avec des non-tissés thermoliés sont plus résilients que le complexe Cm. Ce résultat nous permet donc de conclure que les produits non-tissés plissés sont aussi résilients, voire plus dans certains cas, que les mousses PU.

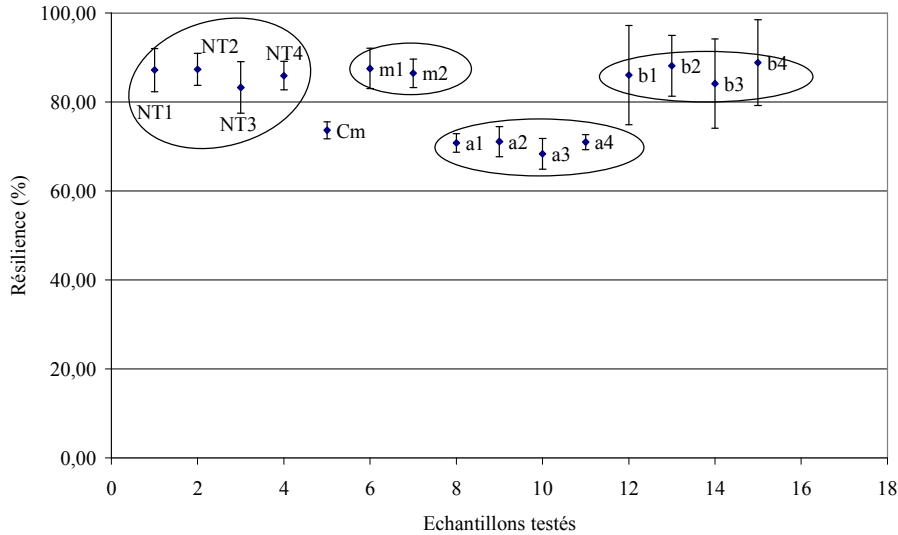


Figure 92. Résilience de compression des produits testés

Les Figures 93 – 94 présentent les diagrammes radar des caractéristiques en compression des produits testés. Chaque mesure représente la moyenne d'au moins 15 essais. Ces diagrammes montrent que dans les cas des mono et multicouches, les produits mousses PU présentent un comportement différent des produits non-tissés plissés.

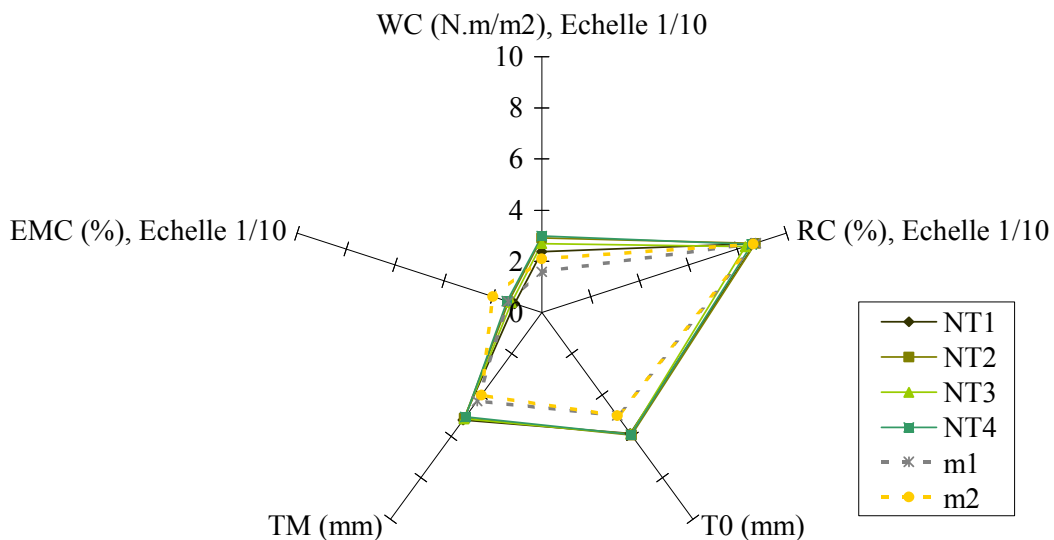


Figure 93. Diagrammes radar des caractéristiques en compression des produits mono et multicouches

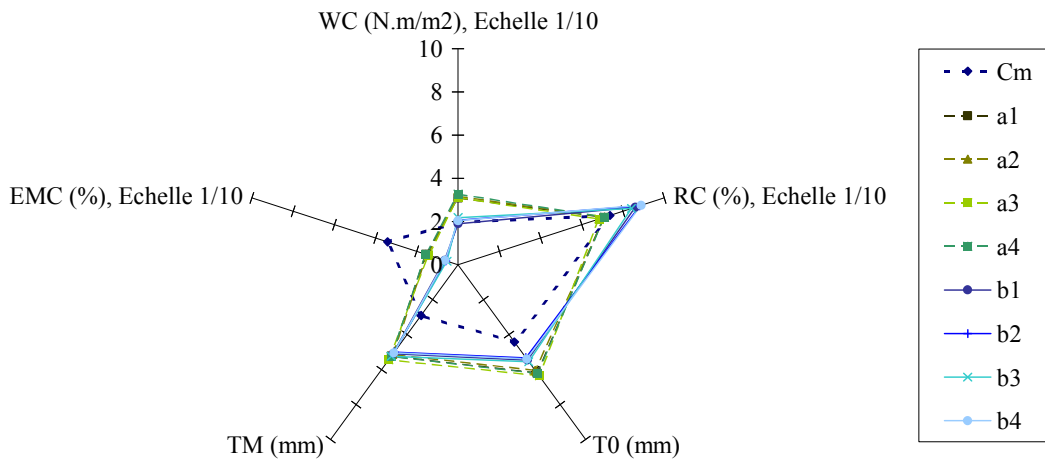


Figure 94. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits multicouches

Les courbes de compression (Figures 95 – 96) illustrent bien les observations effectuées précédemment.

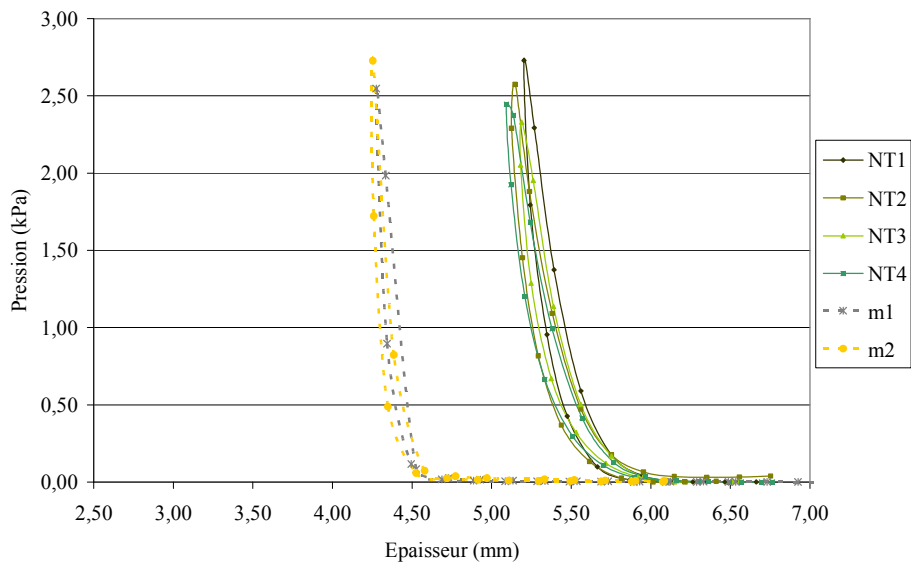


Figure 95. Courbes de compression KES des produits mono couches mousses et VERTILAP®

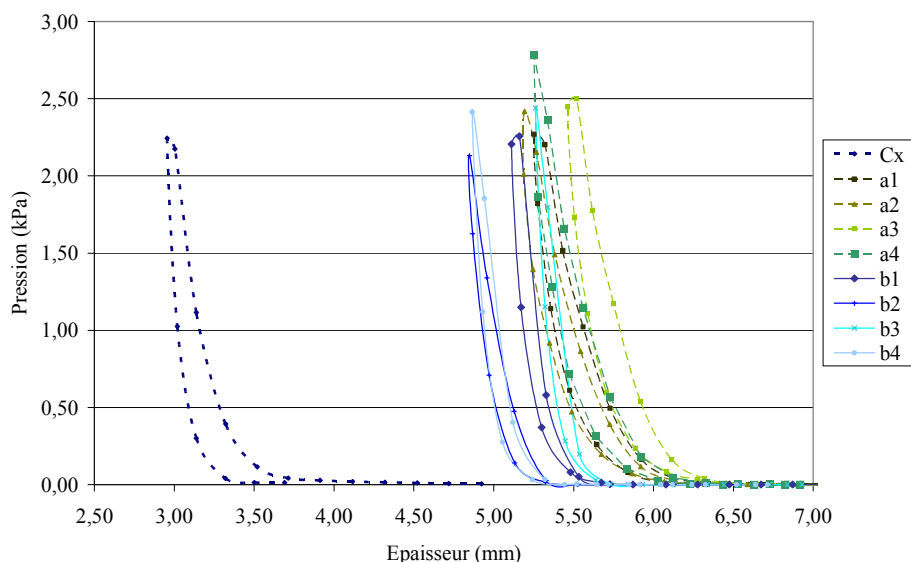


Figure 96. Courbes de compression KES des produits multicouches mousse et VERTILAP®

Les résultats de la caractérisation en compression sur un cycle ont permis de montrer que les produits en non-tissés 3D présentent des performances égales voire supérieures à celles des mousses PU tant au niveau des produits mono couches que des produits multicouches. Ceci nous permet de répondre partiellement à la question posée en début de ce travail, à savoir, « les non-tissés 3D présentent-ils des performances en compression au moins égales à celles des mousses PU ? ».

3.3. Caractéristiques en compression sur cinq cycles

Les courbes contrainte déformation, la contrainte maximale ainsi que l'énergie dissipée au taux de déformation de 50% de l'épaisseur initiale seront présentées pour chacune des familles de produits mono et multicouches. Les résultats obtenus seront par la suite analysés (cf. paragraphe 4) afin de mieux comprendre le comportement en compression des produits testés.

3.3.1. Courbes contrainte déformation

Les Figures 97 - 102 et l'annexe VII.3.2 présentent les courbes contrainte déformation des produits testés, non-tissés 3D et mousses PU, sur la machine de traction Instron. Chaque courbe représente la moyenne de 31 essais dans le cas des produits mono couches et 15 essais dans le cas des produits multicouches en non-tissés 3D. Des artéfacts de mesures ont été observés lors des essais. En effet, dans certains cas, on n'a pas toujours une déformation à 50% de l'épaisseur initiale et les courbes ne sont pas exactement à zéro sur le graphique.

3.3.1.1. Les mono couches

On observe le même comportement en compression quel que soit le non-tissé 3D. Ce comportement est différent de celui des mousses PU. En effet, la courbe de compression dans le cas des non-tissés 3D est principalement caractérisée par une zone d'élasticité linéaire dans laquelle la contrainte augmente régulièrement et ceci jusqu'au 5^{ème} cycle de compression. Aucun plateau de contrainte n'est observé dans les conditions d'essais utilisées. Ce résultat nous permet de dire que les fibres orientées verticalement dans la structure plissée se comportent comme des ressorts. Il faudrait donc effectuer un test de fatigue sur un nombre de cycles plus élevés afin d'observer un phénomène de plateau de contrainte.

Dans le cas des mousses PU, on observe la courbe caractéristique de la mousse. Cette courbe est marquée par une zone d'élasticité linéaire à faible contrainte, suivie d'un plateau de contrainte caractéristique de l'affaissement des cellules dû à l'expulsion de l'air emprisonné dans ces cellules. Ce plateau est suivi par une zone de densification de la mousse dans laquelle la contrainte augmente régulièrement. [60]

Les courbes montrent que les non-tissés 3D sont plus résilients et dissipent plus d'énergie que les mousses PU. Ceci nous permet donc de conclure aux bonnes performances de ces nouveaux matériaux.

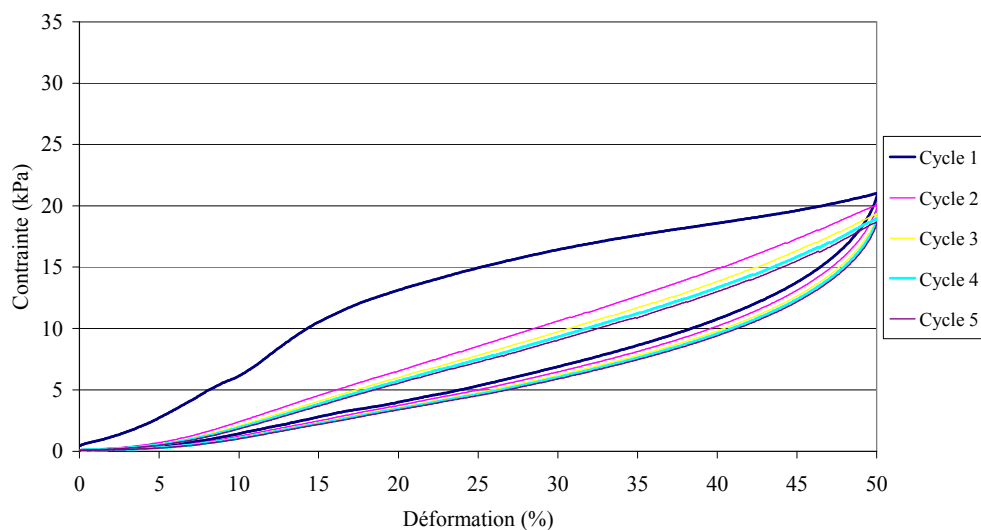


Figure 97. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT1

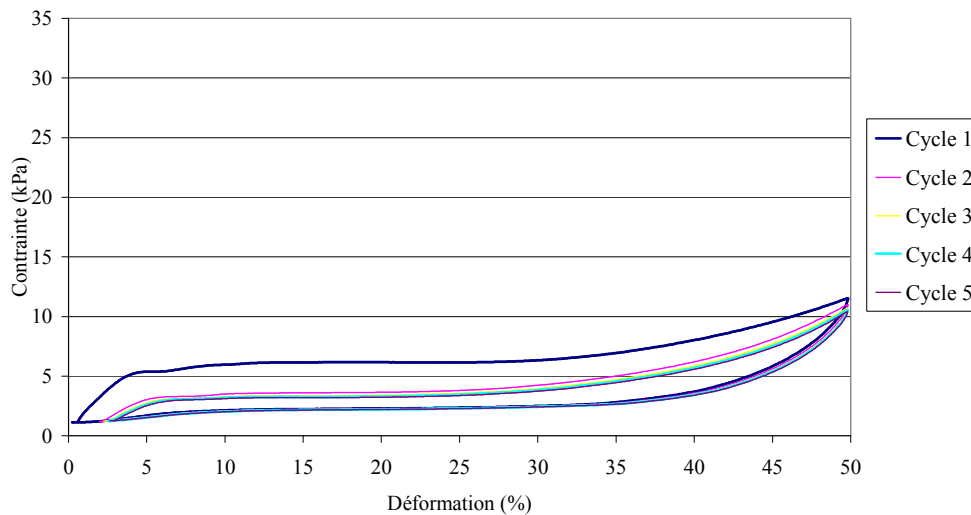


Figure 98. Courbes contrainte déformation de la mousse m1

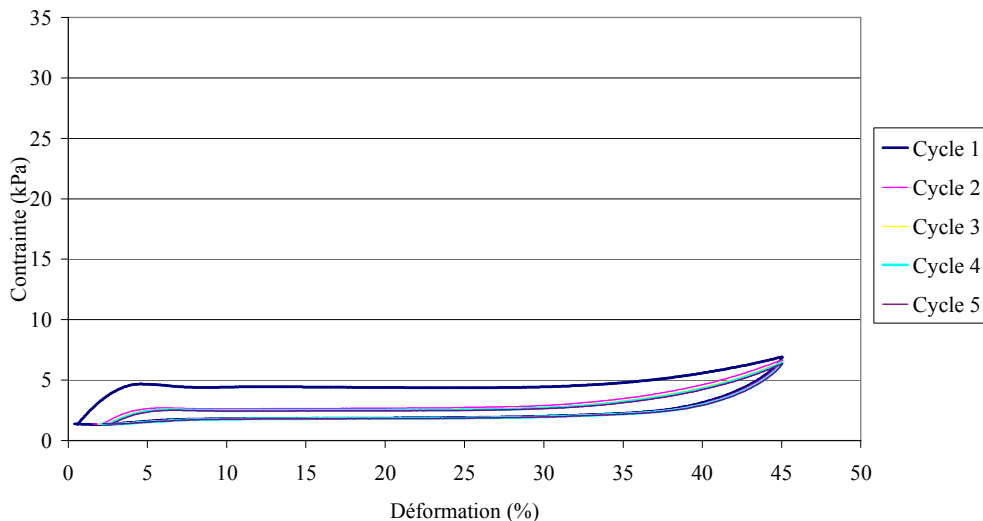


Figure 99. Courbes contrainte déformation de la mousse m2

3.3.1.2. Les multicouches

Dans le cas de la mousse, on retrouve le comportement précédemment décrit dans le cas des produits mono couches. On note cependant une modification de l'allure de la courbe du complexe automobile. Ceci s'explique par les couches de revêtements appliquées sur la mousse.

Tout comme dans le cas des produits mono couches, les produits de types a et b présentent le même comportement que celui des non-tissés 3D mono couches. Ceci nous permet de dire que le comportement final en compression du produit multicouche sera imposé par celui du non-tissé 3D plissé.

Les courbes de compression montrent que les produits en non-tissés 3D sont plus résilients que le complexe mousse et dissipent plus d'énergie que ce dernier. Ceci nous permet de

conclure que les produits multicouches en non-tissés 3D seraient plus performants que le complexe automobile testé sur les aspects mécaniques.

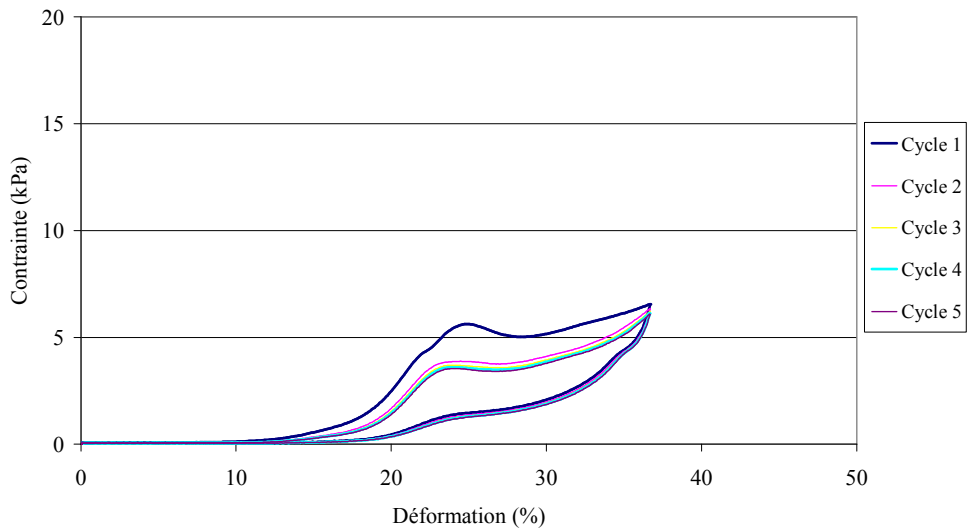


Figure 100. Courbes contrainte déformation du complexe automobile Cm

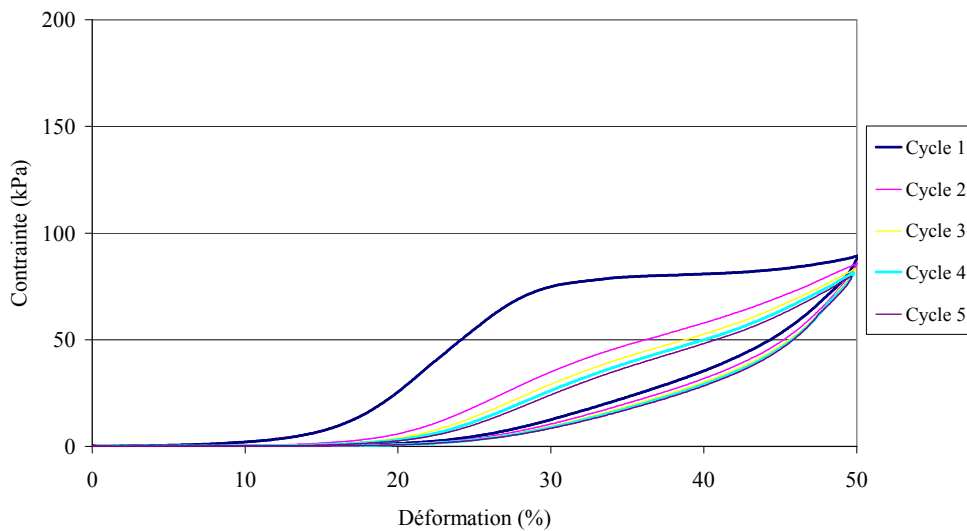


Figure 101. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a1

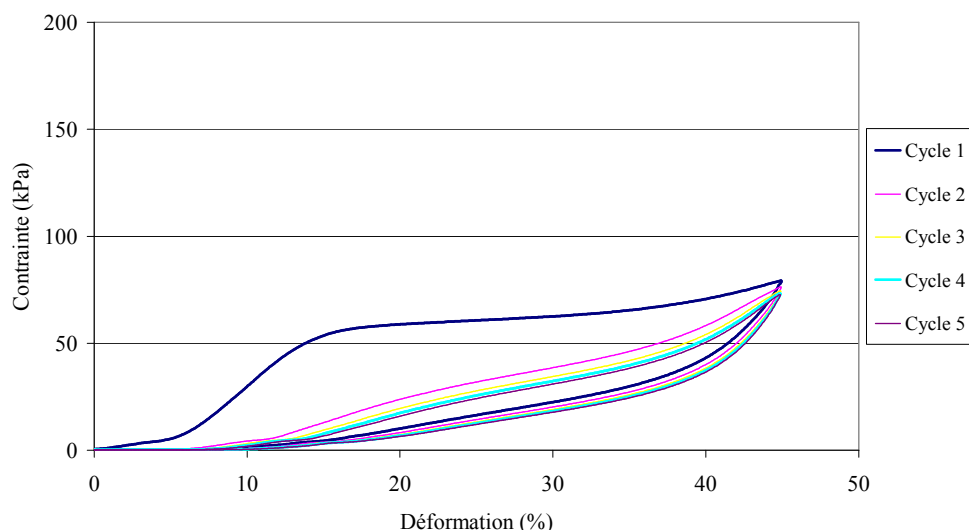


Figure 102. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b1

3.3.2. Contrainte maximale à 50% de déformation de l'épaisseur initiale

Les valeurs de contrainte maximale au taux de déformation de 50% de l'épaisseur initiale ont été calculées pour chaque cycle de compression. Le Tableau 29 présente l'ensemble des valeurs obtenues.

Tableau 29. Valeurs de la contrainte maximale (kPa) à 50% de déformation de l'épaisseur initiale

	n	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
NT1	31	21,04	20,13	19,44	19,04	18,79
NT2	31	30,57	29,08	28,05	27,33	26,95
NT3	31	31,08	29,42	28,35	27,63	27,04
NT4	31	27,04	25,37	24,50	23,97	23,56
Cm	31	6,56	6,36	6,23	6,16	6,11
m1	31	11,67	11,20	10,95	10,79	10,68
m2	31	7,03	6,78	6,64	6,55	6,48
a1	15	89,35	86,37	84,63	83,75	83,05
a2	15	91,81	88,08	85,44	84,43	84,36
a3	15	129,76	125,87	123,64	121,89	120,77
a4	15	113,50	109,25	106,79	105,09	104,12
b1	15	79,35	76,63	75,01	73,98	73,46
b2	15	150,58	143,17	139,30	136,73	135,12
b3	15	148,66	141,70	138,14	135,69	134,30
b4	15	144,69	137,98	134,12	132,08	130,19

La Figures 103 – 104 présentent, sous forme d'histogrammes, les contraintes maximales à 50% de déformation de l'épaisseur initiale des produits mono et multicouches testés.

Dans le cas des produits mono couches, les résultats montrent que les non-tissés 3D sont 2 à 3 fois plus résilients que les mousses PU m1 et m2. Ceci indique qu'ils présentent une meilleure portance et sont donc plus confortables que les mousses PU. Une nette différence peut être observée dans le comportement des non-tissés 3D à partir du 3^{ème} cycle de compression. La stabilisation du comportement semble apparaître à partir du 4^{ème} cycle tandis les mousses présentent un comportement stable dès le 1^{er} cycle. Les résultats montrent également des dispersions très faibles dans le cas des mousses PU. Ceci confirme leur homogénéité de structure comparée aux non-tissés plissés. En effet, ces derniers présentent de fortes dispersions qui s'expliquent par l'irrégularité structurelle du non-tissé 3D due à la préparation du câble d'alimentation au moment de la fabrication.

Dans le cas des produits multicouches, on retrouve également de fortes dispersions au niveau des produits à base de non-tissés plissés. Ces dernières sont dues aux irrégularités du produit de base, le non-tissé 3D. Cependant, malgré une grande irrégularité de structure, les non-tissés 3D sont 7 à 10 fois plus résilients que les mousses. Ceci indique qu'ils présentent une meilleure portance et donc un meilleur confort que le complexe automobile actuellement utilisé. Comme déjà observé précédemment, le comportement du complexe automobile est plus stable au cours des sollicitations que celui à base de non-tissé 3D dont le comportement semble évoluer même au-delà du 4^{ème} cycle de compression.

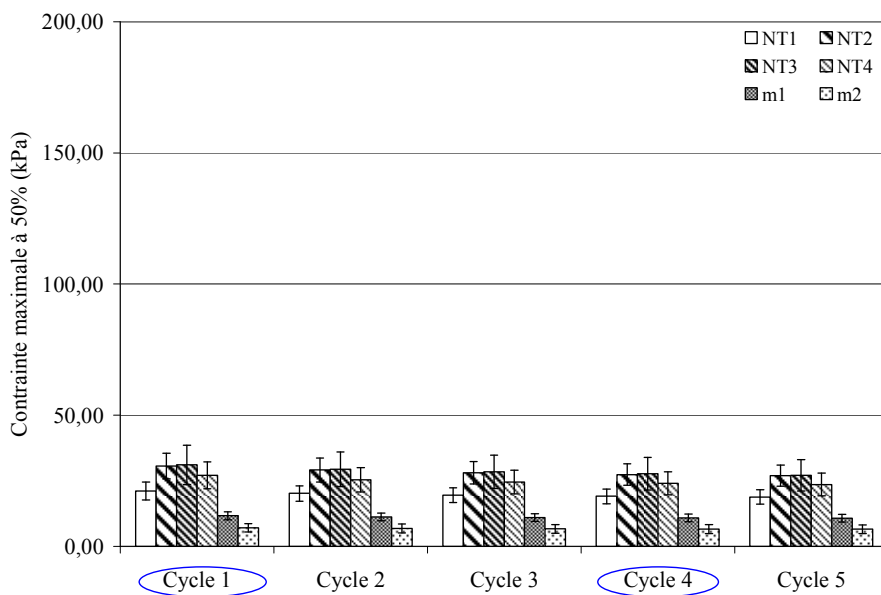


Figure 103. Contrainte maximale à 50% de déformation de l'épaisseur initiale des produits mono couches

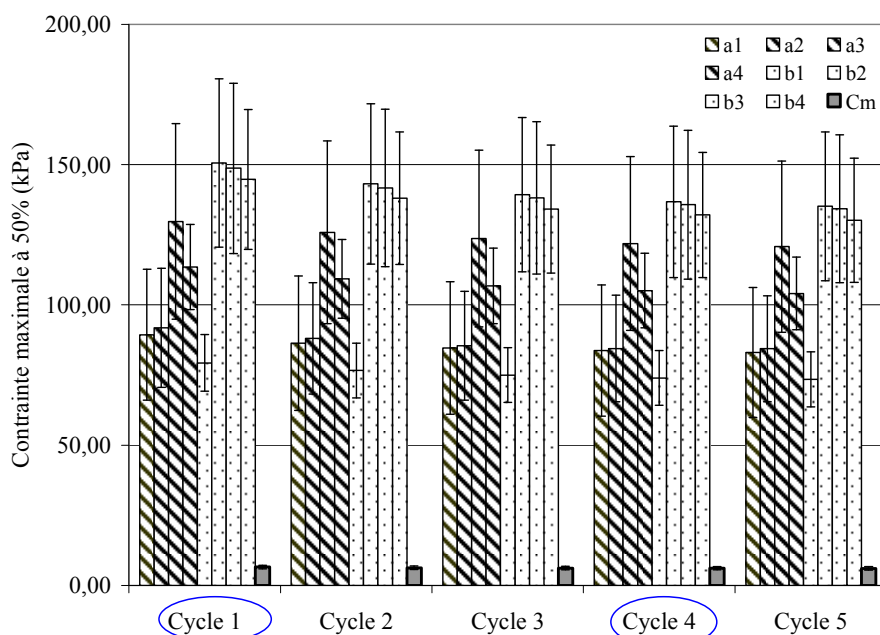


Figure 104. Contrainte maximale à 50% de déformation de l'épaisseur initiale des produits multicouches

3.3.3. Energie dissipée à 50% de déformation de l'épaisseur initiale

Le Tableau 30 présente les valeurs d'énergie absorbée lors des différents cycles de compression. Ces valeurs sont présentées sous forme d'histogrammes (Figures 105 – 106) pour chacun des produits mono et multicouches testés.

Tableau 30. Valeurs de l'énergie dissipée (Joules) à 50% de déformation de l'épaisseur initiale

	n	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
NT1	31	8,43	3,39	2,64	2,46	2,36
NT2	31	10,83	5,30	4,15	3,67	3,41
NT3	31	13,16	5,58	4,16	3,65	3,49
NT4	31	10,79	5,01	3,62	3,38	3,26
Cm	31	1,37	0,90	0,81	0,78	0,74
m1	31	4,77	2,18	1,99	1,90	1,84
m2	31	3,48	1,68	1,56	1,46	1,46
a1	15	40,87	19,12	15,87	12,01	10,13
a2	15	31,67	17,87	11,42	9,73	9,13
a3	15	49,58	22,77	16,65	15,13	14,20
a4	15	43,62	17,85	14,85	13,47	12,66
b1	15	36,28	15,84	13,26	10,64	8,22
b2	15	61,32	24,52	18,66	16,16	13,28
b3	15	63,56	21,81	17,90	16,16	15,09
b4	15	64,28	28,02	19,68	15,89	13,08

Comme dans le cas de la contrainte maximale, on observe de fortes valeurs de dispersions des non-tissés plissés tant au niveau des produits mono couches que multicouches. Ceci nous confirme bien que le comportement de ces nouveaux matériaux est directement lié à l'homogénéité de la structure de base. Ce résultat nous permet de dire que le prototype expérimental utilisé pour réaliser les non-tissés 3D n'est pas encore suffisamment optimisé.

Quels que soient les produits, mono couches ou multicouches, les produits en non-tissés plissés absorbent 2 fois plus d'énergie que les mousses PU. Ceci démontre bien qu'ils sont plus confortables que les mousses testées. On observe également que le comportement des mousses varie moins au cours des cycles en comparaison des produits non-tissés 3D qui semblent évoluer jusqu'au 3^{ème} cycle de compression. Cependant, ce comportement tend à se stabiliser et à tendre vers une valeur asymptotique à partir du 3^{ème} cycle.

Dans le cas des produits non-tissés plissés, les résultats montrent également une forte évolution du comportement des matériaux testés entre le 1^{er} cycle et les quatre autres cycles. Ceci traduit une forte réorganisation de la structure fibreuse de ces nouveaux matériaux. Cette évolution est moins marquée dans le cas des produits mousses PU traduisant alors une bonne stabilité de la structure alvéolaire.

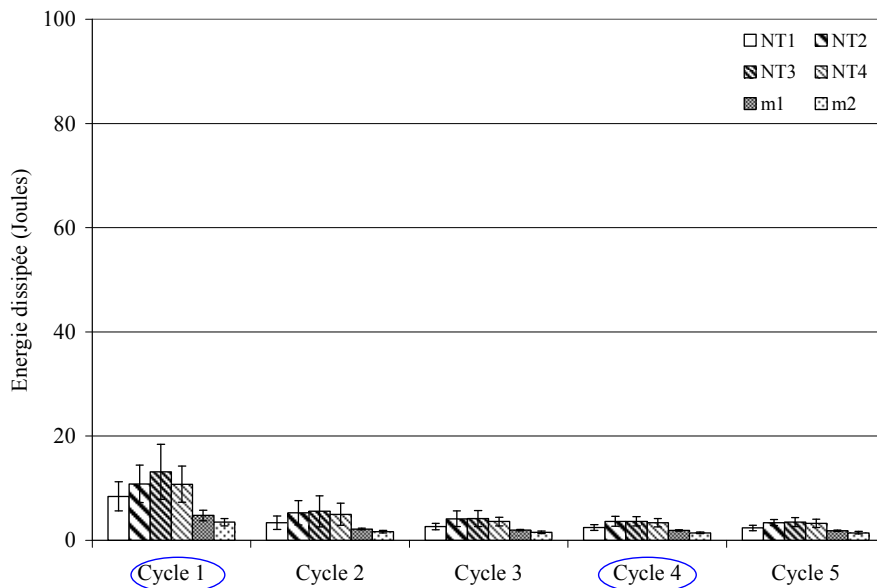


Figure 105. Energie dissipée lors de la compression à un taux de déformation de 50%

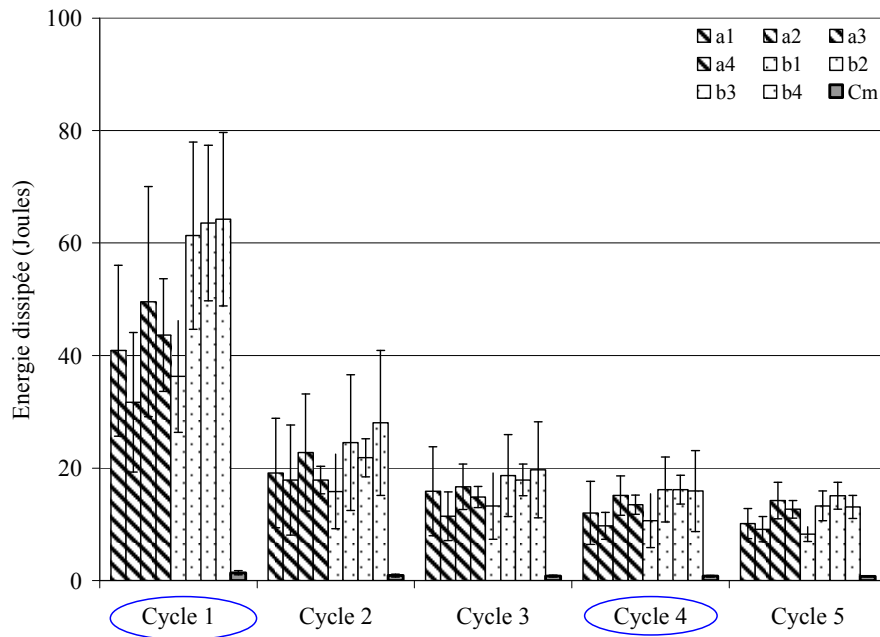


Figure 106. Energie dissipée lors de la compression à un taux de déformation de 50%

3.3.4. Conclusions

La caractérisation en compression sur cinq cycles a permis de mettre en évidence les performances égales voire supérieures des produits non-tissés plissés en comparaison des produits mousses PU. Les résultats obtenus ont également montré que ces nouveaux matériaux sont plus confortables que les mousses testées. Cependant, leur comportement connaît une grande dispersion du fait de l'irrégularité de structure du non-tissé 3D liée à la mise au point du procédé de fabrication. L'analyse statistique des résultats par la comparaison des moyennes va permettre de décrire de façon plus fine le comportement de ces nouveaux non-tissés 3D.

4. Analyse des résultats

Nous avons réalisé une première étude sur les caractéristiques physiques et en compression sur un cycle pour dégager les ressemblances entre les produits non-tissés plissés et mousses testés. Une seconde étude a été menée afin de comprendre le comportement de chacun des matériaux testés entre les différents cycles de compression. L'annexe VII.4 présente les résultats des analyses statistiques de cette étude.

4.1. Etude des produits testés

Cette étude a été basée sur l'analyse en composantes principales (Figures 107 – 108 et l'annexe VII.4.2).

Les axes principaux A1 et A2 des cercles de corrélations représentent 78% de l'information traitée et les axes A1 et A3 représentent 66% de l'information. Nous avons tracé les cartes des produits et les cercles de corrélations suivant les axes principaux A1A2 et A1A3. Seule la variable *compressibilité* est située sur le cercle de corrélations (A1A2). Les résultats montrent une corrélation positive forte entre l'épaisseur et l'énergie dissipée.

Les cartes des produits montrent qu'on peut distinctement regrouper les produits en fonction de leur structure. Ainsi, les non-tissés 3D mono couches peuvent être regroupés entre eux. Il en est de même pour les autres produits. Lorsqu'on effectue les projections orthogonales suivant les axes des variables, on observe que les produits mousses et les produits non-tissés plissés présentent des comportements différents. A partir de ces résultats, on peut dire que les produits mousses et les produits non-tissés plissés présentent des comportements différents tant au niveau des mono couches que des multicouches.

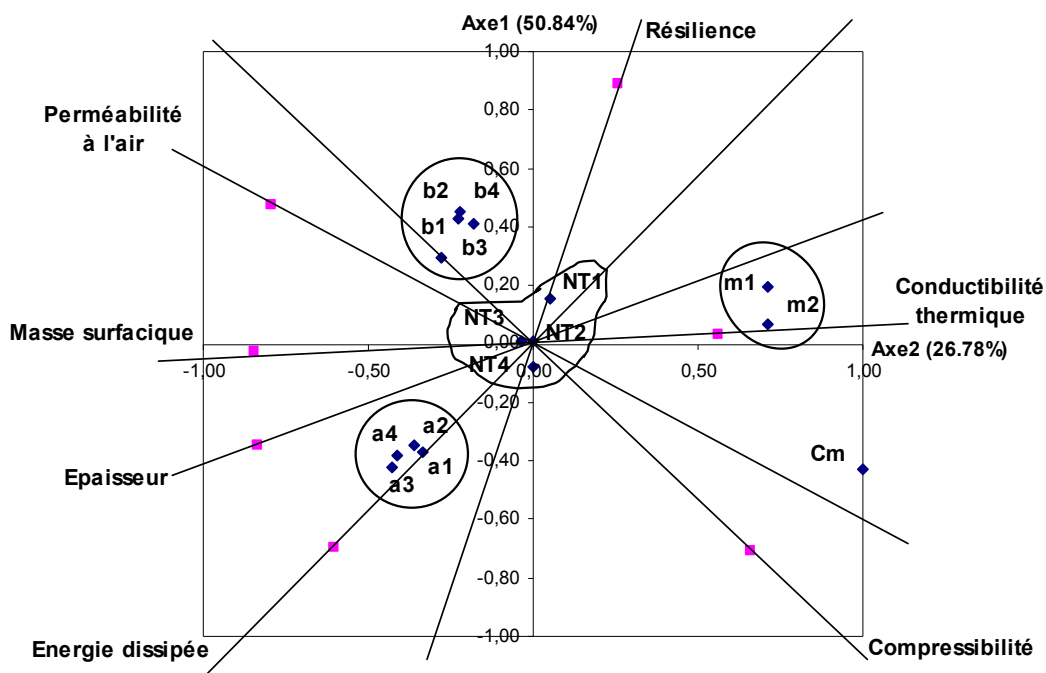


Figure 107. Carte des produits testés suivant les axes A1A2

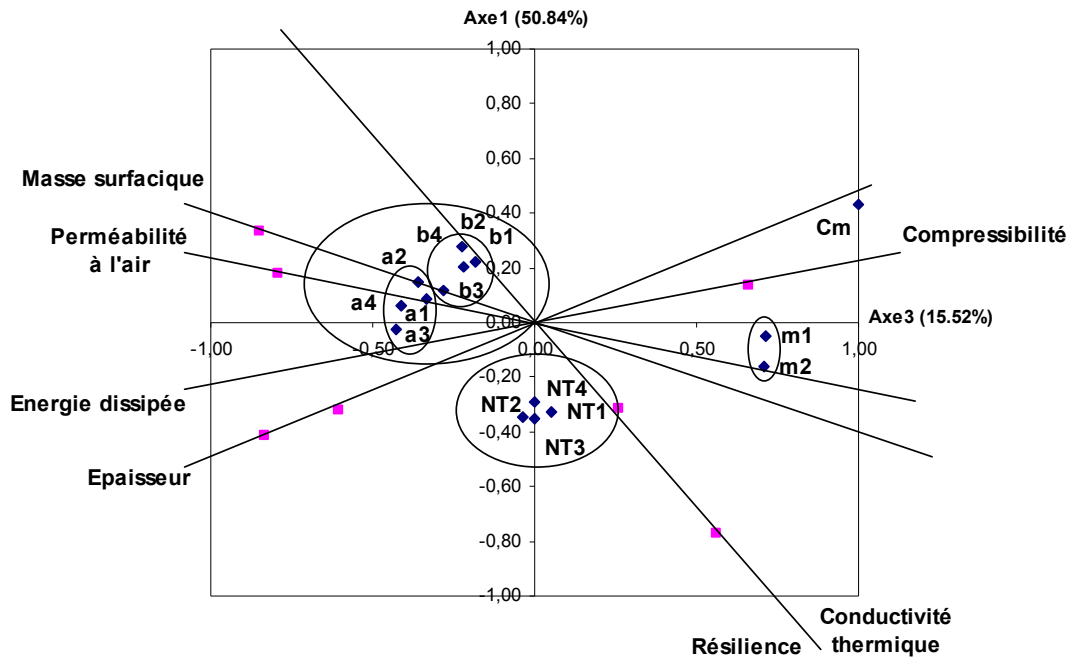


Figure 108. Carte des produits testés suivant les axes A1A3

4.2. Etude du comportement en compression sur cinq cycles

Cette étude a été basée sur l'analyse statistique des comparaisons des variances et des moyennes (*annexe VII.4.1*). L'hypothèse de normalité des données étudiées a été acceptée par le test de Kolmogorov-Smirnov.

4.2.1. La contrainte maximale à 50% de l'épaisseur initiale

L'étude statistique montre que le comportement de la mousse m2 est stable dès le 1^{er} cycle de compression. Les non-tissés 3D et la mousse m1 tendent à stabiliser leur comportement à partir du 2^{ème} cycle de compression.

Les produits de types a et b présentent un comportement stable dès le 1^{er} cycle tandis que le complexe automobile tend à stabiliser son comportement dès le 2^{ème} cycle de compression.

4.2.2. L'énergie absorbée à 50% de l'épaisseur initiale

Les résultats de l'analyse montrent que les non-tissés 3D NT1 et NT4 tendent à stabiliser leur comportement à partir du 3^{ème} cycle de compression tandis que le comportement du non-tissé 3D NT3 n'est stabilisé qu'à partir du 4^{ème} cycle. La mousse m1 tend à stabiliser son comportement dès le 4^{ème} cycle tandis que le comportement de la mousse m2 est stabilisé à partir du 3^{ème} cycle. Le comportement du non-tissé 3D NT2 évolue régulièrement et ne présente pas de stabilisation jusqu'au 5^{ème} cycle.

Le comportement de a1, b1 et b2 se stabilise à partir du 2^{ème} cycle. Le complexe automobile tend à stabiliser son comportement à partir du 3^{ème} cycle. Il en est de même pour les produits a3, b3 et b4. Le comportement des produits a2 et a4 tend à se stabiliser dès le 4^{ème} cycle.

4.3. Conclusion

Cette analyse des résultats a permis de montrer que les produits non-tissés 3D plissés et les produits mousses PU testés se comportaient de façon différentes tant au niveau des propriétés physiques que des propriétés mécaniques en compression. Les résultats ont permis de montrer que les non-tissés 3D sont principalement marqués par une forte réorganisation de leur structure fibreuse au cours des premières sollicitations. Ceci permet de montrer que les filaments à l'intérieur de la structure se comportent différemment les uns des autres. Ce résultat peut être utilisé dans une démarche de modélisation du comportement en compression de ces nouveaux produits. Nous avons également pu observer que ces nouveaux matériaux présentent, par contre, une bonne permanence de leurs propriétés au niveau de la portance. Ceci traduit une permanence du confort au toucher.

5. Conclusions

L'étude de comparaison entre les produits mono et multicouches non-tissés 3D et mousses PU a permis de mettre en évidence les différences de comportement entre ces deux produits. Nous avons ainsi pu montrer que les non-tissés 3D présentaient des performances égales voire supérieures à celles des mousses PU testées. En effet, ces nouveaux matériaux sont aussi résilients que les mousses avec de meilleures caractéristiques liées au confort (toucher « soft »), à l'isolation thermique et à la perméabilité à l'air. Nous avons également pu montrer que les non-tissés 3D contrecollés avec des revêtements non-tissés aiguilletés présentaient des caractéristiques de confort plus importantes que celles des mousses PU. La caractérisation sur cinq cycles de compression, nous a permis de mieux comprendre le comportement de ces nouveaux matériaux aux sollicitations répétées. Malgré les bonnes performances de ces non-tissés 3D, ils présentent encore des inconvénients majeurs en termes de poids et de permanence de comportement dans le temps. Il est donc impératif de faire évoluer le prototype expérimental afin d'atteindre cet objectif de légèreté. Ce dernier nous permettra alors de réaliser des matériaux de garnissage automobiles aptes à répondre entièrement à la problématique de remplacement posé au début de ce travail de thèse.

CHAPITRE 4.6

CAMPAGNE D'ESSAIS N° 4

1. Introduction

Suite aux résultats satisfaisants, obtenus au terme de la troisième campagne d'essais, une quatrième campagne d'essais a été menée afin de répondre entièrement à la problématique posée. L'objectif de cette quatrième campagne a donc été de réaliser des non-tissés 3D suffisamment légers, de manière à démontrer l'utilisation possible des produits VERTILAP[®] multicouches dans le cadre d'applications pour l'habillage intérieur automobile. Afin d'atteindre cet objectif, il a fallu évaluer l'aptitude à la formabilité de ces produits. Pour valider l'ensemble des études et réglages, nous avons choisi de réaliser une housse d'appui-tête et un panneau de porte car ce sont des produits présentant de fortes zones de courbures. La qualité des pièces automobiles obtenues nous permettra alors de conclure quant à la formabilité des produits multicouches VERTILAP[®].

Ce chapitre présente le déroulement de la campagne de production des non-tissés 3D plissés ainsi que la caractérisation de ces produits. L'étude comparative entre les produits VERTILAP[®] obtenus lors de cette campagne et les mousses PU présentées au chapitre 4.5 est également présentée. Ce chapitre décrit également les techniques de fabrication des pièces automobiles réalisées à partir des produits non-tissés 3D plissés et du complexe automobile en mousse PU.

2. Réalisation de produits VERTILAP[®]

La réalisation des produits VERTILAP[®] a été effectuée successivement sur le prototype expérimental VERTILAP[®] 20cm / 6mm, puis sur la presse de contrecollage à sec.

2.1. Production de non-tissés 3D plissés

2.1.1. Préparation de la matière d'alimentation

Comme décrit lors de la campagne d'essais N° 3, la préparation de la matière d'alimentation a été réalisée en deux étapes.

Une première étape de séparation du câble, qui a été réalisée à l'aide du dispositif de séparation de câble présenté au chapitre 4.4. Les essais menés avec ce dispositif ont permis de mettre en évidence ses limites. En effet, le système de mise en mouvement des lames coupantes, constitué d'un système poulie / courroie non automatisé, ne supportait pas la résistance générée par les enchevêtrements des filaments dans la nappe. La Figure 109 illustre le problème rencontré lors de la découpe du câble.

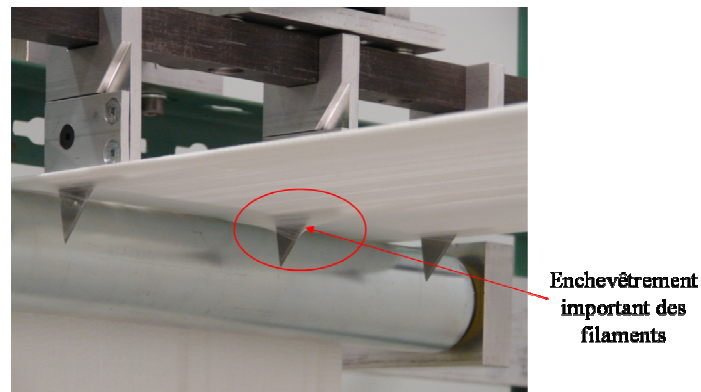


Figure 109. Enchevêtrements des filaments dans le câble

La solution adoptée, pour séparer le câble de 90 ktex, a été de le mettre sous tension sur une longueur donnée. Pour cela, nous avons fixé les pinces du précédent dispositif sur un support lui-même encastré entre deux poutres fixes. La longueur entre poutres correspond alors à la longueur de câble obtenue. Cette dernière était d'environ 10m. Une fois le câble étendu et mis sous tension entre les pinces, sa largeur est subdivisée en 9 portions de manière à obtenir un titre de 10ktex. Une attache est réalisée afin de bien distinguer les différentes portions. On procède alors à la séparation du câble en s'aidant de ciseaux au niveau des points d'enchevêtrement des filaments. A la fin de la séparation, une seconde attache est réalisée à l'autre extrémité de la longueur. L'opération est répétée jusqu'à obtenir la longueur de câbles souhaitée. Ces derniers sont ensuite découpés et stockés dans des pots. Ils seront par la suite défibrés sur la machine de convertissage (Converter). Les différentes étapes de ce protocole sont illustrées à la Figure 110.

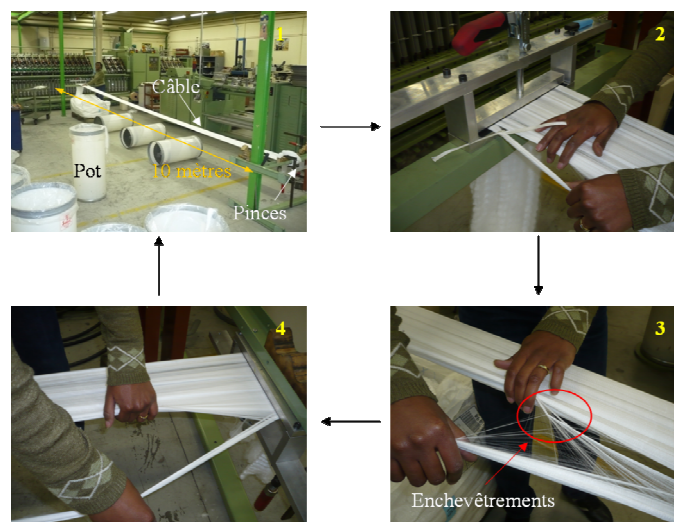


Figure 110. Protocole de séparation du câble de 90ktex

2.1.2. Paramètres de production

Au niveau de la production, tous les paramètres ont été maintenus constants à l'exception du titre et de la vitesse d'entrée de verticalisation. Les non-tissés 3D obtenus ont été plissés avec des câbles de titre compris entre 7 et 10 ktex. La vitesse d'entrée de verticalisation V_{ev} a varié entre une valeur minimale de 3 m/min et une valeur maximale de 4 m/min. La température de consigne a été fixée à 60°C tandis que le générateur de chaleur a été réglé à la position P1 qui correspond à une température T_F de 233°C et une vitesse du flux thermique de 1,6m/s. Le rapport de condensation C a été fixé à 2,6. Les vitesses de plissage V_p et d'extraction V_{ex} ont été fixées respectivement à 1,5 m/min et 2,2 m/min. Les Tableaux 31 – 32 présentent les valeurs des paramètres constants ainsi que des paramètres que l'on a fait varier pendant la production.

Tableau 31. Paramètres constants de fabrication

Températures (°C)		Réglages machine			Vitesses de production (m/min)		
$T_{consigne}$	T_F	C	V_T	$I_{Tex}(\%)$	V_p	V_{ex}	V_c
60	P1	2,6	25	-12	1,51	2,22	1,06

Tableau 32. Paramètres variables de fabrication

Titre (ktex)	Réglages machine		Vitesses de production (m/min)		
	$I_{sa}(\%)$	V_2	V_3	V_{ev}	
[7 ; 10]	[-25 ; -6]	[2,18 ; 2,74]	[2,95 ; 3,70]	[3,13 ; 3,92]	

2.1.3. Observations du procédé

L'apport d'air de refroidissement a été appliqué dans la seconde partie de la zone de condensation, comme préconisé au terme de la campagne N° 3. Lors des essais nous avons relevé une température de la matière au point A de l'ordre de 35°C à 40°C et de l'ordre de 20°C à 25°C au point B (Figure 111). On note une diminution de 20°C sur chacun de ces points entre cette campagne et la campagne N° 3. Ceci montre donc l'impact du refroidissement sur la matière plissée en sortie du procédé. La différence de température entre les points A et B reste égale à 20°C.

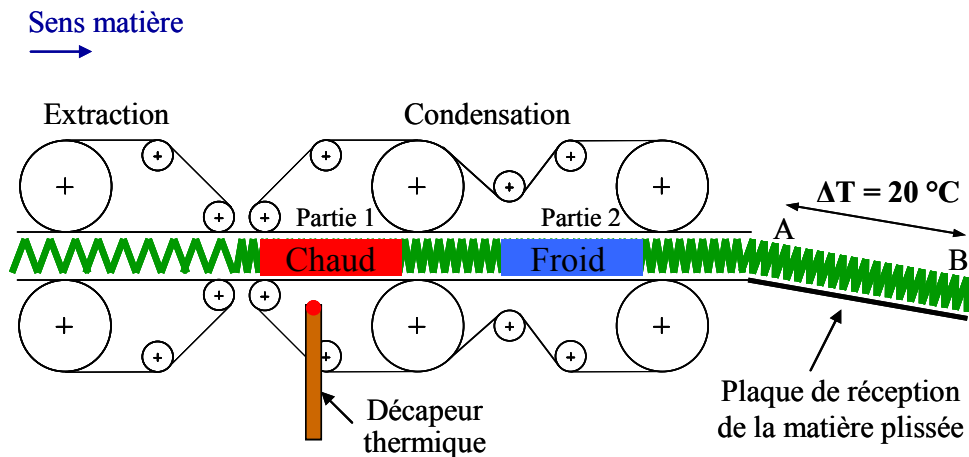


Figure 111. Flux thermique dans la zone de condensation

Il a également été observé un défaut d'ondulation dans la nappe plissée. Cette dernière présentait alors une forme sinueuse en sortie de la zone de la condensation comme le montre la Figure 112. Ce défaut pourrait s'expliquer par l'usure de la bande transporteuse des manchons de condensation. En effet, la température de chauffe utilisée, qui est de 233°C dans la zone de condensation, correspond à la limite d'utilisation de la bande transporteuse. Cette dernière a donc subi un allongement important qui a contribué à accélérer son vieillissement.

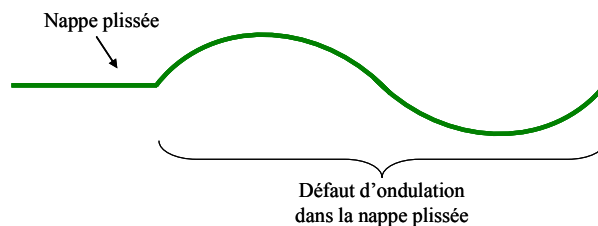


Figure 112. Ondulation de la nappe plissée

2.2. Contrecollage des non-tissés 3D plissés

2.2.1. Paramètres de contrecollage

Les résultats de la campagne N° 3 nous ont permis de conclure que les caractéristiques liées au confort sont d'autant plus importantes que la température de contrecollage est faible. A cet effet, nous avons utilisé, comme liant, un voile non-tissé co-polyester de 20 g/m² présentant une température de fusion de 65/70°C afin de pouvoir fixer la température de contrecollage à 120°C. L'écartement entre les tapis de la presse a été fixé à une hauteur de 6,5mm. La vitesse a été fixée à 5 m/min, soit une augmentation de 60% par rapport à la campagne N° 3. Ceci nous permet donc de valider la démarche de développement industriel.

2.2.2. Produits multicouches VERTILAP®

Lors de cette campagne, nous avons réalisé des produits multicouches composés de couches de revêtement polyester en non-tissé aiguilleté et tricot. Le non-tissé aiguilleté est en polyester et présente une masse surfacique de 40 g/m². Le tricot utilisé est un tricot automobile en polyester de masse surfacique 200 g/m².

Des panneaux d'environ un mètre carré ont été réalisés au cours de ces essais. Pour ce faire, nous avons disposé les bandes de nappes plissées de largeur d'environ 20 cm les unes à côté des autres. La Figure 113 montre l'étoffe multicouche obtenue à partir des non-tissés 3D.



Figure 113. Etoffe multicouche VERTILAP®

3. Résultats de caractérisations

Au niveau de la caractérisation, nous avons, dans un premier temps, étudié les caractéristiques des produits VERTILAP® obtenus au cours des essais de production. Dans un deuxième temps, nous avons comparé ces produits aux mousses automobiles PU présentées au chapitre 4.5.

Dans cette étude, nous désignerons par mono couche le non-tissé 3D testé et par multicouche l'étoffe complexe obtenue. Les produits mousses Cm, m1 et m2 sont ceux présentés au chapitre 4.5. L'*annexe VIII.1* présente les tableaux de valeurs des résultats de caractérisations. Les observations faites à partir des résultats bruts seront examinées à l'aide des analyses statistiques.

3.1. Caractéristiques des produits VERTILAP®

3.1.1. Caractéristiques physiques

Le Tableau 33 présente les valeurs des caractéristiques physiques des produits VERTILAP® de cette quatrième campagne d'essais. Les résultats indiquent que le non-tissé 3D mono

couche présente une masse surfacique de l'ordre de 170 g/m² pour une densité de 65 kg/m³. Ce résultat montre que la méthode de séparation du câble nous a permis d'obtenir des produits plus légers de 60% par rapport à ceux de la campagne N°3. Le produit multicouche présente une masse surfacique de l'ordre de 500 g/m² et est plus épais que le mono couche. Le taux de compactage est de 70% pour le mono couche et de près de 10% plus important dans le cas du multicouche. On note également une différence de 10% entre l'angle de pli avant et après contrecollage. Ces caractéristiques sont meilleures que celles des produits de la campagne précédente. Nous pouvons donc conclure que l'optimisation du flux thermique dans la zone de condensation, a permis d'améliorer l'orientation verticale des plis et a également permis d'obtenir une structure plissée plus compacte. La perméabilité à l'air du mono couche est plus importante que celle du multicouche, ce qui était attendu. Ces deux produits présentent la même valeur de coefficient de conductivité thermique. Ceci indique qu'ils présentent tous les deux le même confort en terme d'isolation thermique.

Tableau 33. Caractéristiques physiques des produits VERTILAP[®] de la campagne N° 4

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	T _X Compactage (%)	Angle de pli (degrés)	M (g/m ²)	Densité (kg/m ³)	P _{air} (l/m ² /s)	K (W/m.K)
Monocouche	15	6	68	37	164	27	766	0,03
Multicouche	15	7	78	48	484	65	200	0,03

Nous avons aussi observé des irrégularités d'aspect (Figure 114) dans la nappe plissée en terme de distributions des filaments sur la laize. Les résultats obtenus par la méthode d'évaluation de l'irrégularité présentée au chapitre 4.3, ont montré que le non-tissé 3D présente une irrégularité de l'ordre de 10% avec un coefficient de variation proche de 50%. Ceci nous permet de dire que les produits obtenus sont plus irréguliers que ceux de la campagne N° 3 mais restent moins irréguliers que ceux obtenus lors de la campagne N° 2. Ce résultat était prévisible puisque nous avons diminué le titre du câble entrant et, par la même, le nombre de filaments en section. Au vu de la forte dispersion, nous pouvons dire que la méthode de caractérisation (irrégularité) n'est plus adaptée au produit plissé du fait de son fort degré de compactage.

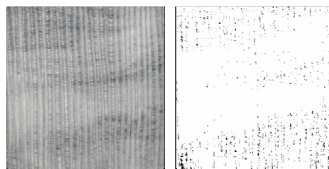


Figure 114. Défaut d'irrégularité observée dans la nappe plissée

Le diagramme radar (Figure 115) montre que les produits mono couche et multicouche ne présentent pas le même comportement.

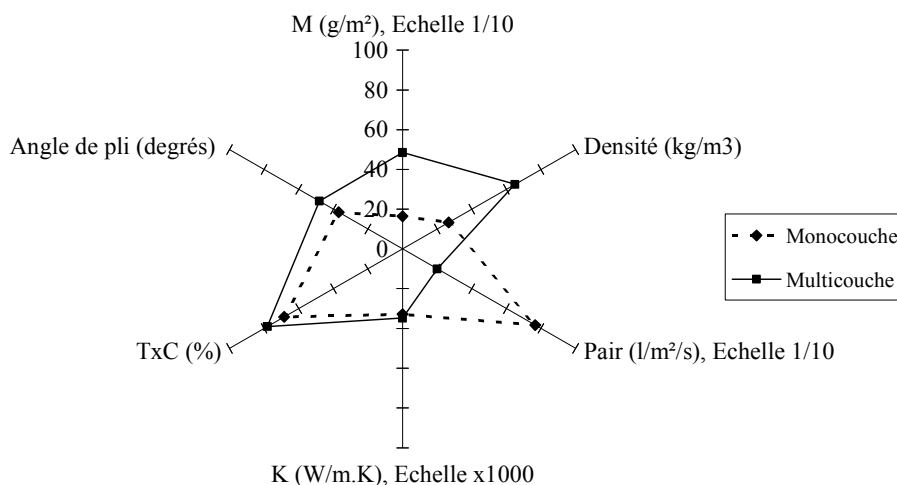


Figure 115. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits VERTILAP®

3.1.2. Caractéristiques de compression

Les résultats de caractérisation présentés sont ceux obtenus sur un cycle de compression. Les essais ont été réalisés sur le module de compression du KES-F. Le Tableau 34 présente les valeurs des caractéristiques mesurées. Ces résultats montrent que le non-tissé 3D est deux fois plus compressible que le multicouche et dissipe presque autant d'énergie que celui-ci. Il présente également une meilleure résilience. Nous pouvons donc dire que ces deux produits présenteront de bonnes sensations de confort (toucher « soft ») tout en procurant une bonne résistance à la compression et un bon écrasement de la structure dans le temps. Comparativement aux non-tissés obtenus lors de la campagne N° 3, ces résultats nous montrent également que les caractéristiques liées au confort ont été améliorées. Ceci nous permet alors de valider les améliorations apportées sur le prototype expérimental.

Tableau 34. Caractéristiques de compression des produits VERTILAP®

Echantillons testés	Nombre d'échantillons	T ₀ (mm)	T _M (mm)	EMC (%)	WC (N.m/m ²)	RC (%)
Monocouche	15	6	4	36	62	79
Multicouche	15	7	6	19	50	63

Le diagramme radar (Figure 116) nous permet de dire que ces deux produits ne présentent pas le même comportement.

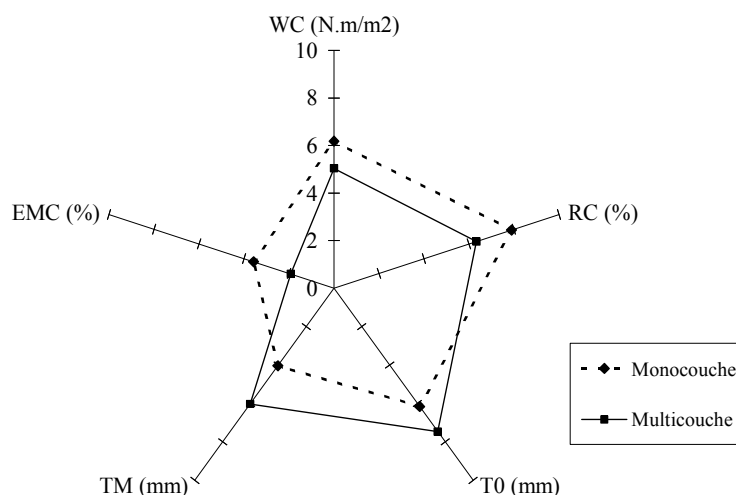


Figure 116. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits VERTILAP®

La caractérisation en compression des produits VERTILAP® a permis de mettre en évidence les améliorations des performances de ces produits comparativement aux produits obtenus lors de la campagne N°3. Les résultats obtenus ont également montré que l'irrégularité de la répartition de matière dans la nappe est d'autant plus importante que le câble présente une faible masse linéique, ce qui était attendu. Malgré leurs bonnes caractéristiques tant physiques qu'en compression, le comportement des non-tissés 3D plissés n'est pas encore stable tout au long de la production.

3.2. Comparaison entre les produits VERTILAP® et les mousses PU

3.2.1. Caractéristiques physiques

Les représentations graphiques des résultats (Figure 117 et *annexe VIII.2*) montrent que les produits non-tissés plissés présentent des dispersions plus importantes que les mousses PU testées.

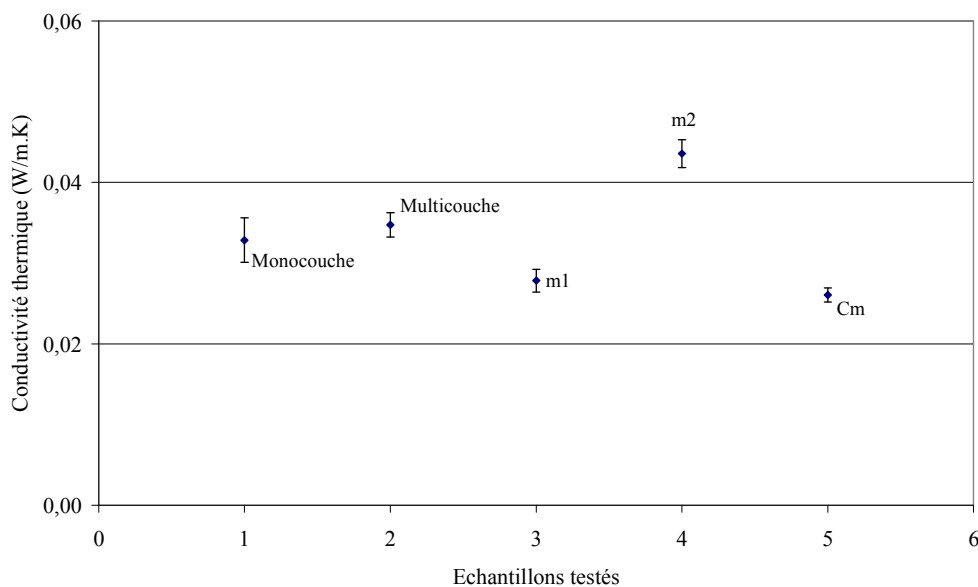


Figure 117. Caractéristiques physiques des produits VERTILAP® et des mousses PU

Dans le cas des produits mono couches, on observe que le non-tissé 3D présente la même masse surfacique que les mousses m1 et m2. Ceci nous permet donc de dire que l'objectif de légèreté a été atteint. Le non-tissé 3D de cette quatrième campagne est également plus épais et plus perméable que les mousses PU. Ceci nous permet de dire qu'il présentera une meilleure sensation de confort en terme de ventilation. Il présente la même valeur de coefficient de conductivité thermique que la mousse m1 à cellule fermée. On peut donc dire que le non-tissé 3D et la mousse PU à cellules fermées présentent le même confort en terme d'isolation thermique mais avec un avantage supplémentaire au vu de sa bonne perméabilité à l'air. De plus, il est plus isolant thermiquement que la mousse à cellules ouvertes m2.

Dans le cas des produits multicouches, on observe que le produit VERTILAP® est plus lourd de 20% que le complexe automobile Cm. Ceci pourrait s'expliquer par les revêtements utilisés. En effet, il faudrait réaliser un contrecollage avec des couches de faibles masses surfaciques dans l'optique d'alléger au mieux l'étoffe complexe finale. Le produit VERTILAP® est également plus épais, moins perméable à l'air et moins isolant thermiquement que le complexe Cm. Ce résultat nous permet de dire que le choix du revêtement va jouer un rôle important au niveau des caractéristiques de perméabilité à l'air et d'isolation thermique du multicouche.

Les diagrammes radar des caractéristiques physiques présentées aux Figures 118 – 119 nous permettent de dire que les produits VERTILAP® et les mousses PU ne présentent pas le même comportement au vu des caractéristiques étudiées. On observe également que le non-tissé 3D est plus dense que les mousses m1 et m2 tandis que le multicouche est moins dense que le complexe automobile. Ceci nous laisse supposer que le multicouche VERTILAP présente un

meilleur toucher « soft » que le complexe automobile et inversement dans le cas des produits mono couches. On peut noter aussi, que dans le cadre des applications « automobile », seules les caractéristiques du complexe nous intéressent vraiment.

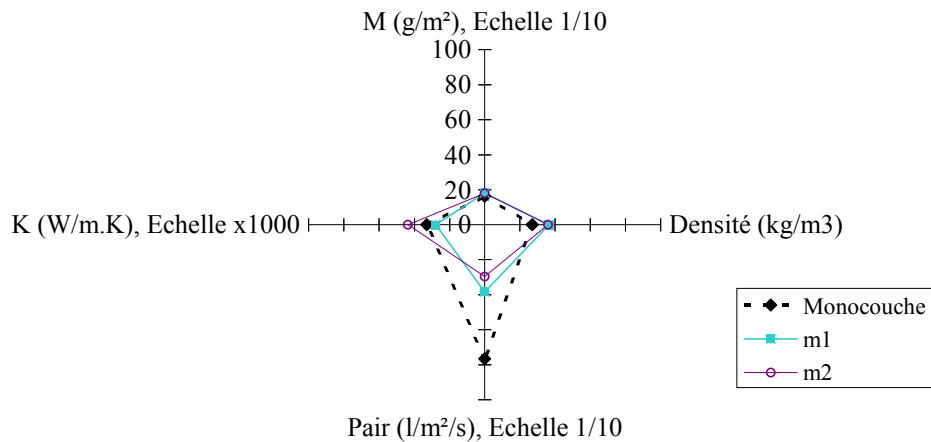


Figure 118. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits mono couches

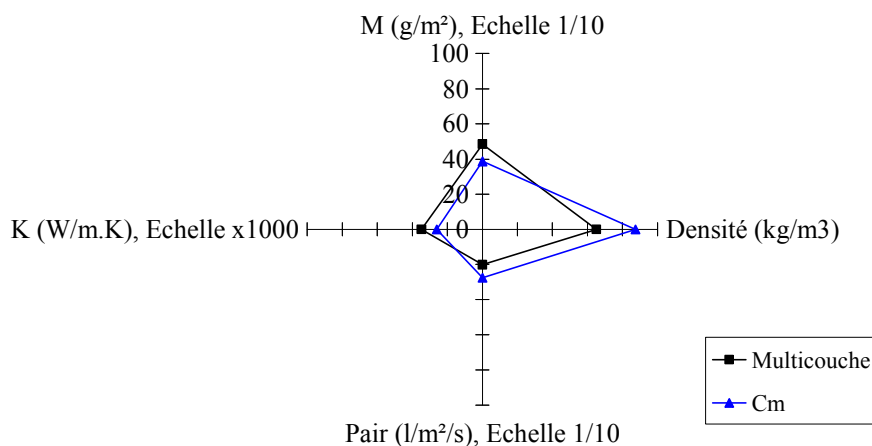


Figure 119. Diagramme radar des caractéristiques physiques des produits multicouches

3.2.2. Caractéristiques de compression

Les caractéristiques présentées dans cette étude sont celles du KES obtenues sur un cycle de compression. Tout comme pour la caractérisation des propriétés physiques, les résultats (Figure 120 et *annexe VIII.3*) montrent de fortes dispersions des non-tissés 3D comparativement aux mousses PU. Ceci nous montre une fois de plus que ces produits présentent un comportement non reproductible.

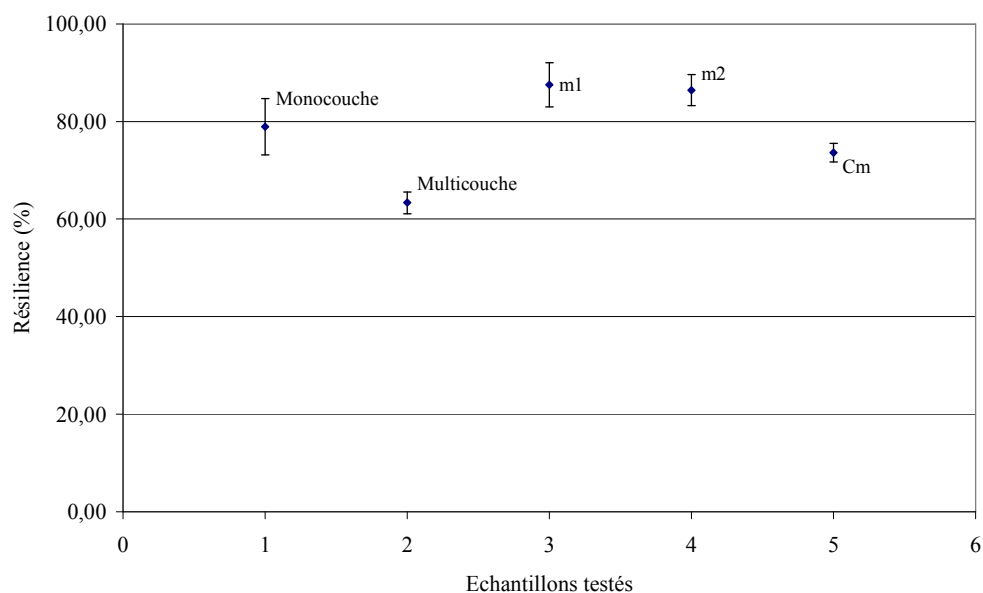


Figure 120. Résilience des produits VERTILAP® et des mousses PU

Dans le cas des produits mono couches, on observe que le non-tissé 3D est plus compressible et dissipe plus d'énergie que les mousses m1 et m2. Ceci nous permet donc de dire qu'il présentera un meilleur toucher « soft » et contribuera à une meilleure sensation à l'assise. Ces produits présentent le même comportement résilient. Ces résultats nous permettent de conclure qu'à résiliences égales, les non-tissés 3D plissés sont plus confortables que les mousses PU.

Dans le cas des produits multicouches, le produit VERTILAP® est moins compressible et dissipe plus d'énergie que le complexe automobile. Le comportement résilient de ces deux produits est quasiment identique. Nous pouvons donc conclure que le produit VERTILAP® présente de bonnes caractéristiques et pourraient être envisagé en remplacement de la mousse PU dans les étoffes complexes automobiles.

Les Figures 121 – 122 présentent les diagrammes radar des caractéristiques en compression des différents produits testés. Ces résultats montrent que les produits VERTILAP® et les produits mousses PU présentent pratiquement les mêmes performances en terme de résilience. Ils présentent des comportements différents en termes d'énergie dissipée et de compressibilité. Ceci nous permet donc de dire que ces deux produits sont représentatifs de deux types de confort différents.

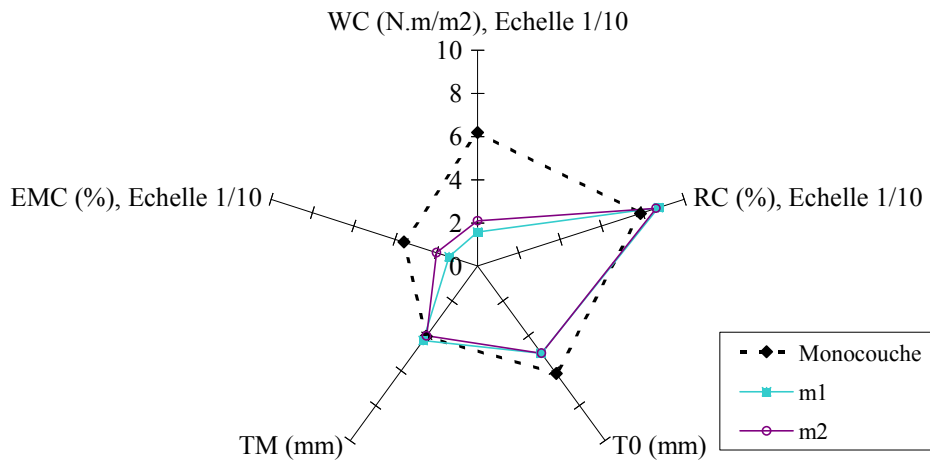


Figure 121. Caractéristiques en compression des produits mono couches

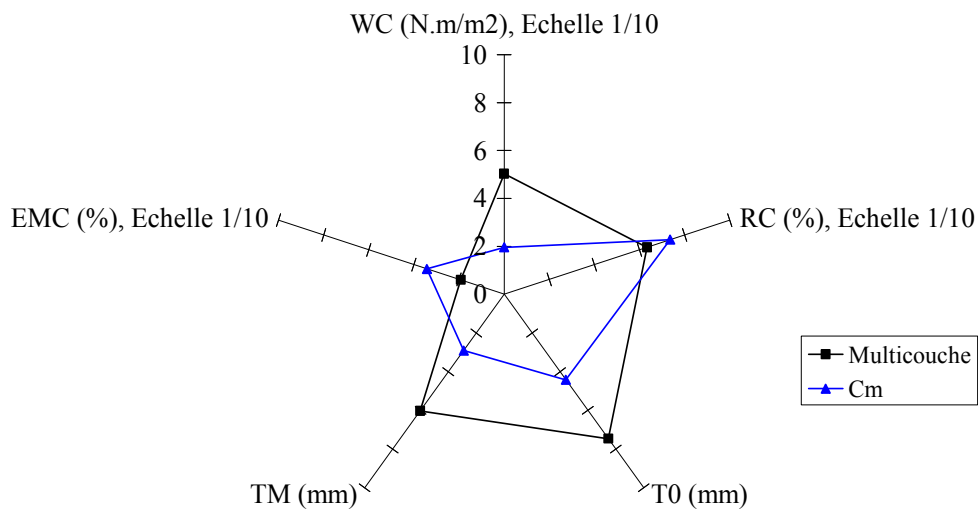


Figure 122. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits multicouches

On retrouve les mêmes observations au niveau des courbes de compression (Figure 123). Nous pouvons donc conclure que les différents produits testés ne présentent pas le même comportement.

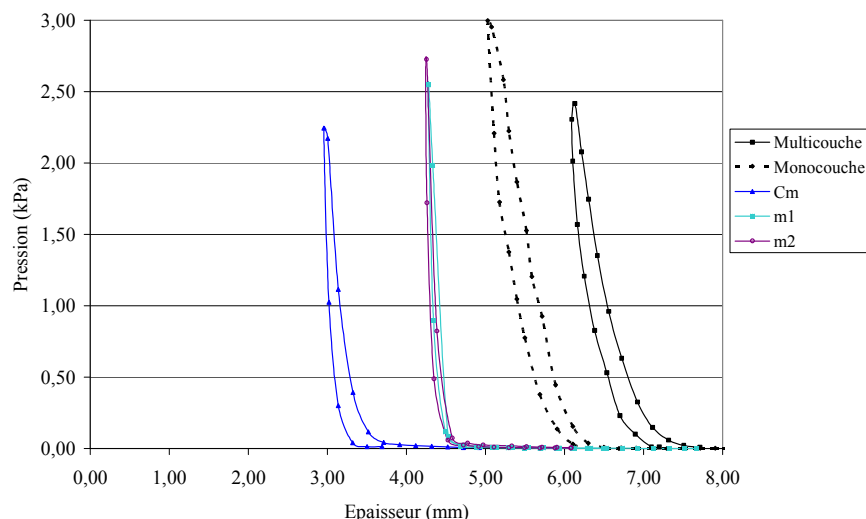


Figure 123. Courbes de compression des produits VERTILAP® et des mousses PU

3.3. Conclusions

Les résultats de caractérisation nous ont permis de mettre en évidence les progrès apportés à la mise au point du prototype expérimental VERTILAP® 20cm / 6mm au travers de l'amélioration des caractéristiques des non-tissés 3D obtenus. En effet, ces derniers présentent de meilleures performances tant au niveau des propriétés en compression que des propriétés géométriques. La dispersion des propriétés de ces produits est principalement attribuée à l'irrégularité de distribution des fibres sur la laize de la nappe.

L'étude comparative avec des mousses PU automobiles nous a permis de montrer que l'objectif fixé de légèreté a été atteint. De plus, nous avons pu montrer qu'à performances égales, les produits VERTILAP® présentaient de meilleure sensation de confort que les mousses PU testées.

4. Analyse des résultats

L'annexe VIII.4 présente les résultats des analyses statistiques. Le test de comparaison des moyennes a été réalisé après avoir vérifié l'hypothèse de normalité des données. Cette analyse a permis de montrer qu'aucune différence significative n'est observée entre les produits VERTILAP® et les mousses PU.

Les axes principaux A1 et A2 des cercles de corrélations représentent 70% de l'information traitée et les axes A1 et A3 représentent 63% de l'information. Nous avons tracé les cartes des produits et les cercles de corrélations suivant les axes principaux A1A2 et A1A3. Seules les variables *résilience*, *épaisseur* et *masse surfacique* sont situées à proximité du cercle de

corrélations (A1A2). L'axe A1 représente 41% de l'information. Les résultats montrent une corrélation positive entre l'épaisseur et l'énergie dissipée ainsi qu'entre cette dernière et la perméabilité à l'air.

Les cartes des produits (Figures 124 – 125) montrent que les produits VERTILAP® et les mousses présentent des comportements différents. Les résultats de ces deux analyses confirment les observations faites précédemment. Le produit VERTILAP® peut donc, dès à présent, être utilisé pour remplacer la mousse de PU et pour servir de matière première pour réaliser des pièces automobiles.

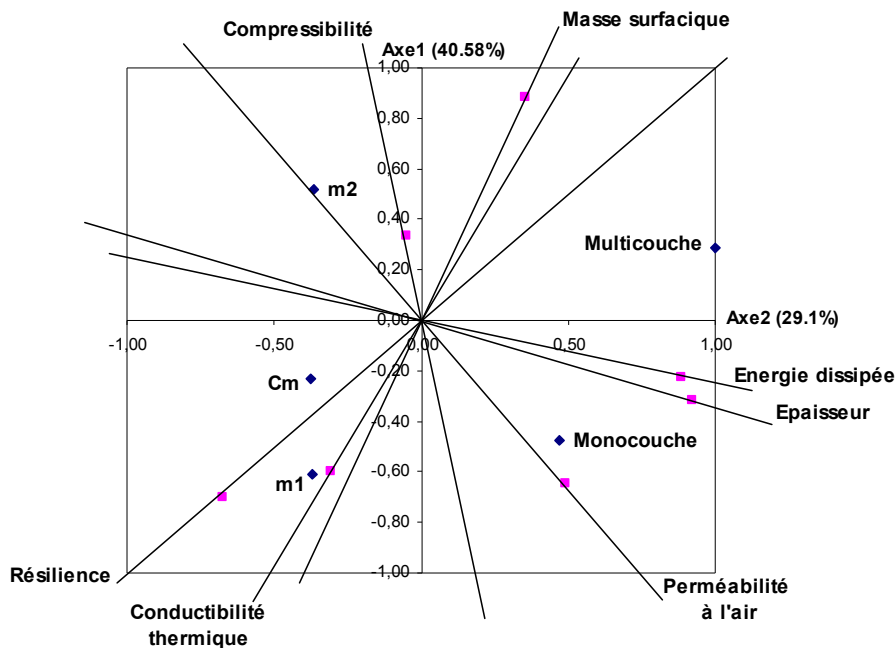


Figure 124. Carte des produits non-tissés 3D et mousses PU suivant les axes principaux A1A2

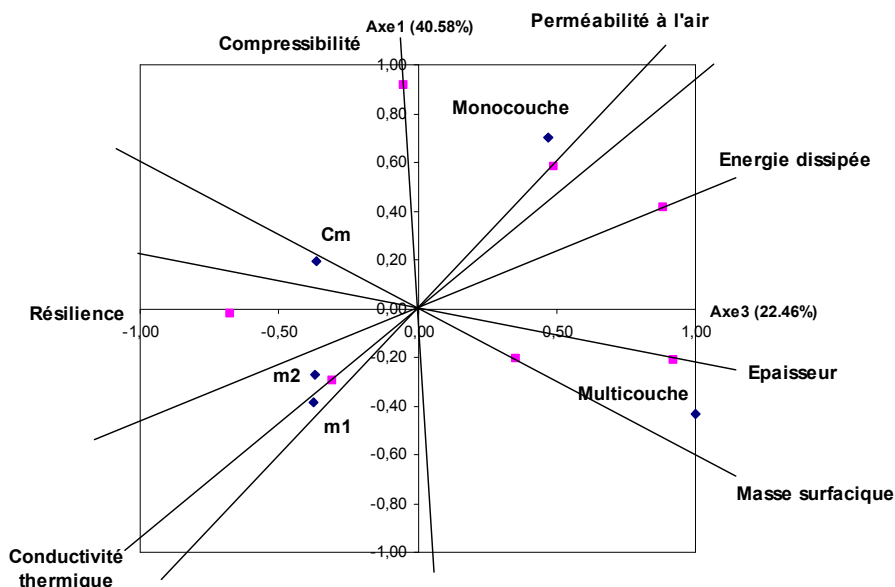


Figure 125. Carte des produits non-tissés 3D et mousses PU suivant les axes principaux A1A3

5. Réalisation de pièces automobiles

Afin d'évaluer l'aptitude à la formabilité des produits VERTILAP[®], nous avons réalisé une housse d'appui-tête et un panneau de porte de véhicule. Pour cela, nous avons utilisé comme modèle des pièces de voitures existantes. Ainsi, le modèle choisi pour l'appui-tête est celui d'un véhicule de marque Peugeot. La housse dans ce modèle est garnie suivant la technique traditionnelle d'enfilage du revêtement automobile. Les modèles de panneaux de porte présentés dans cette étude sont ceux des véhicules de marque Opel.

5.1. Housse d'appui-tête

La réalisation de la housse d'appui-tête a été effectuée en cinq étapes. La première étape a consisté à désenfiler la housse qu'on veut reproduire du bloc de mousse de l'appui-tête. La seconde étape a consisté à défaire les points de couture afin de pouvoir relever les mesures pour la réalisation du patron. Ces trois étapes sont illustrées à la Figure 126. Une fois les patrons réalisés, on a procédé à la découpe de l'étoffe complexe. Les différents morceaux d'étoffes ont été alors assemblés et confectionnés sur une machine à coudre industrielle. Les points de couture sont des points noués de type 301. La housse ainsi obtenue a pu être réenfilée sur le bloc de mousse de l'appui-tête.



Figure 126. Etapes d'obtention du modèle de la housse d'appui tête

Nous avons réalisé deux housses avec le multicouche non-tissé plissé et le complexe automobile Cm présentés précédemment. Les housses obtenues sont présentées à la Figure 127.

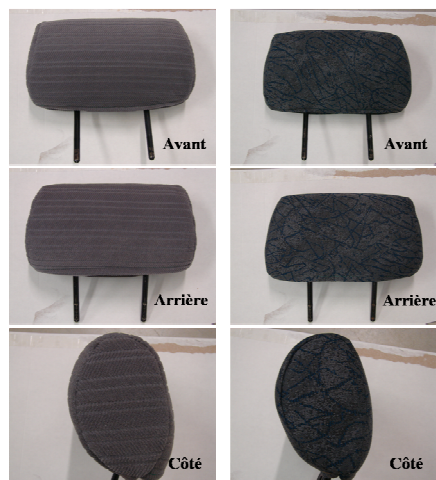


Figure 127. Housses d'appui-tête à partir du multicouche non-tissé 3D et du complexe automobile

5.2. Panneau de porte

La première étape de notre réalisation a été de séparer le panneau de porte de sa structure (Figure 128).



Figure 128. Modèle de porte

Une fois le panneau désolidarisé de sa structure, nous avons dans un premier temps, à l'aide d'une source de chaleur, décollé l'étoffe de revêtement automobile du panneau. Cette dernière a été utilisée pour réaliser le patron qui servira à découper l'étoffe de remplacement. La Figure 129 illustre ces quatre étapes.



Figure 129. Etapes d'obtention du modèle de l'étoffe complexe du panneau de porte

Après avoir délaminé le revêtement automobile du panneau de porte, la cinquième étape a été de le nettoyer avec de l'acétone afin d'éliminer toute trace de mousse laissée par le revêtement. Nous avons choisi de n'appliquer l'étoffe multicouche VERTILAP[®] que sur une partie du panneau comme le montre la Figure 130. Ceci permettra de comparer simultanément le toucher fourni par le produit VERTILAP[®] et celui fourni par le revêtement en mousse PU d'origine.



Figure 130. Panneau de porte

A cette étape, nous avons effectué des essais préliminaires afin de déterminer le type de colle adaptée au produit multicouche en non-tissé 3D plissé. En effet, la colle ne devrait pas pénétrer dans la structure plissée mais rester sur la surface de contact avec le panneau. Dans le cas où, la colle aurait pénétré dans la structure de l'étoffe, on aurait obtenu une mauvaise qualité de collage et une non homogénéité d'aspect du revêtement. Nous avons, lors de ces essais, testés des collages à l'aide d'une colle en néoprène liquide et à l'aide d'une colle en néoprène sous forme de bombe à pulvériser. La qualité d'aspect et de collage était meilleure avec la colle à pulvériser (Figure 131). Nous avons donc choisi ce type de colle pour réaliser

le panneau de porte. De plus, cette colle permet un collage immédiat. La durée de fixation est d'environ 24h.

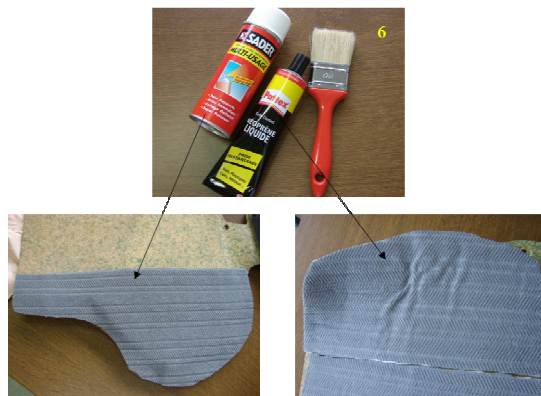


Figure 131. Choix du type de colle pour l'assemblage de l'étoffe et du panneau de porte

Après avoir assemblé l'étoffe de revêtement et le panneau de porte, nous avons procédé au remodelage des filetages de vis de fixation de la structure support du panneau de porte (Figure 132). Pour cela, nous avons utilisé de la pâte à remodeler à base de résines époxydiques. Une fois cette étape réalisée, le panneau de porte a pu être intégré dans sa structure.

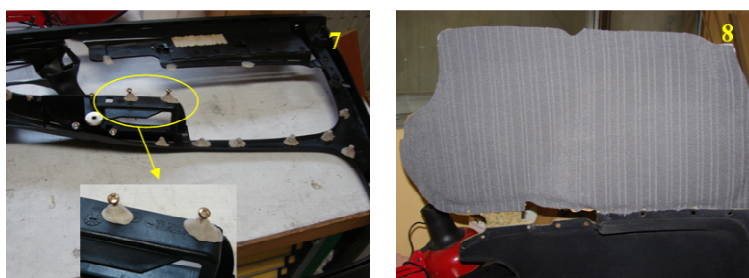


Figure 132. Assemblage du module de porte (à gauche) et du panneau de porte (à droite)

Les pièces obtenues sont présentées à la Figure 133.



Figure 133. Panneaux de porte à base de non-tissés 3D plissé

5.3. Conclusions

Les pièces automobiles réalisées ont permis de montrer la bonne aptitude à la formabilité des étoffes multicouches VERTILAP[®] pour des pièces présentant de forts angles de courbures et des surfaces gauches. La qualité d'aspect ainsi que le toucher fourni par le multicouche non-tissé 3D sont satisfaisants comparés aux revêtements complexes en mousse PU. Nous avons, par le biais de cette réalisation, démontré la faisabilité du prototype expérimental pour des applications d'habillage intérieur automobile.

6. Recommandations pour la mise au point du prototype expérimental

Les essais de production nous ont permis de mettre en évidence l'usure de la bande transporteuse des manchons de condensation. L'une des recommandations de cette campagne N° 4 est donc de changer cet élément afin d'éliminer les défauts d'ondulation qu'il induit dans la nappe plissée. Nous avons également pu montrer que le dispositif de séparation du câble, développé au terme de la campagne N° 3, n'était pas parfaitement adapté à une matière d'alimentation sous forme filamentaire. Cependant, ce dispositif convient très bien dans le cas où l'alimentation est réalisée par un voile sous forme de fibres. En effet, cette forme d'alimentation, plus régulière en terme de répartition fibreuse, ne présente pas des points d'enchevêtrement comme dans la nappe filamentaire.

7. Conclusions

Cette campagne d'essais N° 4 nous a permis de poursuivre la mise au point du prototype expérimental au travers des résultats de caractérisations des non-tissés 3D produits. Ces résultats ont permis de montrer que les produits obtenus lors de cette campagne présentent de meilleures caractéristiques physiques et mécaniques en compression que les produits des campagnes précédentes. Cependant, on relève toujours une non représentativité du comportement de ces nouveaux matériaux. L'étude comparative avec les mousses PU a permis de montrer que les non-tissés 3D plissés obtenus à ce stade de développement présentent des performances égales à celles des mousses PU avec de meilleures sensations de confort en termes de perméabilité à l'air, d'isolation thermique et également de toucher (toucher « soft »). Ces résultats rejoignent ceux obtenus au chapitre 4.5 et nous permettent donc de répondre par l'affirmative à la question posée au début de ce travail. Nous pouvons donc dire que ces non-tissés 3D se prêtent bien au remplacement de la mousse PU dans les applications d'habillage intérieur automobile. D'autre part, leur aptitude à la formabilité a été validée par la réalisation de pièces automobiles à forts angles de courbure. Au terme de cette campagne d'essais N° 4, nous pouvons donc affirmer que les produits VERTILAP[®]

présentent des caractéristiques satisfaisantes et peuvent par conséquent être utilisés en remplacement de la mousse PU. Ceci indique que les produits VERTILAP[®] pourraient désormais être appliqués à des secteurs autres que l'automobile.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

1. Conclusion générale

L'objectif du présent travail était de mettre au point un procédé permettant de produire un nouveau non-tissé 3D léger dans l'optique de remplacer les mousses polyuréthane utilisées dans les applications d'habillage intérieur automobile. Ce procédé de fabrication consiste à l'heure actuelle en un prototype expérimental de verticalisation VERTILAP[®], développé par le constructeur de machines N. SCHLUMBERGER. Afin d'obtenir ces nouveaux non-tissés 3D, nous avons apporté des améliorations au niveau du procédé de fabrication. Notre démarche a été d'effectuer le développement du procédé au travers des résultats de caractérisations physiques et mécaniques en compression des produits obtenus.

Nous avons, tout au long de ce travail, réalisé des campagnes d'essais de production et de caractérisations de ces produits. Quatre campagnes d'essais ont ainsi été menées, au terme de chacune d'elles, les observations effectuées au niveau du procédé de fabrication ainsi que les résultats de caractérisation nous ont permis d'apporter des améliorations au prototype expérimental VERTILAP[®].

Dans un premier temps, nous avons, au travers de la campagne d'essai N° 1, déterminé les paramètres de réglage ainsi que les limites de productivité du procédé de fabrication. Nous avons par la suite mis au point les méthodes de caractérisations physiques et mécaniques en compression adaptées à ces nouveaux matériaux. Les résultats de cette première campagne nous ont permis de mettre en évidence le fort caractère résilient de ces nouveaux matériaux ainsi que le défaut d'irrégularité induit par la préparation du câble d'alimentation.

La campagne d'essais N° 2 a permis, suite aux modifications du prototype, de mettre en évidence l'influence de l'irrégularité entrante de la matière d'alimentation et des vitesses d'entrée et de sortie de plissage sur le comportement des non-tissés 3D. Les améliorations induites par les résultats de la première campagne d'essai nous ont permis d'obtenir des produits présentant de meilleures caractéristiques, mais ces dernières n'étaient pas satisfaisantes. Il nous a donc fallu mener une troisième campagne d'essais.

La campagne d'essais N° 3 nous a permis de maîtriser les différents paramètres du procédé de fabrication et de l'optimiser. Ceci nous a alors permis d'obtenir des non-tissés 3D de bonnes qualités et présentant des caractéristiques satisfaisantes pour pouvoir être comparé aux mousses PU qu'ils devraient remplacer. Nous avons alors réalisé une étude comparative avec des mousses PU utilisées dans les applications d'habillage intérieur automobile. Les résultats de cette étude nous ont permis de montrer que les non-tissés 3D présentent des performances au moins égales, voire supérieures à celles des mousses PU testées ainsi que de bonnes sensations de confort en termes d'isolation thermique, de perméabilité à l'air, de toucher « soft » et contribueront donc à une bonne sensation de confort à l'assise. Cependant, ils ne

pouvaient toujours pas se substituer aux mousses de PU du fait de leur poids. Malgré les progrès apportés au prototype et au procédé de fabrication, les non-tissés 3D sont toujours marqués par une irrégularité due aux défauts initiaux des câbles d'alimentation. Au terme de cette troisième campagne d'essais, nous avons décidé de poursuivre les améliorations du prototype et du procédé afin d'obtenir des produits plus légers et si possible plus réguliers.

La campagne d'essai N° 4 nous a permis cette fois d'atteindre l'objectif de légèreté fixé en début de cette étude. Les résultats de comparaison avec les mousses PU automobiles nous ont conduit aux mêmes conclusions que pour la campagne N° 3 en termes de propriétés. Afin de démontrer la faisabilité du prototype pour des applications d'intérieurs automobiles, nous avons réalisé des pièces automobiles de types housse d'appui-tête et panneau de porte. Cette réalisation nous a permis de montrer que les produits non-tissés 3D présentaient de bonnes aptitudes à la formabilité et pouvaient donc être utilisés pour remplacer les mousses PU de ce type.

Les Tableaux 35 – 36 présentent la synthèse des caractéristiques des non-tissés 3D mono et multicouches obtenus lors des différentes campagnes d'essais. L'ensemble de ces résultats, nous permet de visualiser l'évolution du produit plissé. Nous pouvons donc valider notre démarche de développement procédé/produits.

En conclusion, ce travail de thèse a contribué à la mise au point d'un système de verticalisation de non-tissés 3D et au développement et à la caractérisation des non-tissés issus de ce nouveau procédé. L'ensemble des résultats obtenus a été pris en compte afin d'élaborer le cahier des charges de la prochaine version du prototype semi industriel qui est actuellement en cours de conception /fabrication. Ces résultats serviront également de base à la constitution du dossier technique des nouveaux matériaux issus de ce nouveau prototype.

Tableau 35. Caractéristiques des produits non-tissés 3D mono couches VERTILAP®

Caractéristiques étudiées	Campagne N° 1	Campagne N° 2	Campagne N° 3	Campagne N° 4
Masse surfacique, M (g/m ²)	272	260	448	164
Densité (kg/m ³)	54	47	76	27
Epaisseur, T ₀ (mm)	4	6	6	6
Angle de pli de la structure mono couche, θ (°)	79	70	41	37
Taux de compactage de la structure mono couche, T _{x_C} (%)	37	43	65	68
Irrégularité d'aspect, I _{reg} (%)	-	15	1	10
Perméabilité à l'air, P _{air} (l/m ² /s)	-	-	408	766
Conductivité thermique, K (w/m.K)	-	-	0,04	0,03
Compressibilité, EMC (%)	22	21	13	19
Energie dissipée, WC (N.m/m ²)	28	34	27	62
Résilience, RC (%)	66	72	86	79

Tableau 36. Caractéristiques des produits non-tissés 3D multicouches VERTILAP®

Caractéristiques étudiées	Campagne N° 3	Campagne N° 4
Masse surfacique, M (g/m ²)	642	484
Densité (kg/m ³)	101	65
Epaisseur, T ₀ (mm)	6	7
Angle de pli de la structure multicouche, θ' (°)	57	48
Taux de compactage de la structure multicouche, T' _{x_C} (%)	77	78
Perméabilité à l'air, P _{air} (l/m ² /s)	263	200
Conductivité thermique, K (w/m.K)	0,04	0,03
Compressibilité, EMC (%)	13	19
Energie dissipée, WC (N.m/m ²)	25	50
Résilience, RC (%)	66	63

2. Perspectives

Les perspectives de ce travail sont doubles. Elles se situent d'une part au niveau industriel, pour tout ce qui concerne le développement du prototype n+1, prenant en compte l'ensemble des informations récoltées au cours de cette première étude et d'autre part au niveau de la recherche scientifique pour les aspects de modélisation du procédé et modélisation mécanique du ou des produits réalisés.

2.1. Développements industriels

A court terme (18 mois), l'ensemble des informations récoltées au cours des 4 campagnes précédentes va permettre de développer un prototype semi industriel de nouvelle génération avec une laize de 1 m afin de produire des échantillons non plus à un stade expérimental, mais semi industriel. Ce prototype semi industriel devra également permettre la réalisation de tests de caractérisation industrielle telle que l'étude de la productivité et des vitesses de production (minimum et maximum).

Afin de s'affranchir des problèmes de régularité du câble entrant, il a été prévu de diversifier les matières d'alimentation en les choisissant sous forme de voile de non-tissés fait de fibres discontinues. Cette solution devra permettre d'obtenir une meilleure régularité du produit final en termes de distribution des fibres et de régularité de compactage. La Figure 134 présente un exemple de non-tissé 3D plissé à partir d'un voile de cardé bicomposant co-polyester/polyester.



Figure 134. Non-tissé 3D plissé à partir d'un voile de cardé

Ce prototype semi industriel de laize plus importante, devra permettre d'élargir les secteurs d'applications des produits VERTILAP[®] vers des domaines autres que l'automobile. Des domaines tels que l'isolation, l'ameublement, le médical, le chaussant, etc. semblent demandeurs de tels produits. La Figure 135 présente des exemples de produits VERTILAP[®] pour ces applications.

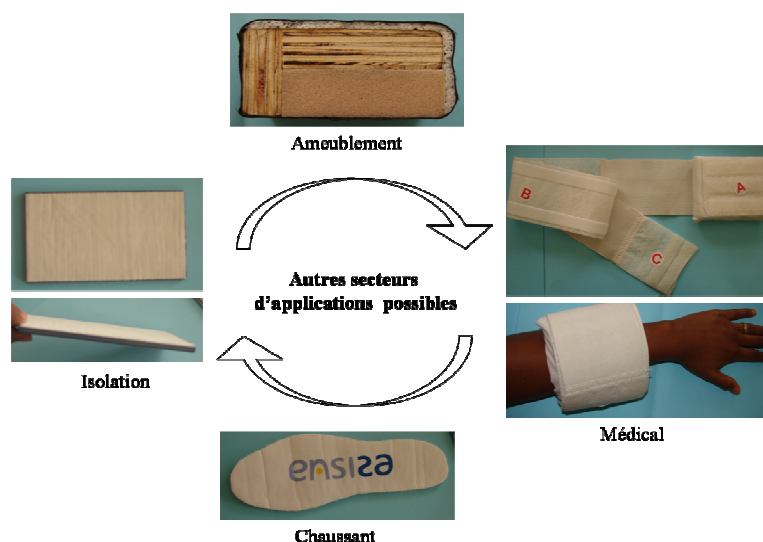


Figure 135. Autres secteurs d'applications des produits VERTILAP®

A plus long terme, le développement du prototype semi industriel, le développement de produits innovants utilisant le produit VERTILAP® devrait générer la fabrication de machines industrielles de plus grandes largeurs afin de répondre aux demandes du marché.

2.2. Recherche scientifique

Au vu de la particularité des non-tissés 3D plissés, il serait intéressant de poursuivre les études de caractérisation en compression de ces nouveaux matériaux par une étude en mode dynamique. Cette étude permettra d'obtenir des informations quant à la durée de vie de ces nouveaux produits pour des applications données. La modélisation du comportement des non-tissés 3D représentera également une étude intéressante à mener. Cette dernière devra s'appuyer sur les modèles géométriques de la structure plissée définis dans le présent travail. Les résultats de cette étude pourront être utilisés pour prévoir, dans des conditions données, le comportement de ces nouveaux matériaux.

Dans le cadre de l'évaluation du confort des produits VERTILAP®, on peut également envisager une étude du confort de ces matériaux par une approche par l'analyse sensorielle. A cet effet, les produits obtenus, à partir du prototype semi industriel, pourront être analysés par le panel entraîné du LPMT. De plus, une étude plus approfondie de la formabilité des nouveaux produits, issus du prototype semi industriel, pourra être menée. Cette étude permettra de valider l'aptitude à la formabilité observée lors de ce travail.

A partir de ce nouveau matériau, de nombreuses applications pourraient être envisagées et étudiées, une application dans le domaine de la filtration pourrait être judicieuse, au vu de sa

grande surface de contact générée par le plissage. Afin d'augmenter encore cette surface de contact, une enduction faite de nanofibres pourrait être envisagée. L'étude de l'interface entre ces deux éléments non-tissé 3D / web de nano filaments pourrait être particulièrement intéressante à mener. L'étude de cette composition particulière, au regard des propriétés en filtration, devrait être riche en information.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Directive 2000/53/CE du parlement Européen et du conseil du 18 septembre 2000 relative aux Véhicules hors d'Usage, Journal officiel des Communautés européennes, 2000
- [2] Marché des textiles techniques
www.clubtex.com
- [3] Etude sur les Textiles Techniques, Rapport de la Direction Générale des Entreprises (DGE), Juin 2005
<http://www.miriade-innovation.fr/upload/telechargement/textrap1.pdf>
- [4] Le textile en chiffres, Enquête réalisée par le Sessi (centre d'enquêtes statistiques) pour le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, 2007
- [5] J-J. Conroux, Les textiles techniques en 1998, TUT N°31, pp 14-16, 1^{er} trimestre 1999
- [6] G. Némoz, Les textiles (presque) partout dans l'automobile, TUT N° 32, pp16-18, 2^{ème} trimestre 1999
- [7] W. Fung, M. Hardcastle, Product engineering – Interior trim, Textiles in automotive engineering, The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, pp 194-211, 2001
- [8] J-C. Peyrache, Les textiles dans les moyens de transport, Actes du 61ème congrès de l'ACIT, pp 63-64, Lille, 8-9 juin 1995
- [9] B. T. Hoevel, Worldwide trends in automotive textiles, Melliand International N°4, pp 247-250, 1995
- [10] J-C. Caudron, Etude du marché du polyuréthane et Etat de l'art de ses techniques de recyclage, Rapport de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), 27 juin 2003
- [11] Les matériaux textiles utilisés dans les habitacles des véhicules de transport, Extraits du stage des 23 et 24 octobre 1990, 12, Institut Textile de France, Lyon, France, 1990
- [12] Lignes de produits automobiles
www.faurecia.fr
- [13] J. Hopkins, A comparative analysis of laminating automotive textiles to foam, Journal of coated fabrics, pp 250-267, janvier 1995

- [14] E. Drean, Contribution au développement de capteurs piézoélectriques pour la caractérisation mécanique des étoffes, Thèse de l'Université de Haute Alsace, France, 2006
- [15] P. Ehrler, W. Gündisch, J. Mavely, H. Schreiber, Comportement au vieillissement des textiles et d'équipements textiles intérieurs dans l'automobile, ITB Nontissés, Volume 4, Textiles Techniques, pp 28-31, 1997
- [16] C. Faucon, Les exigences fonctionnelles des matériaux de garnissage dans l'automobile, Actes du 61^{ème} congrès de l'ACIT, pp 65-80, Lille, 8-9 juin 1995
- [17] D. Masson, M-C. Trouy-Triboulot, Matériaux dérivés du bois, Techniques de l'ingénieur, C 928-15, août 2003
- [18] Dossier de presse Santé & Sécurité du consommateur, Institut Français du Textile et de l'Habillement, Mulhouse, France, 2008
- [19] Cahier des Charges prescrit pour les pièces et matériaux de l'habitacle d'une automobile, Visa Safe Automotive by IFTH, Institut français du Textile et de l'Habillement, Mulhouse, France, 25 mai 2007
- [20] G. F. Schmidt, W. Deininger, Anforderung der Automobilindustrie an Autotextilien, pp 595-620, Textilveredelung 23(1988)5, 1988
- [21] ISO 845 : Caoutchoucs et plastiques alvéolaires – Détermination de la masse volumique apparente, 2^{ème} Ed., 1988
- [22] ISO 3795 : Véhicules routiers et tracteurs et matériels agricoles et forestiers – Détermination des caractéristiques de combustion des matériaux intérieurs, 1989
- [23] ISO 1856 : Matériaux polymères alvéolaires souples – Détermination de la déformation rémanente après compression, 3^{ème} Ed., 2000
- [24] ISO 8067 : Matériaux polymères alvéolaires souples – Détermination de la résistance au déchirement, 1^{ère} Ed., 1989
- [25] ISO 3386/1 : 1986, Polymeric materials, cellular flexible – Determination of stress-strain characteristics in compression – Part 1 : Low density materials, 1986
- [26] ISO 1798 : Matériaux polymères alvéolaires souples – Détermination de la résistance à la traction et à l'allongement à la rupture, 2^{ème} Ed., 1983
- [27] What is PU?, Publication of the International Development Centre of Recticel company
<http://www.idcpuresearch.com/downloads.htm>

- [28] J-C. Berthier, Polyuréthanes PUR, Techniques de l'ingénieur, AM3425v2, pp 1-20, janvier 2009
- [29] N. Njeugna, O. Demangeat, D. C. Adolphe, L. Schacher, J-B. Schaffhauser & P. Strehle, 3D nonwoven system for automotive interior applications, Textile & plastics, 6th International Conference on Automotive and Transport Interior Decoration, Dec'autex 2008, Mulhouse, France, November 26th to 27th 2008
- [30] A. E. Kamprath, End-of-Life vehicles Recovery and Recycling polyurethanes Car Components Options Analysis, Recticel, 2004
<http://www.idcpuresearch.com/downloads.htm>
- [31] B. Persijn, PU-foams in automotive, Textile & plastics, 6th International Conference on Automotive and Transport Interior Decoration, Dec'autex 2008, Mulhouse, France, november 26th to 27th 2008
- [32] O. Demangeat, Analyse économique et veille technologique, documents N. Schlumberger, 2000
- [33] G. Nemoz, Textures Textiles Tridimensionnelles, Techniques de l'ingénieur, AM5122, pp 1-14, 10 octobre 2003
- [34] L. Caramaro, Textiles à Usages Technique, Techniques de l'ingénieur, N2511, pp 1-8, 10 avril 2006
- [35] G. Némoz, Des solutions textiles pour l'automobile, TUT N° 71, Editorial, 1^{er} trimestre 2009
- [36] L. Caramaro, G. Némoz, Fibres, fils et textiles à usage technique, Techniques de l'ingénieur, N2512, pp 1-8, 10 avril 2006
- [37] Non-tissé 3D Struto[®], Struto International Inc.
<http://www.struto.com/>
- [38] H. Erth, Non-tissés 3D recyclables pour sièges, TUT, N° 37, pp 72-74, 3^{ème} trimestre 2000
- [39] Textiles Techniques, Karl Mayer Group
<http://www.karlmayer.com/>
- [40] S. Vasile, L. V. Langenhove, S. de Meulemeester, Effect of Production Process Parameters on Different Properties of a Nonwoven Spacer produced on a 3D Web Linker[®], FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 14, N°4 (58), pp 68-74, october/december 2006

- [41] Projet VERTILAP, Appel à projet Recherche et Développement Région Alsace, 2006
- [42] J-L. Dumas, J-B. Schaffhauser, Brevet N° WO2007125248, N. Schlumberger, 2007
- [43] Flatbed laminating system of the Meyer Company, Maschinen Fabrik Herbert Meyer GmbH, Germany
www.meyer-machines.com
- [44] S. Kawabata, « The standardization and analysis of hand evaluation » 2nd ed., The Textile Machinery Society of Japan, Osaka, 1980
- [45] P. Grosberg, C. Iype, Yarn Production Theoretical Aspects, The Textile Institute, ISBN 1870372034, p19, 1999
- [46] P. R. Lord, Handbook of yarn production Technology, science and economics, The Textile Institute, Woodhead Publishing Limited, ISBN 1855736969, p 13, pp 40-48, 2003
- [47] Multiple Authors, Manual for KES-FB3 Compression tester, The second edition, Kato Tech Co. Ltd
- [48] Multiple Authors, « KES-FB System Calculation Program », KES-FB CALC. Ver.6.36E, Kato Tech Co. Ltd
- [49] Tables statistiques, Centre d'Enseignement et de Recherche de Statistique Appliquée, ISBN 2-901758-06-01, 1991
- [50] D. Dupuis, Cours de statistiques, 1^{ère} année ingénieur textile, ENSISA
- [51] Auteurs Multiples, Evaluation sensorielle - Statistique, Collection Sciences & Techniques Agroalimentaires, pp 227-269, 2^{ème} Edition, ISBN 2-7430-0124-0
- [52] S. Ben Saïd, Contribution à l'évaluation par analyse sensorielle du toucher des étoffes – Influence des paramètres de structure – Interaction vue/toucher, Thèse de doctorat de l'Université de Haute Alsace, 2007
- [53] J-F. Le Magnen, Cours de métrologie textile, 2^{ème} année Ingénieur Textile, ENSISA
- [54] Machine de convertissage Converter TT12, N. SCHLUMBERGER
www.nsc.fr
- [55] Norme BS 5'636, Méthode pour déterminer la perméabilité à l'air des étoffes, 1990
- [56] Multiple Authors, Manual for KES-F7 Thermo Labo II, The second edition, Kato Tech Co. Ltd

- [57] Recticel, A new method to measure the cell diameter of polyurethane foam, Edition 1, juin 1999
- [58] X. Ravary, X. Jabot, Caractérisations de foams polyurethane, projet Ingénieur ENSITM, 2001
- [59] Matelassure en mousse souple de mélamine et ses applications, brevet WO/2003/072391, 2003
- [60] Gibson, L.J., Ashby, M.F., Cellular solids, Pergamon Press, Oxford, 1992

ANNEXES

- [61] Tissus techniques double paroi, TISSAVEL INTERNATIONAL SAS,
http://www.tissavel.fr/FR/PT_multiparois.html
- [62] ISO 9092 : Textiles – Non-tissé – Définition, 1988
- [63] What are Nonwovens, EDANA
www.edana.org
- [64] M. Carrega, Les polymères : de la molécule à l'objet, EDP Sciences, p7, ISBN 2-86883-390-X, 1999

ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES	214
LISTE DES FIGURES DES ANNEXES	220
LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES	227
ANNEXE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	228
I.1. Procédés de contrecollage	228
I.1.1. Le flammage.....	228
I.2. Les procédés de contrecollage par voie sèche.....	228
I.2.1. Laminage par poudre	229
I.2.2. Laminage par voiles ou films.....	229
I.2. La mousse polyuréthane.....	230
I.2.1. Méthodes de mise en oeuvre	230
I.2.2. Différents types de recyclage	231
I.2.2.1. Recyclage mécanique	231
I.2.2.2. Recyclage chimique.....	232
I.2.2.3. Recyclage thermique.....	233
I.3. Description des textiles 3D	233
I.3.1. Les tissus	233
I.3.2. Les tricots	235
I.3.3. Les non-tissés	236
ANNEXE II : PRESENTATION DU TRAVAIL	237
II.1. Fiche technique du câble d'alimentation	237
II.2. Analyse enthalpique différentielle	238
II.3. Fiches techniques – Liants de contrecollage.....	239

ANNEXE III : PRESENTATION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL	
VERTILAP®	240
III.1. Procédé d'extrusion	240
III.2. Traction du câble d'alimentation	241
III.3. Mesures expérimentales de vitesses	242
III.3.1. Mesure de la vitesse de plissage	242
III.3.2. Mesure des vitesses d'entrée de verticalisation et d'extraction.....	243
ANNEXE IV : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 1	245
IV.1. Paramètres de production	245
IV.2. Détermination de la méthode du test de compression	246
ANNEXE V : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 2	248
V.1. Programme de calcul pour le traitement d'images sous Matlab®	248
V.2. Paramètres de caractérisation mesurées.....	249
V.3. Caractéristiques physiques.....	251
V.5. Analyses statistiques.....	254
V.5.1. Test d'ajustement du Khi2	254
V.5.2. Test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov	254
V.5.3. Test de Friedman	255
V.5.4. Test de comparaison des variances	256
V.5.4.1. Cas d'une population de taille réduite	256
V.5.4.2. Cas d'une population de taille élevée.....	256
V.5.5. Test de comparaison des moyennes	257
V.5.5.1. Cas d'une population de taille réduite	257
V.5.5.2. Cas d'une population de taille élevée.....	257
V.5.6. Analyse en Composantes Principales.....	258

V.6. Résultats des analyses statistiques	259
V.6.1. Comparaison des variances et des moyennes.....	259
V.6.2. Résultats de l'ACP	262
ANNEXE VI : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 3.....	264
VI.A. ETUDE DES NON-TISSES 3D.....	264
VI.A.1. Compléments de caractérisations	264
VI.A.1.1. Test de perméabilité à l'air.....	264
VI.A.1.2. Test de conductivité thermique.....	264
VI.A.2. Caractéristiques mesurées	265
VI.A.3. Caractéristiques physiques	269
VI.A.4. Caractéristiques mécaniques en compression	272
VI.A.5. Résultats des analyses statistiques.....	273
VI.A.5.1. Comparaison des variances et des moyennes	273
VI.A.5.2. Résultats de l'ACP	275
VI.B. ETUDE DE L'INFLUENCE DES COUCHES DE CONTRECOLLAGE	279
VI.B.1. Caractéristiques mesurées.....	279
VI.B.2. Caractéristiques physiques.....	287
VI.B.2.1. Graphiques	287
VI.B.2.2. Diagrammes radar	288
VI.B.3. Caractéristiques mécaniques en compression.....	290
VI.B.3.1. Graphiques	290
VI.B.3.2. Diagrammes radar	291
VI.B.3.3. Courbes de compression.....	293
VI.B.4. Résultats des analyses statistiques.....	294
VI.B.4.1. Comparaison des variances et des moyennes.....	294
VI.B.4.2. Analyse en Composantes Principales.....	301

VI.C. ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CONTRECOLLAGE	302
VI.C.1. Caractéristiques mesurées.....	302
VI.C.2. Caractéristiques physiques.....	310
VI.C.2.1. Graphiques	310
VI.C.2.1.1. Produits de type c	310
VI.C.2.1.2. Produits de type d	311
VI.C.2.1.3. Produits de type e	313
VI.C.2.2. Diagrammes radar	314
VI.C.2.2.1. Produits de type c	314
VI.C.2.2.2. Produits de type d	315
VI.C.2.2.3. Produits de type e	316
VI.C.3. Caractéristiques mécaniques en compression.....	318
VI.C.3.1. Graphiques	318
VI.C.3.1.1. Produits de type c	318
VI.C.3.1.2. Produits de type d	320
VI.C.3.1.3. Produits de type e	322
VI.C.3.2. Diagrammes radar	324
VI.C.3.2.1. Produits de type c	324
VI.C.3.2.2. Produits de type d	326
VI.C.3.2.3. Produits de type e	328
VI.C.3.3. Courbes de compression.....	330
VI.C.3.3.1. Produits de type c	330
VI.C.3.3.2. Produits de type d	332
VI.C.3.3.3. Produits de type e	334

VI.C.4. Résultats des analyses statistiques	336
VI.C.4.1. Comparaison des variances et des moyennes.....	336
VI.C.4.1.1. Produits de type c.....	336
VI.C.4.1.2. Produits de type d	339
VI.C.4.1.3. Produits de type e.....	342
VI.C.4.2. Analyse en Composantes Principales.....	345
VI.C.4.2.1. Produits de types c, d et e	345
VI.C.4.2.2. Produits de type c.....	346
VI.C.4.2.3. Produits de type d	349
VI.C.4.2.4. Produits de type e.....	351
ANNEXE VII : ETUDE NON-TISSES 3D Vs. MOUSSES PU.....	354
VII.1. Caractéristiques mesurées	354
VII.2. Caractéristiques physiques.....	356
VII.3. Caractéristiques mécaniques en compression	358
VII.3.1. Compression sur un cycle.....	358
VII.3.2. Compression sur cinq cycles	359
VII.4. Résultats des analyses statistiques	363
VII.4.1. Analyse en Composantes Principales	363
VII.4.2. Comparaison des variances et des moyennes	364
VII.4.2.1. Les produits mono couches.....	364
VII.4.2.2. Les produits multicouches	366
ANNEXE VIII : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D’ESSAIS N° 4.....	370
VIII.1. Caractéristiques mesurées.....	370
VIII.2. Caractéristiques physiques.....	372
VIII.3. Caractéristiques mécaniques en compression.....	373
VIII.4. Résultats des analyses statistiques	375

VIII.4.1. Comparaison des variances et des moyennes.....	375
VIII.4.2. Analyse en Composantes Principales.....	376

LISTE DES FIGURES DES ANNEXES

Figure 1. Principe du contrecollage à la flamme	228
Figure 2. Principe du laminage par poudre (a), système d'applicateur de poudre (b).....	229
Figure 3. Principe du laminage par voile/film	230
Figure 4. Schéma d'une installation de fabrication en continu de blocs de mousse souple ..	230
Figure 5. Schéma d'une installation de fabrication de mousses moulées par injection	231
Figure 6. Procédé de recyclage par broyage et enrobage	232
Figure 7. Procédé de recyclage chimique par glycolyse développé par la société REGRA ..	233
Figure 8. Exemple d'un tissu 3D double paroi conçu par Tissavel	234
Figure 9. Structure d'un tissu 3D avec disposition des poils en V	234
Figure 10. Principe de fabrication d'un tissage velours sur un métier ratière	234
Figure 11. Exemple d'un tricot 3D	235
Figure 12. Métier à tricoter double fonture de Karl Mayer Textilmaschinenfabrik GmbH...	235
Figure 10. Schéma de principe de la formation d'un tricot double paroi	236
Figure 14. Courbe de DSC du câble bicomposant polyester	238
Figure 15. Procédé d'extrusion.....	240
Figure 16. Différentes formes de sections des trous d'une filière d'extrusion.....	241
Figure 17. Comportement en traction du câble d'alimentation bicomposant COPET/PET...	242
Figure 18. Relation entre la vitesse mesurée de plissage V_p et la vitesse de la machine V_T ..	243
Figure 19. Relation entre V_{ev} et V_{ex} en fonction de V_T	244
Figure 20. Epaisseur des échantillons testés.....	251
Figure 21. Masse surfacique des échantillons testés	252
Figure 22. Epaisseur après compression des échantillons testés	253
Figure 23. Compressibilité des échantillons testés.....	253
Figure 24. Energie dissipée lors de la compression des échantillons testés	254

Figure 25. Projection orthogonale des produits suivant l'axe de la variable <i>résilience</i>	262
Figure 26. Carte des produits.....	263
Figure 27. Projection orthogonale suivant l'axe des variables <i>titre</i> et <i>irrégularité</i>	263
Figure 28. Configuration adaptée du test de perméabilité à l'air	264
Figure 29. Configuration personnalisée du test de conductivité thermique	265
Figure 30. Masse surfacique des échantillons testés	269
Figure 31. Densité des échantillons testés	269
Figure 32. Epaisseur des échantillons testés.....	270
Figure 33. Angle de pli des échantillons testés	270
Figure 34. Taux de compactage des échantillons testés	271
Figure 35. Perméabilité à l'air des échantillons testés.....	271
Figure 36. Conductivité thermique des échantillons testés	272
Figure 37. Epaisseur après compression des échantillons testés	272
Figure 38. Compressibilité des échantillons testés.....	273
Figure 39. Energie dissipée lors de la compression des échantillons testés	273
Figure 40. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	275
Figure 41. Carte des produits testés.....	276
Figure 42. Projection orthogonale des produits suivant l'axe de la variable <i>conductivité thermique</i>	276
Figure 43. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication.....	277
Figure 44. Carte des produits.....	278
Figure 45. Projection orthogonale suivant l'axe de la variable <i>conductivité thermique</i>	278
Figure 46. Masse surfacique des échantillons testés	287
Figure 47. Epaisseur des échantillons testés.....	287
Figure 48. Perméabilité à l'air des échantillons testés.....	288

Figure 49. Caractéristiques physiques des produits dérivés de NT2	288
Figure 50. Caractéristiques physiques des produits dérivés de NT3	289
Figure 51. Caractéristiques physiques des produits dérivés de NT	289
Figure 52. Epaisseur après compression des produits testés	290
Figure 53. Compressibilité des produits testés	290
Figure 54. Energie dissipée des produits testés	291
Figure 55. Caractéristiques mécaniques en compression des produits dérivés de NT2	291
Figure 56. Caractéristiques mécaniques en compression des produits dérivés de NT3	292
Figure 57. Caractéristiques mécaniques en compression des produits dérivés de NT4	292
Figure 58. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT2	293
Figure 59. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT3	293
Figure 60. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT4	294
Figure 61. Cercle de corrélation entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	301
Figure 62. Masse surfacique des produits de type c	310
Figure 63. Epaisseur des produits de type c	310
Figure 64. Perméabilité à l'air des produits de type c	311
Figure 65. Masse surfacique des produits de type d	311
Figure 66. Epaisseur des produits de type d	312
Figure 67. Perméabilité à l'air des produits de type d	312
Figure 68. Masse surfacique des produits de type e	313
Figure 69. Epaisseur des produits de type e	313
Figure 70. Perméabilité à l'air des produits de type e	314
Figure 71. Caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT2	314
Figure 72. Caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT3	315
Figure 73. Caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT4	315

Figure 74. Caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT2	315
Figure 75. Caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT3	316
Figure 76. Caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT4	316
Figure 77. Caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT2.....	316
Figure 78. Caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT3.....	317
Figure 79. Caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT4.....	317
Figure 80. Epaisseur après compression des produits de type c.....	318
Figure 81. Compressibilité des produits de type c.....	318
Figure 82. Energie dissipée lors de la compression des produits de type c.....	319
Figure 83. Caractéristiques en compression des produits de type c	319
Figure 84. Epaisseur après compression des produits de type d	320
Figure 85. Compressibilité des produits de type d	320
Figure 86. Energie dissipée lors de la compression des produits de type d	321
Figure 87. Caractéristiques en compression des produits de type d.....	321
Figure 88. Epaisseur après compression des produits de type e.....	322
Figure 89. Compressibilité des produits de type e.....	322
Figure 90. Energie dissipée lors de la compression des produits de type e.....	323
Figure 91. Caractéristiques en compression des produits de type e	323
Figure 92. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits de type c dérivés de NT1.....	324
Figure 93. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type c dérivés de NT2	324
Figure 94. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type c dérivés de NT3	325
Figure 95. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type c dérivés de NT4	325
Figure 96. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits de type d dérivés de NT1.....	326

Figure 97. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type d dérivés de NT2	326
Figure 98. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type d dérivés de NT3	327
Figure 99. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type d dérivés de NT4	327
Figure 100. Diagrammes radar des caractéristiques en compression des produits de type e dérivés de NT1	328
Figure 101. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type e dérivés de NT2	328
Figure 102. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type e dérivés de NT3	329
Figure 103. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type e dérivés de NT4	329
Figure 104. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT1	330
Figure 105. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT2	330
Figure 106. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT3	331
Figure 107. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT4	331
Figure 108. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT1	332
Figure 109. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT2	332
Figure 110. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT3	333
Figure 111. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT4	333
Figure 112. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT1	334
Figure 113. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT2	334
Figure 114. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT3	335
Figure 115. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT4	335
Figure 116. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de types c, d et e – Axes A1A2	345

Figure 117. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de types c, d et e – Axes A1A3	346
Figure 118. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type c – Axes A1A2	347
Figure 119. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type c – Axes A1A3	347
Figure 120. Carte des produits de type c – Axes A1A2	348
Figure 121. Carte des produits de type c – Axes A1A3	348
Figure 122. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type d – Axes A1A2	349
Figure 123. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type d – Axes A1A3	350
Figure 124. Carte des produits de type d – Axes A1A2	350
Figure 125. Carte des produits de type d – Axes A1A3	351
Figure 126. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type e – Axes A1A2	352
Figure 127. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type e – Axes A1A3	352
Figure 128. Carte des produits de type e – Axes A1A2	353
Figure 129. Carte des produits de type e – Axes A1A3	353
Figure 130. Masse surfacique des produits non-tissés 3D et des mousses PU.....	356
Figure 131. Epaisseur des produits testés.....	356
Figure 132. Densité des produits testés	357
Figure 133. Perméabilité à l’air des produits testés.....	357
Figure 134. Epaisseur après compression des produits testés	358
Figure 135. Compressibilité des produits testés	358
Figure 136. Energie dissipée lors de la compression.....	359
Figure 137. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT2.....	359

Figure 138. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT3	360
Figure 139. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT4	360
Figure 140. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a2	360
Figure 141. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a3	361
Figure 142. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a4	361
Figure 143. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b2	361
Figure 144. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b3	362
Figure 145. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b4	362
Figure 146. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A2	363
Figure 147. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A3	364
Figure 148. Masse surfacique des produits VERTILAP [®] et des mousses PU	372
Figure 149. Epaisseur des produits VERTILAP [®] et des mousses PU	372
Figure 150. Perméabilité à l'air des produits VERTILAP [®] et des mousses PU	373
Figure 151. Epaisseur après compression des produits VERTILAP [®] et des mousses PU	373
Figure 152. Compressibilité des produits VERTILAP [®] et des mousses PU	374
Figure 153. Energie dissipée des produits VERTILAP [®] et des mousses PU	374
Figure 154. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A2	376
Figure 155. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A3	377

LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES

Tableau 1. Mesure expérimentale de la vitesse de plissage	242
Tableau 2. Mesure expérimentale des vitesses V_{ev} et V_{ex}	243
Tableau 3. Paramètres de fabrication lors de la campagne d'essais N °1	245
Tableau 4. Résultats de compression issus de la méthode de test n° 1.....	246
Tableau 5. Résultats de compression issus de la méthode de test n° 2.....	246
Tableau 6. Moyenne de l'ensemble des résultats obtenus des méthodes de test n° 1, 2 et 3 .	247
Tableau 7. Coefficients de corrélation entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication	262
Tableau 8. Résultats du test de comparaison des variances et des moyennes	273
Tableau 9. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	275
Tableau 10. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres variables de fabrication.....	277
Tableau 11. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	301
Tableau 12. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de types c, d et e.....	345
Tableau 13. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type c	346
Tableau 14. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type d.....	349
Tableau 15. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type e	351
Tableau 16. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	363
Tableau 17. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression	376

ANNEXE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Procédés de contrecollage

I.1.1. Le flammage

Encore appelé contrecollage à la flamme, ce procédé est dit traditionnel car le plus anciennement utilisé pour l'assemblage d'étoffes multicouches. Le principe du flammage est illustré par la Figure 136. Il consiste à chauffer la surface de la mousse à l'aide d'un brûleur de manière à la faire fondre. Un système d'aspiration est mis en place pour évacuer les fumées générées lors du brûlage. Le matériau fondu servira d'adhésif pour l'assemblage avec le revêtement textile d'aspect. L'ensemble sera ensuite calandré. Cette opération peut être répétée sur l'envers afin de contrecoller une doublure textile.

La technique de contrecollage à la flamme est un procédé rapide pouvant atteindre une vitesse maximum de 25 m/min. Il présente aussi l'avantage d'être peu onéreux, par contre, il n'est pas respectueux de l'environnement de par les émissions de fumées toxiques qu'il génère. De ce fait, de nouveaux procédés tels que les procédés par voie sèche ont été mis au point.

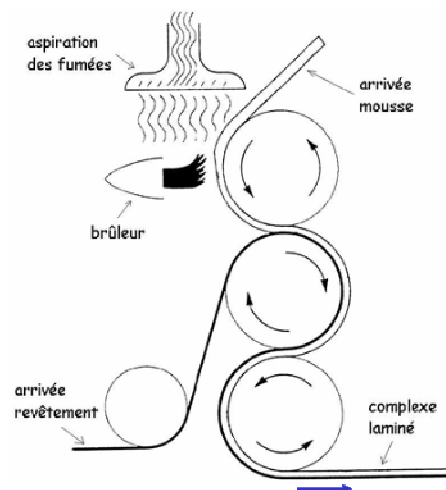


Figure 136. Principe du contrecollage à la flamme [13]

I.2. Les procédés de contrecollage par voie sèche

Il s'agit de procédés plus récents utilisant des adhésifs thermocollants sous forme de poudre, de voiles ou de films. Ces procédés sont plus coûteux et moins rapides que celui du flammage. Ils peuvent atteindre une vitesse maximum de 16 m/min. Ils sont en revanche plus respectueux de l'environnement.

I.2.1. Laminage par poudre

Les adhésifs en poudre se présentent initialement sous forme de granulés. Ces derniers sont ensuite transformés en poudre par broyage cryogénique. Le principe du procédé est illustré à la Figure 137a. Un système applicateur de poudre (Figure 137b) permet de déposer l'adhésif poudreux sur la surface de la mousse à laminier. Ce système est constitué d'une trémie de stockage, d'un cylindre recouvert d'aiguilles courtes et d'une brosse. Il est positionné au-dessus du tapis de convoyage sur lequel défile la mousse. La poudre est tassée sous l'effet de son propre poids entre les aiguilles du cylindre. À l'aide d'une brosse disposée sur le côté du cylindre, la poudre est enlevée des aiguilles et déposée sur la surface de la mousse. L'ensemble mousse-adhésif est alors introduit dans un four et chauffé par rayonnement infra-rouge. À cette étape, le revêtement textile, préalablement chauffé à la même température que l'ensemble mousse-adhésif, est introduit dans le procédé afin de former l'étoffe multicouche. Cette dernière est refroidie afin de consolider la liaison entre les deux couches mousse et textile. Après refroidissement, la structure complexe est calandree et stockée par enroulement en sortie du procédé de fabrication.

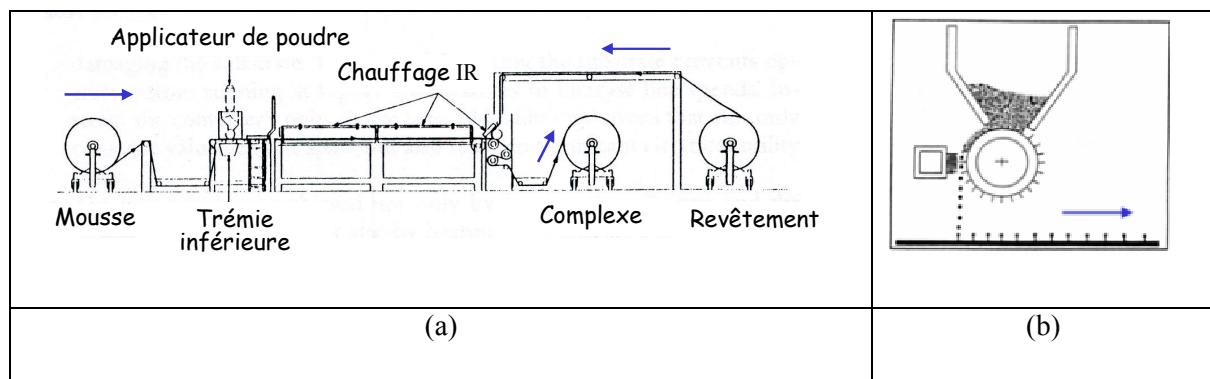


Figure 137. Principe du laminage par poudre (a), système d'applicateur de poudre (b) [13]

I.2.2. Laminage par voiles ou films

L'adhésif, initialement sous forme de granulés, est fondu et extrudé afin d'obtenir un film fin ou un voile de non-tissé. Le principe du laminage par voiles ou films est similaire à celui du laminage par poudre (Figure 138). La mousse et l'adhésif sont déroulés et introduits en même temps dans la ligne de fabrication. L'adhésif est placé sur la surface de la mousse et l'ensemble est chauffé par rayonnement infra-rouge au travers d'un four. Le revêtement textile est préalablement chauffé à la même température que l'ensemble mousse-adhésif avant d'être posé sur ce dernier. L'étoffe complexe ainsi formée est calandree et refroidie afin de consolider la liaison entre les deux couches. Le produit fini est ensuite stocké par enroulement.

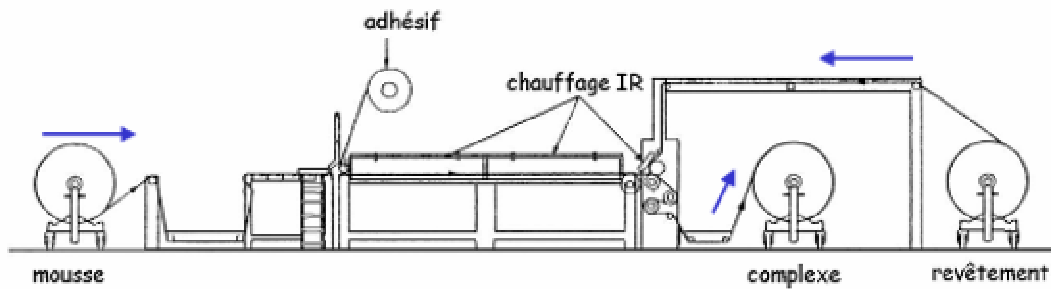


Figure 138. Principe du laminage par voile/film [13]

I.2. La mousse polyuréthane

I.2.1. Méthodes de mise en oeuvre

Industriellement, la mise en œuvre de la mousse polyuréthane peut s'effectuer par coulée continue ou discontinue, par injection ou par projection. Ces différentes techniques permettent d'obtenir des mousses souples, semi rigides ou rigides. Nous nous intéresserons plus particulièrement au cas des mousses souples. Selon les techniques utilisées, on obtient des mousses sous forme de blocs ou des mousses moulées. Les blocs de mousse sont généralement fabriqués par le procédé par coulée continue. Ce dernier permet de réaliser de grands volumes pouvant atteindre les dimensions de 60 m de long, 2,5 m de large et 1,5 m de haut. Ces blocs sont découpés en de fines couches d'épaisseur comprises entre 2 mm et 8 mm. Ces fines couches de mousses seront utilisées pour réaliser les étoffes complexes automobiles.

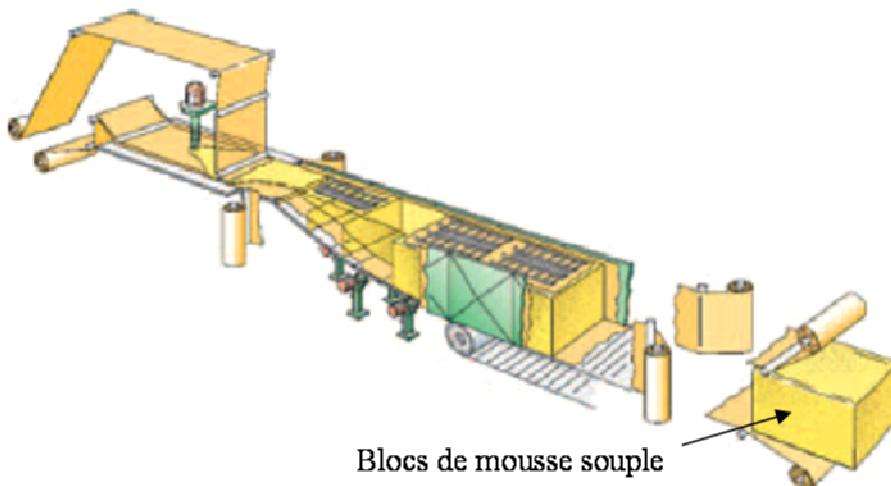


Figure 139. Schéma d'une installation de fabrication en continu de blocs de mousse souple [10]

Les mousses moulées sont généralement fabriquées par le procédé d'injection. Ces mousses peuvent être directement appliquées sur les pièces à revêtir. Ce procédé exclut les opérations de coupe qui génèrent dans le cas de la production de blocs de mousse des déchets allant de 10% à 25% de la production totale. Les opérations complexes de découpe des blocs de

mousse sont également évitées permettant aussi la réduction des déchets de production.

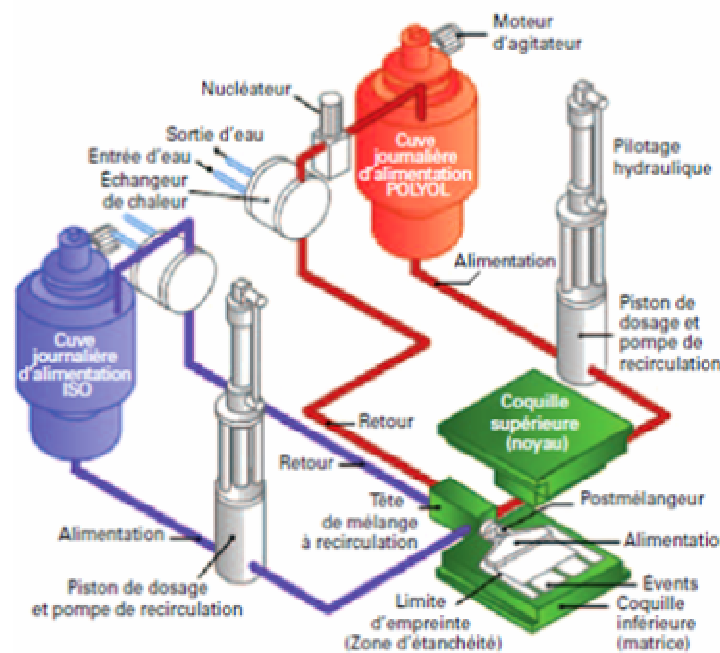


Figure 140. Schéma d'une installation de fabrication de mousses moulées par injection [10]

I.2.2. Différents types de recyclage

I.2.2.1. Recyclage mécanique

Dans le domaine du recyclage mécanique, on distingue quatre techniques de valorisation des déchets :

- Le broyage fin. Il consiste à réduire la taille des broyats à quelques centaines ou dizaines de microns afin d'obtenir des poudres. Ces dernières sont réutilisées pour la fabrication de nouvelles mousses par réaction de polyaddition au polyol.
- L'agglomération de mousse. Elle consiste à broyer les déchets de mousse de manière à obtenir des flocons d'environ 1 cm à 2 cm. Ces flocons servent à la fabrication de nouvelles mousses.
- Le pressage en présence d'un liant ou d'un adhésif. Cette technique consiste à broyer des chutes de mousse en granulés. Ces derniers sont ensuite enduits avec un liant, puis traités sous chaleur et pression.
- Le moulage par compression. Cette technique utilise des granulés de polyuréthane moulés pour produire des pièces rigides.

La plupart des technologies développées dans le domaine du recyclage mécanique n'ont pas

donné satisfaction. A ce jour, seule la technique par broyage permet d'imaginer une production sans déchets et économiquement viable, notamment dans le cas de la production de blocs de mousse [10]. Le procédé par broyage (Figure 141) consiste à transformer les déchets en poudre fine pouvant être réintégrée dans le cycle de fabrication de la mousse.

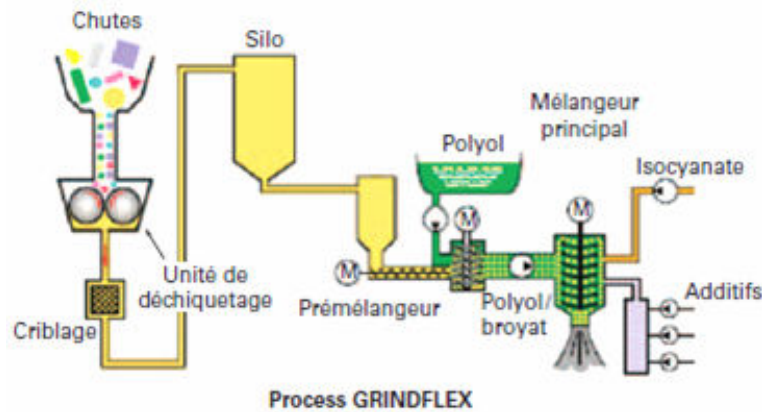


Figure 141. Procédé de recyclage par broyage et enrobage [10]

I.2.2.2. Recyclage chimique

Dans le domaine du recyclage chimique, on distingue trois techniques de valorisation des déchets :

- La chimiolyse en particulier la glycolyse. Il s'agit d'une réaction de dépolymérisation pouvant s'appliquer aux matériaux issus de polyaddition ou de polycondensation. La glycolyse est une réaction au cours de laquelle les liens uréthane et urée sont cassés par le glycol. L'action du glycol se fait sous pression atmosphérique et à température élevée comprise entre 180 °C et 240 °C. Cette technique permet de récupérer des polyols qui vont servir à la fabrication de nouvelles mousses.
- L'hydrolyse. Dans ce procédé, la mousse réagit avec l'eau pour former des polyols de poly-éther et des amines. Ces deux composants sont alors séparés et traités de manière à obtenir des isocyanates pouvant être réutilisés dans la formulation du polyuréthane.
- L'aminolyse. Dans ce procédé, la mousse réagit avec des amines pour casser les liens uréthane et urée. La pression et la température nécessaires à cette réaction sont plus faibles que celle exigée dans le cas de la glycolyse. Cette technique est encore au stade de la recherche.

Les techniques de recyclage par voie chimique ont fait l'objet de nombreux brevets qui n'ont toutefois pas connus de succès commerciaux. La seule technique viable est celle du recyclage par glycolyse (Figure 142) développée par le Professeur BAUER et mise en place par la

société REGRA en Allemagne. Cette technique consiste à fragmenter les déchets de mousses polyuréthane en des particules d'environ 5 cm. Ces dernières sont introduites avec des polyols dans un réacteur sous pression atmosphérique.

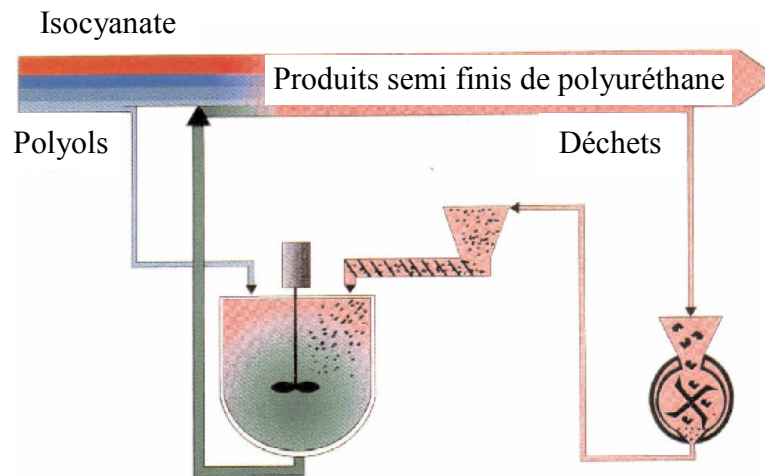


Figure 142. Procédé de recyclage chimique par glycolyse développé par la société REGRA [10]

I.2.2.3. Recyclage thermique

Pour ce qui est du recyclage thermique, les déchets de mousses sont incinérés et l'énergie est récupérée. L'incinération s'effectue en deux étapes du fait de l'émission des différents gaz nocifs lors de la combustion de matières solides. La combustion de la matière est suivie du brûlage des gaz. Cette deuxième opération permet de décomposer les gaz en constituants acceptables pour l'environnement. Malgré ces précautions, cette technique de recyclage reste la moins respectueuse de l'environnement.

I.3. Description des textiles 3D

I.3.1. Les tissus

Le tissu est une étoffe réalisée à partir d'un entrecroisement de fils de chaîne et de trame. La 3^{ème} dimension est obtenue par la technique de fabrication « velours ». Les tissus 3D ainsi réalisés sont appelés tissus double paroi. La Figure 143 montre un exemple de tissu 3D fabriqué par la société TISSAVEL INTERNATIONAL SAS [61]. Ce tissu épais est constitué de deux fonds reliés entre eux par des ponts de fils verticaux.

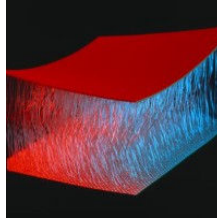


Figure 143. Exemple d'un tissu 3D double paroi conçu par Tissavel [61]

Le principe de fabrication d'un tel tissu 3D consiste à tisser simultanément deux tissus de fond l'un au dessus de l'autre. Ces derniers sont reliés par des fils de liaison généralement disposés en V (Figure 144). Cette disposition des poils confère une forte densité de poils au tissu épais. Contrairement à la technique traditionnelle « velours », les poils ne seront pas coupés et on obtiendra alors un tissu complexe.

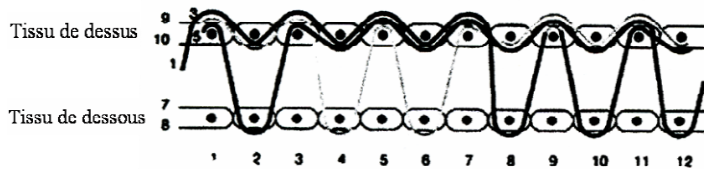


Figure 144. Structure d'un tissu 3D avec disposition des poils en V [7]

Ces tissus complexes peuvent être fabriqués à partir de métiers à tisser ratière ou jacquard. La Figure 145 illustre le principe de fabrication de tissus velours à partir d'un métier à tisser ratière.

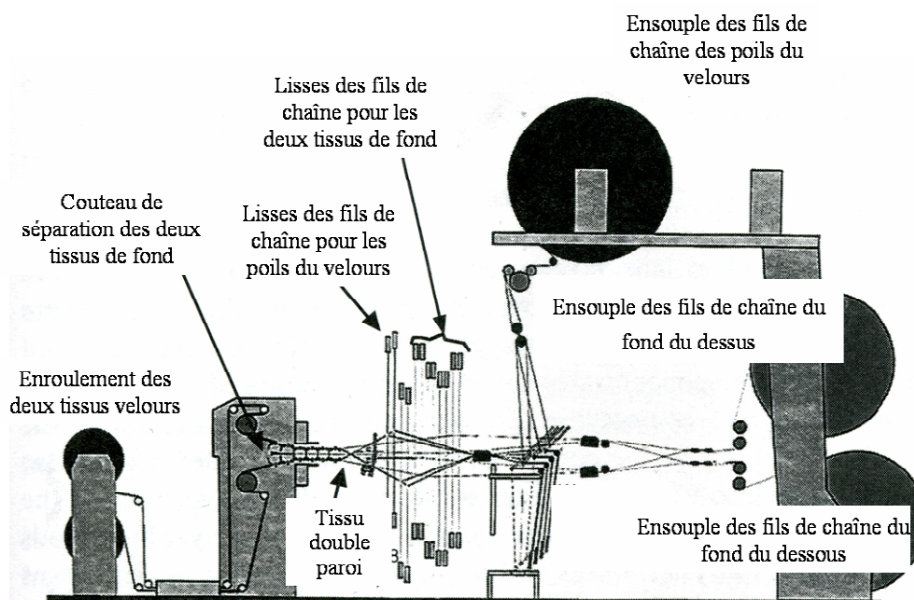


Figure 145. Principe de fabrication d'un tissage velours sur un métier ratière [7]

I.3.2. Les tricots

Le tricot est une étoffe réalisée à partir d'un entrebouclement de fils. La 3^{ème} dimension est obtenue par la technique de fabrication Rachel. Ces tricots 3D sont également appelés tricot double paroi.

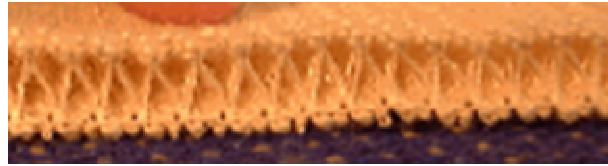


Figure 146. Exemple d'un tricot 3D

Ils sont obtenus par la technique de tricotage Rachel développé par la société Karl Mayer Textilmaschinenfabrik GmbH. Il s'agit d'une technique de tricotage velours rectiligne sur un métier double fontures (Figure 147). La fonture est l'organe du métier à tricoter dans lequel sont placées les aiguilles. Le principe de fabrication du tricot 3D est similaire à celui du tissage velours double paroi. Les deux tricots de fond sont tricotés simultanément l'un derrière l'autre. Chaque paroi est tricotée sur une fonture du métier. Les deux parois sont reliées par des fils de liaison qui ne seront pas coupés en fin du procédé donnant ainsi lieu au tricot 3D. La Figure 148 illustre la formation d'un tricot double paroi sur un métier double fontures.

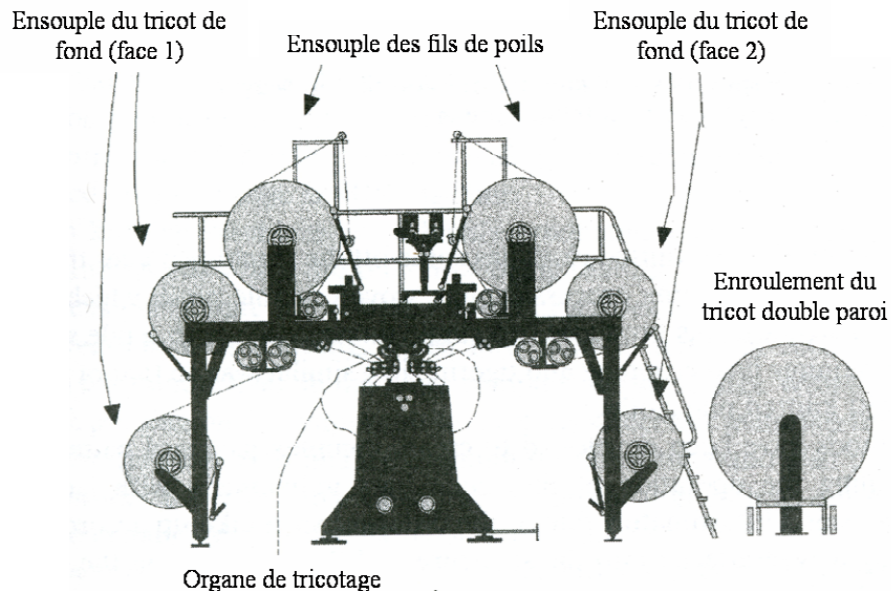


Figure 147. Métier à tricoter double fonture de Karl Mayer Textilmaschinenfabrik GmbH [7]

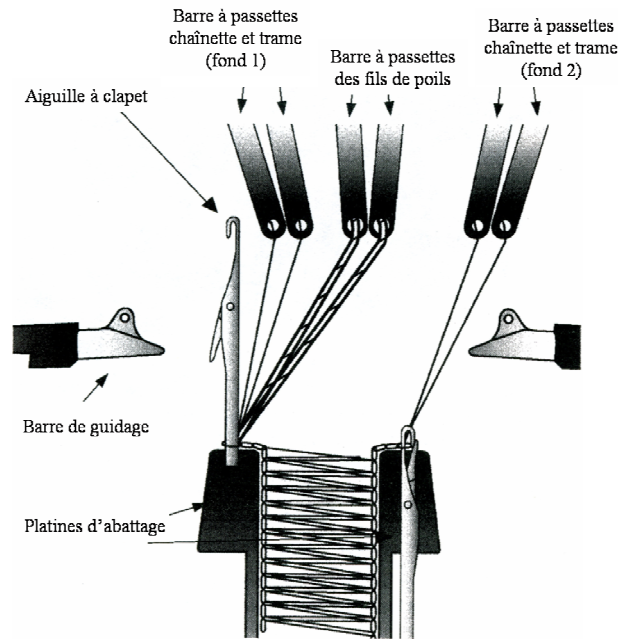


Figure 148. Schéma de principe de la formation d'un tricot double paroi [7]

I.3.3. Les non-tissés

Le non-tissé est une étoffe réalisée à partir d'un enchevêtrement aléatoire de fibres ou de filaments. Les organismes professionnels des non-tissés, EDANA (European Disposable and Nonwoven Association) et INDA (International Nonwovens & Disposables Association) ont adopté la définition normalisée ISO 9092 : 1988 suivante [62, 63] :

Non-tissé : Feuille manufacturée, constituée de voile ou de nappe de fibres orientées directionnellement ou au hasard, liées par friction et/ou cohésion et/ou adhésion, à l'exclusion du papier et des produits obtenus par tricotage, tissage, tuftage, couturage incorporant des fils ou filaments de liage ou feutrés par foulage humide qu'ils soient ou non aiguilletés.

Un non-tissé peut être réalisé à partir de fibres naturelles ou chimiques. Ces dernières peuvent être des fibres discontinues ou des filaments continus, ou être formées in situ. L'architecture 3D d'un non-tissé est obtenue par divers procédés de verticalisation d'une nappe fibreuse. La technologie la plus souvent mise en oeuvre pour la fabrication des non-tissés est l'aiguilletage mécanique par voie sèche.

ANNEXE II : PRESENTATION DU TRAVAIL

II.1. Fiche technique du câble d'alimentation

Trevira
THE FIBRE COMPANY

Fibres Nonwoven

Trevira staple fibres for nonwovens

Type	Titre	Cut length	Tow	Lustre	Brief description
200	6,0 dtex	60 mm		semi-dull	Non-siliconised hollow fibre
202	6,0 dtex	60 mm		semi-dull	Non-siliconised hollow fibre for bedlinen requiring boiling (for contract sector)
206	6,0 dtex	32/60 mm		semi-dull	Siliconised hollow fibre for fillings, 32 mm cut for blower machine
	6,0 dtex	60 mm		semi-dull	Antimicrobial hollow fibre
	5,0 dtex		25 ktex	semi-dull	Siliconised expanding tow
216	4,4 dtex	28 mm		semi-dull	Siliconised hollow fibre with very soft handle for blower machine
	4,4 dtex	60 mm		semi-dull	Siliconised hollow fibre with very soft handle for extra soft bedlinen
231	3,3 dtex	38/60 mm		semi-dull, spun-dyed black	Very low shrink round cross section fibre with good recovery properties
250	1,5 dtex	60 mm		semi-dull	Fibre with 60% boil shrinkage for bulking needle-punched nonwovens
254	2,2 dtex	50 mm		semi-dull	Core-sheath PES/copolyester bicomponent fibre with sheath melt point of 110°C
	4,4 dtex	50 mm	90 ktex	semi-dull HM	
255	3,0 dtex	3/4/6 mm		semi-dull	Core-sheath PES/copolyethylene bicomponent fibre for airlaid process, modified to increase bonding properties, sheath melt point of 127°C
256	3,0 dtex	38/50 mm		semi-dull	Core-sheath PES/copolyethylene bicomponent fibre for carded web, sheath melt point of 127°C
	4,4 dtex	38/60 mm		semi-dull	
270	1,7 dtex	38 mm		bright	Flame retardant modified spinning fibre with round cross section for carded web
	3,3 dtex	60 mm		bright	
	6,7 dtex	60/80 mm		bright	
	13,0 dtex	80 mm		semi-dull	

Trevira GmbH, Marketing Staple Fibres, Tel. +49-69-3 05 77 52, Fax +49-69-30 51 63 97, E-Mail: Petra.Becker@fra.trevira.com

II.2. Analyse enthalpique différentielle

L'analyse enthalpique différentielle (AED) encore appelée « Differential Scanning Calorimetry (DSC) » a été utilisée pour déterminer la température de transition vitreuse du copolyester et la température de fusion du polyester du câble filamentaire bicomposant COPET/PET.

Le principe de cette analyse consiste à mesurer les changements d'état dans des échantillons de 10 à 20 mg. L'appareillage mesure la différence d'énergie calorifique à fournir à deux capsules métalliques. Une des deux capsules sert de référence et l'autre contient l'échantillon pour que celles-ci subissent un certain cycle de température programmé. [64]

Les essais ont été réalisés avec un appareil DSC 2920 de TA Instrument. Lors de l'essai, on trace l'énergie calorifique en fonction de la température. Sur la courbe obtenue, on relève la température de transition vitreuse et la température de fusion. La Figure 149 présente la courbe relevé lors de l'essai.

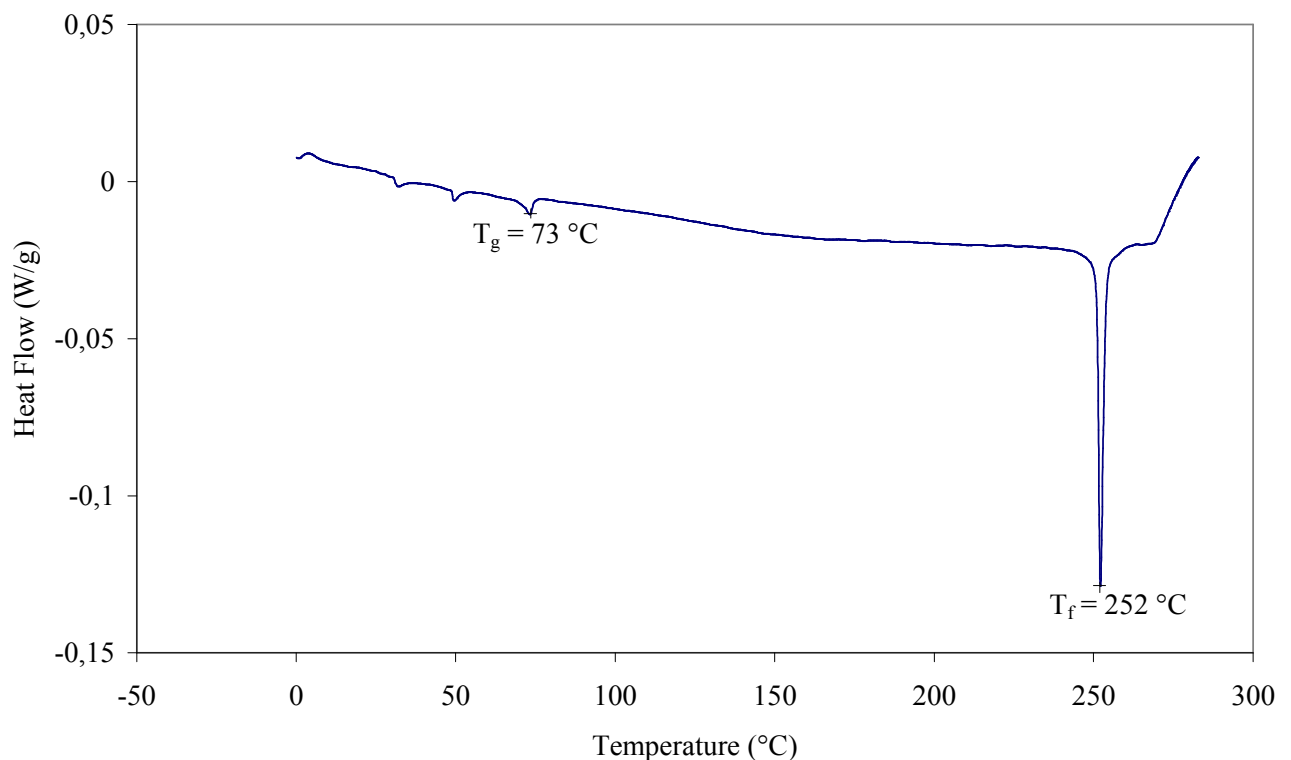


Figure 149. Courbe de DSC du câble bicomposant polyester

ANNEXE III : PRESENTATION DU PROTOTYPE EXPERIMENTAL VERTILAP[®]

III.1. Procédé d'extrusion

Les filaments artificiels et synthétiques sont obtenus par filage de polymère. Le filage peut être effectué selon différents modes de production. On distingue le filage par voie sèche, par voie humide et par voie fondue. Le procédé d'extrusion est un procédé de filage par voie fondue. Il consiste à produire des filaments à partir de polymère. Ce procédé est utilisé dans la fabrication de filaments synthétiques tel que le polyester. La Figure 150 illustre le principe du procédé d'extrusion [46].

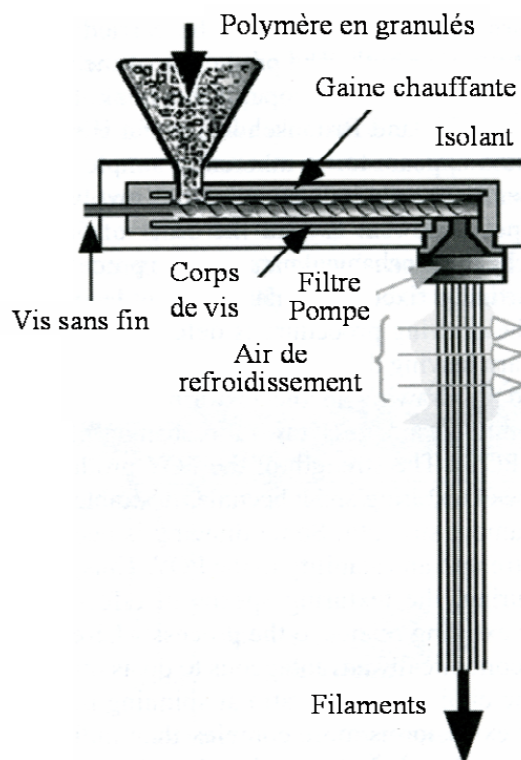


Figure 150. Procédé d'extrusion [46]

Le polymère se présente généralement sous la forme de granules et est stocké dans une trémie. De la trémie de stockage, les granules de polymère sont séchés et acheminés vers l'extrudeuse par le mouvement de rotation de la vis sans fin. Le polymère est alors fondu sous l'action de la température du corps de vis et fluidifié par l'action de cisaillement de la vis sans fin. Le polymère passe ensuite au travers d'une filière composée de plusieurs trous. Ces derniers peuvent présenter des formes de section variées suivant l'application finale. Ces sections peuvent être circulaires, triangulaires, lobés, etc. (Figure 151). En sortie de filière, les filaments sont étirés et refroidis. Les filaments obtenus peuvent être assemblés pour former un fil ou un câble.

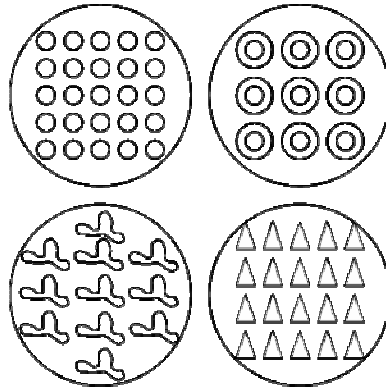


Figure 151. Différentes formes de sections des trous d'une filière d'extrusion

III.2. Traction du câble d'alimentation

Le procédé de défibrage qui, consiste à séparer les filaments du câble de manière à les individualiser s'effectue grâce à une sollicitation mécanique en traction dans la zone d'élasticité du matériau. En effet, la tension de défibrage appliquée, qui était de 1,35 tout au long des différents essais menés dans ce travail est suffisante pour individualiser les filaments et est telle que les filaments sont sollicités en deçà de la première rupture dans le faisceau.

Les échantillons testés ont été conditionnés pendant au moins 24h dans le laboratoire de métrologie à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et 65% d'humidité relative. Les essais de traction ont été réalisés sur une machine de traction universelle MTS. Les échantillons ont été étirés à une vitesse de traverse de 100 m/min avec une cellule de charge de 2 kN. Les échantillons ont été soumis à une prétension de 1 N. La longueur entre les pinces a été fixée à 160 mm. La Figure 152 montre le comportement en traction du câble d'alimentation bicomposant COPET/PET utilisé. Les essais représentent la moyenne de 6 essais. La courbe force déformation montre une première rupture à 15 % de déformation du filament et une rupture de la majorité des filaments du faisceau à 45 % de déformation.

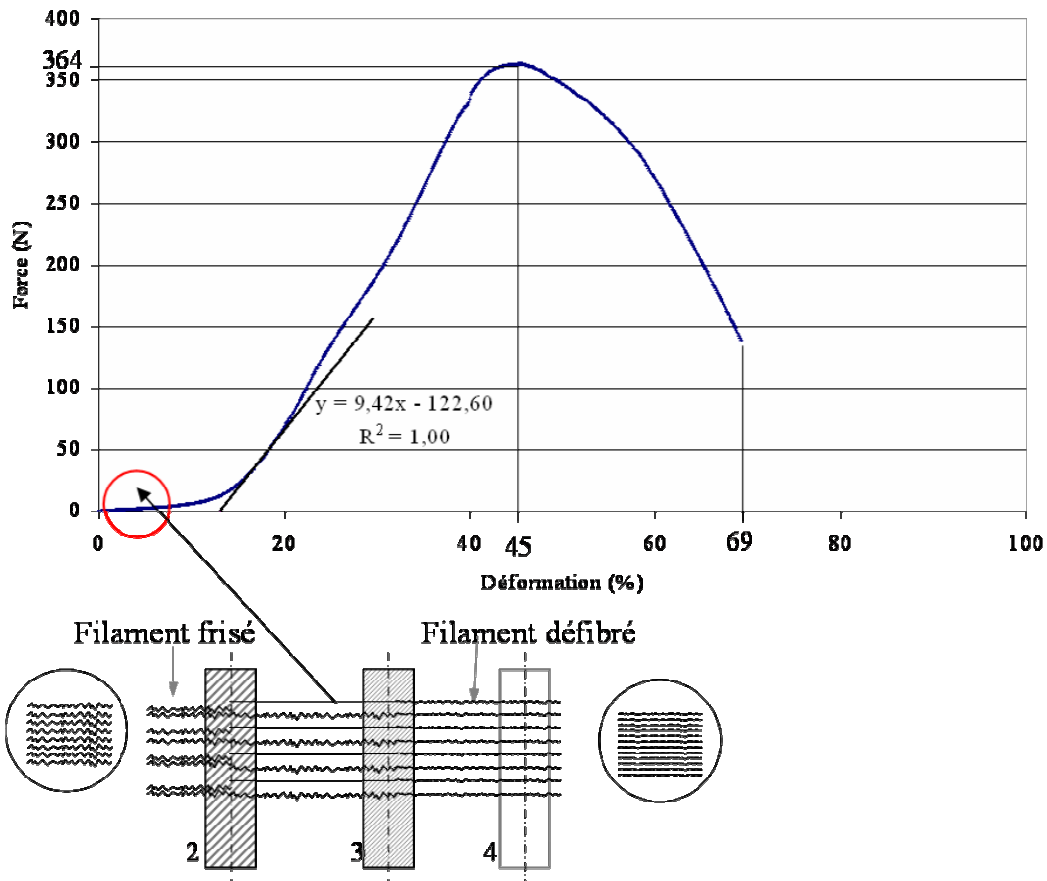


Figure 152. Comportement en traction du câble d'alimentation bicomposant COPET/PET

III.3. Mesures expérimentales de vitesses

III.3.1. Mesure de la vitesse de plissage

Des mesures expérimentales ont permis de déterminer la relation entre la vitesse des tambours de plissage V_p et la vitesse de commande principale de la machine V_T . Les valeurs de vitesse V_T ont été mesurées à l'aide d'un tachymètre. Le tableau récapitule l'ensemble des mesures effectuées.

Tableau 37. Mesure expérimentale de la vitesse de plissage

V_T / V_p en m/min	
V_T	V_p
10	0,9
15	1,1
20	1,3
25	1,45
30	1,65
35	1,9
40	2,05

La Figure 153 représente le tracé de V_p en fonction de V_T .

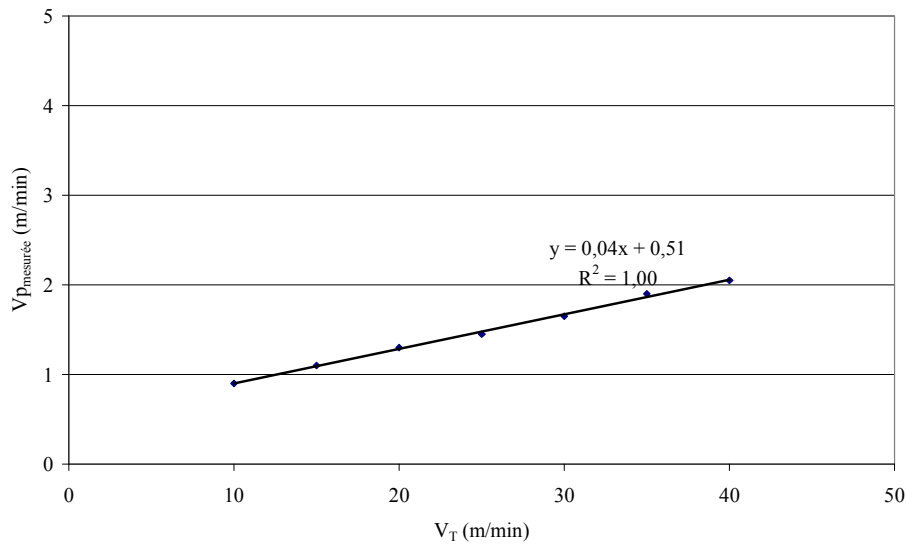


Figure 153. Relation entre la vitesse mesurée de plissage V_p et la vitesse de la machine V_T

A partir de cette courbe, on peut déterminer la relation entre la vitesse effective de plissage V_p et la vitesse de la machine V_T qui correspond à la vitesse du moteur de commande des tambours :

$$V_p = 0,04.V_T + 0,51 \quad \text{Equation (1)}$$

III.3.2. Mesure des vitesses d'entrée de verticalisation et d'extraction

Le même raisonnement est appliqué pour déterminer les vitesses d'entrée de verticalisation V_{ev} et d'extraction V_{ex} à partir de la vitesse des tambours de plissage V_p . Les relevés expérimentaux sont présentés dans le Tableau 38.

Tableau 38. Mesure expérimentale des vitesses V_{ev} et V_{ex}

V_p (m/min)	V_{ev} mesurée (m/min)	V_{ex} mesurée (m/min)
0,90	1,55	0,95
1,30	3,20	1,95
1,65	4,80	2,90

La Figure 154 représente les tracés de V_{ev} et V_{ex} en fonction de V_T .

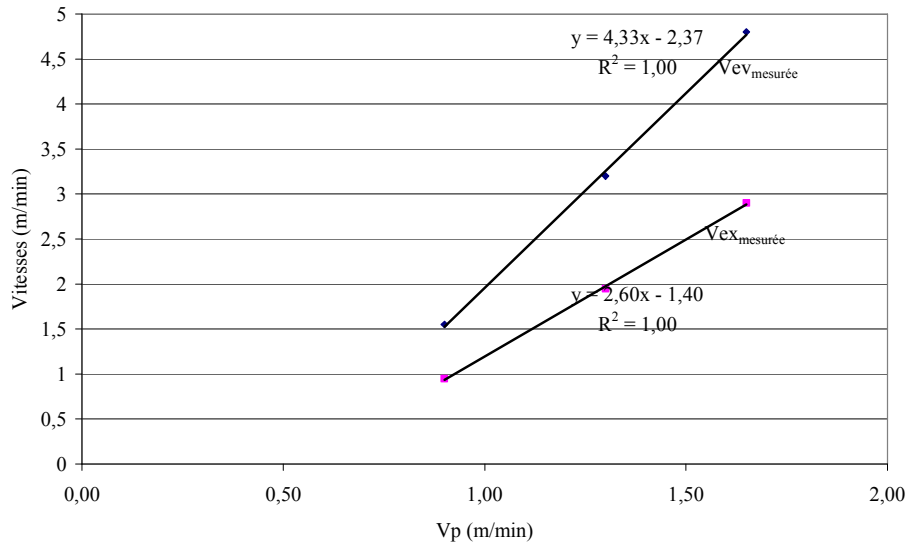


Figure 154. Relation entre V_{ev} et V_{ex} en fonction de V_T .

Connaissant l'indicateur de suralimentation I_{sa} en entrée de verticalisation et l'indicateur de la tension d'extraction $I_{E_{ex}}$, on peut déterminer les vitesses effectives d'entrée de verticalisation et d'extraction par :

$$V_{ev} = \left(1 + \frac{I_{sa}}{100}\right) \cdot (4,33 \cdot V_p - 2,37) \quad \text{Equation (2)}$$

$$V_{ex} = \left(1 + \frac{I_{E_{ex}}}{100}\right) \cdot (2,6 \cdot V_p - 1,4) \quad \text{Equation (3)}$$

ANNEXE IV : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 1

IV.1. Paramètres de production

Tableau 39. Paramètres de fabrication lors de la campagne d'essais N °1

Titre (ktex)	Températures (°C)				Réglages machine				Vitesses de production (m/min)						
	T _{consigne}	T _{sonde}	T _{tambours}	T _F	C	I _{sa} (%)	V _T	I _{Eex} (%)	V ₂	V ₃	V _{ev}	V _p	V _{ex}	V _c	
21	40	45-56	75-80	19	2,4	-8	13	45	1,34	1,81	1,92	1,03	1,85	0,77	
12	40	50	85	19	2,4	-8	13	45	1,34	1,81	1,92	1,03	1,85	0,77	
12	40	45	80	19	2,4	-12	13	45	1,29	1,74	1,84	1,03	1,85	0,77	
15	40	45	80	19	2,4	10	13	45	1,61	2,17	2,30	1,03	1,85	0,77	
17	40	45	72	19	2,4	17	13	45	1,71	2,31	2,45	1,03	1,85	0,77	
23	45	45	70	19	2,4	17	13	50	1,71	2,31	2,45	1,03	1,92	0,80	
15	45	50	77	19	2,6	0	13	50	1,46	1,97	2,09	1,03	1,92	0,74	
24	45	73	80	19	2,6	-6	15	50	1,60	2,16	2,29	1,11	2,23	0,86	
10	47	57	80	19	2,7	-10	15	50	1,53	2,07	2,19	1,11	2,23	0,83	
10	47	57	80	19	2,7	-10	20	50	2,08	2,80	2,97	1,31	3,01	1,11	
15	47	57	85	19	2,7	-25	25	50	2,18	2,95	3,13	1,51	3,79	1,40	
15	42	55	85	19	2,7	-25	25	50	2,18	2,95	3,13	1,51	3,79	1,40	
15	60	60	70	19	2,7	-10	15	50	1,53	2,07	2,19	1,11	2,23	0,83	
26	65	65	90	19	2,7	-10	15	45	1,53	2,07	2,19	1,11	2,15	0,80	
Moy	16	46	54	19	2,6	-6	16	48	1,65	2,23	2,36	1,14	2,32	0,90	
CV (%)	31	17	16	8	19	5,7	227	27	5	18,13	18,13	18,13	15,19	29,86	25,63
Min	10	40	45	19	2,4	-25	13	45	1,29	1,74	1,84	1,03	1,85	0,74	
Max	26	65	73	19	2,7	17	25	50	2,18	2,95	3,13	1,51	3,79	1,40	

IV.2. Détermination de la méthode du test de compression

Tableau 40. Résultats de compression issus de la méthode de test n° 1

Méthode 1		WC (N.m/m ²)		RC (%)		T ₀ (mm)		T _M (mm)		EMC (%)	
Câbles d'alimentation	Nombre d'échantillons testés	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type
1	21	72	17,96	39	5,56	7	0,71	3	1,10	50	12,81
2	9	55	20,52	40	6,79	8	0,43	3	0,20	61	3,95
3	27	50	32,44	54	8,61	7	0,57	5	1,81	26	21,04
4	27	53	59,11	65	11,52	7	0,48	6	0,66	13	9,47
5	19	73	39,83	45	8,40	7	0,91	5	1,81	32	18,80
6	25	73	55,21	49	9,85	7	0,44	5	1,03	24	14,59
	<i>Moy</i>	62	37,51	49	8,46	6,95	0,59	4,58	1,10	34	13,44
	<i>Min</i>	50	17,96	39	5,56	6,55	0,43	2,95	0,20	13	3,95
	<i>Max</i>	73	59,11	65	11,52	7,51	0,91	6,20	1,81	61	21,04

Tableau 41. Résultats de compression issus de la méthode de test n° 2

Méthode 2		WC (N.m/m ²)		RC (%)		T ₀ (mm)		T _M (mm)		EMC (%)	
Câbles d'alimentation	Nombre d'échantillons testés	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type	Moy	Ecart type
1	13	37	17,46	54	17,10	4	0,62	3	0,83	27	10,79
2	11	22	6,77	61	14,49	4	0,82	4	0,81	18	5,61
3	11	29	12,80	53	22,48	4	0,74	3	0,77	20	6,02
4	10	28	15,66	64	16,18	4	0,56	3	0,56	22	8,25
5	7	21	7,90	73	3,83	4	1,15	3	0,97	19	3,47
6	12	40	9,17	60	7,58	4	0,71	3	0,51	33	6,41
	<i>Moy</i>	29	11,63	61	13,61	4,10	0,77	3,17	0,74	23	6,76
	<i>Min</i>	21	6,77	53	3,83	3,78	0,56	2,92	0,51	18	3,47
	<i>Max</i>	40	17,46	73	22,48	4,41	1,15	3,66	0,97	33	10,79

Tableau 42. Moyenne de l'ensemble des résultats obtenus des méthodes de test n° 1 et 2

	WC (N.m/m ²), Echelle 1/10	RC (%), Echelle 1/10	T ₀ (mm)	T _M (mm)	EMC (%), Echelle 1/10
Méthode n° 1	<i>6,25</i>	<i>4,87</i>	<i>6,95</i>	<i>4,58</i>	<i>3,44</i>
Méthode n° 2	<i>2,94</i>	<i>6,08</i>	<i>4,10</i>	<i>3,17</i>	<i>2,31</i>

ANNEXE V : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 2**V.1. Programme de calcul pour le traitement d'images sous Matlab®**

```
clear all
close all
clc

I=imread('Lot4-1.JPG');
figure (1)
imshow(I)
title('Image origine')

BW = im2bw(I,0.6);
figure (gcf+1)
imshow(BW);
title('Image NB')

SE = strel('disk',2);
BW3 = imdilate(BW,SE);
SE = strel('disk',2);
BW4 = imerode(BW3,SE);
figure (gcf+1)
imshow(BW4)
title('Image NB debruitée')

BW5=1-BW4;
figure (gcf+1)
imshow(BW5)

[X,num] = bwlabel(BW5,4);
figure (gcf+1)
imshow(X)
RGB = label2rgb(X, @jet, 'k');
imshow(RGB,'notruesize')

taille=size(BW4);

temp=0;
for indexcolonne=1:taille(2);
    for indexligne=1:taille(1)
        if(BW4(indexligne,indexcolonne)==0)
            temp=temp+1;
        end
    end
end

pourcentagenoire=100*temp/(taille(1)*taille(2))
```

```

BW6=BW4;
for indexcolonne=1:taille(2);
    temp=0;
    for indexligne=1:taille(1)
        if(BW4(indexligne,indexcolonne)==0)
            temp=temp+1;
        end
    end
    if(temp>=1)
        BW6(:,indexcolonne)=0;
    end
end

```

```

figure(gcf+1)
imshow(BW6)

```

V.2. Paramètres de caractérisation mesurées

n : nombre d'échantillons testés

$t_p(\nu)$: fractile de student au degré de liberté ν tel que $\nu = n - 1$

σ : écart-type

\bar{x} : moyenne

CV (%) : coefficient de variation

IC : intervalle de confiance bilatéral à un risque d'erreur de 5%

LPE (%) : limite pratique d'erreur à un risque d'erreur de 5%

$$CV(\%) = 100 \cdot \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \text{Equation (4)}$$

$$IC = t_p(\nu) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Equation (5)}$$

$$LPE(\%) = 100 \cdot \frac{IC}{\bar{x}} \quad \text{Equation (6)}$$

1. Masse surfacique

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
M (g/m²)	302,09	300,74	285,73	220,27	196,54	257,25	245,20	272,28
Ecart-type	49,37	54,86	76,08	51,96	73,49	29,51	19,49	37,56
CV (%)	16,34	18,24	26,63	23,59	37,39	11,47	7,95	13,80
IC	11,20	9,67	19,15	15,08	16,35	8,29	6,23	8,89
LPE (%)	3,71	3,22	6,70	6,85	8,32	3,22	2,54	3,26
n	77	126	63	48	80	51	40	71

2. Irrégularité d'aspect

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
I (%)	12,27	12,54	12,09	13,09	39,69	8,48	12,63	10,12
écart type	7,86	8,67	9,97	8,00	10,55	6,86	8,26	7,39
CV (%)	64,05	69,09	82,45	61,11	26,57	80,95	65,38	73,03
IC	2,12	1,63	2,53	2,63	2,36	1,97	2,68	1,78
LPE (%)	17,31	12,99	20,93	20,08	5,95	23,24	21,17	17,54
n	55	111	62	38	79	49	39	69

3. Epaisseur initiale T_0

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
T_0 (mm)	4,78	5,43	5,23	5,58	5,89	5,94	5,88	6,26
Ecart type	0,80	1,03	0,91	1,21	1,01	0,59	0,47	0,52
CV (%)	16,73	18,98	17,38	21,69	17,16	9,94	7,99	8,30
IC	0,18	0,20	0,23	0,35	0,22	0,17	0,15	0,12
LPE (%)	3,80	3,77	4,38	6,29	3,82	2,79	2,55	1,96
n	77	100	63	48	80	51	40	71

4. Epaisseur finale T_M

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
T_M (mm)	3,77	4,39	4,16	4,42	4,78	4,59	4,45	4,72
Ecart type	0,52	0,83	0,67	0,98	0,88	0,39	0,36	0,35
CV (%)	13,79	18,91	16,11	22,17	18,41	8,50	8,09	7,42
IC	0,12	0,16	0,17	0,28	0,20	0,11	0,12	0,08
LPE (%)	3,13	3,75	4,06	6,43	4,10	2,39	2,59	1,75
n	77	100	63	48	80	51	40	71

5. Compressibilité EMC

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
EMC (%)	20,23	18,90	20,06	20,53	18,51	22,52	24,11	24,51
Ecart type	8,49	7,34	6,77	7,30	7,31	4,13	5,86	4,48
CV (%)	41,95	38,83	33,75	35,58	39,52	18,35	24,31	18,27
IC	1,93	1,46	1,70	2,12	1,63	1,16	1,87	1,06
LPE (%)	9,52	7,70	8,50	10,33	8,79	5,16	7,77	4,32
n	77	100	63	48	80	51	40	71

6. Energie dissipée WC

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
WC (N.m/m²)	24,84	29,78	29,17	35,01	28,09	37,73	40,73	42,94
Ecart type	8,87	15,74	12,68	18,10	11,71	9,20	10,40	8,33
CV (%)	35,71	52,86	43,46	51,70	41,69	24,39	25,52	19,39
IC	2,01	3,12	3,19	5,25	2,61	2,59	3,32	1,97
LPE (%)	8,10	10,49	10,94	15,00	9,28	6,86	8,16	4,59
n	77	100	63	48	80	51	40	71

7. Résilience RC

Echantillons testés	1	2	3	4	5	6	7	8
RC (%)	81,90	69,17	74,01	63,98	77,45	72,00	68,54	71,57
Ecart type	13,93	12,97	13,30	16,56	16,80	6,42	8,11	5,20
CV (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
IC	3,16	2,57	3,35	4,81	3,74	1,80	2,59	1,23
LPE (%)	3,86	3,72	4,52	7,51	4,83	2,51	3,78	1,72
n	77	100	63	48	80	51	40	71

V.3. Caractéristiques physiques

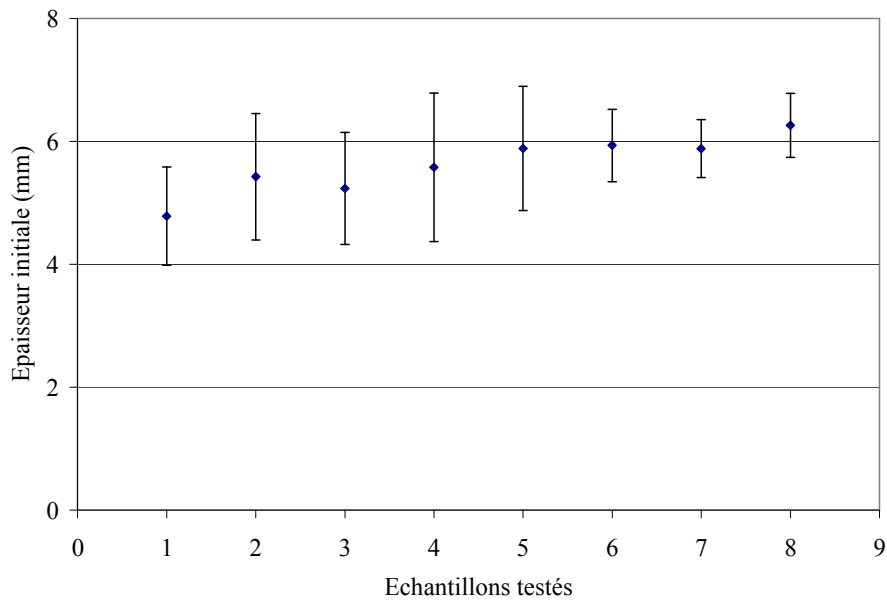


Figure 155. Epaisseur des échantillons testés

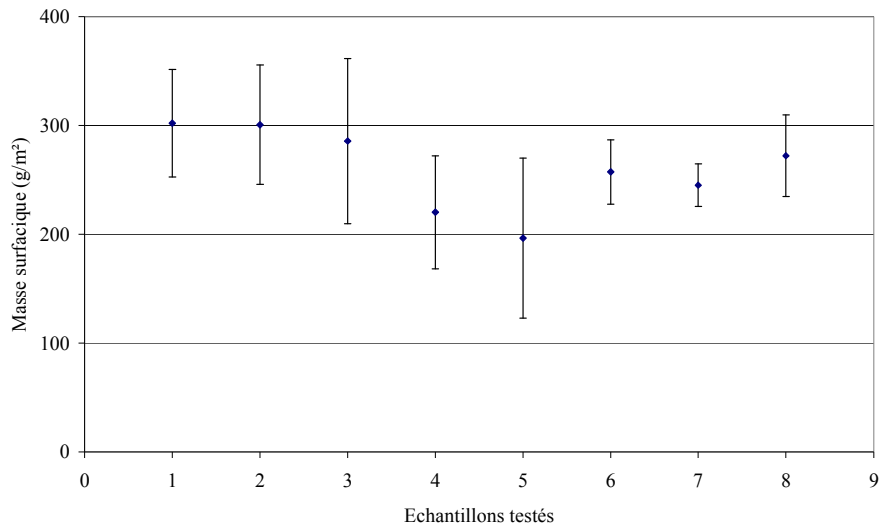


Figure 156. Masse surfacique des échantillons testés

V.4. Caractéristiques mécaniques en compression

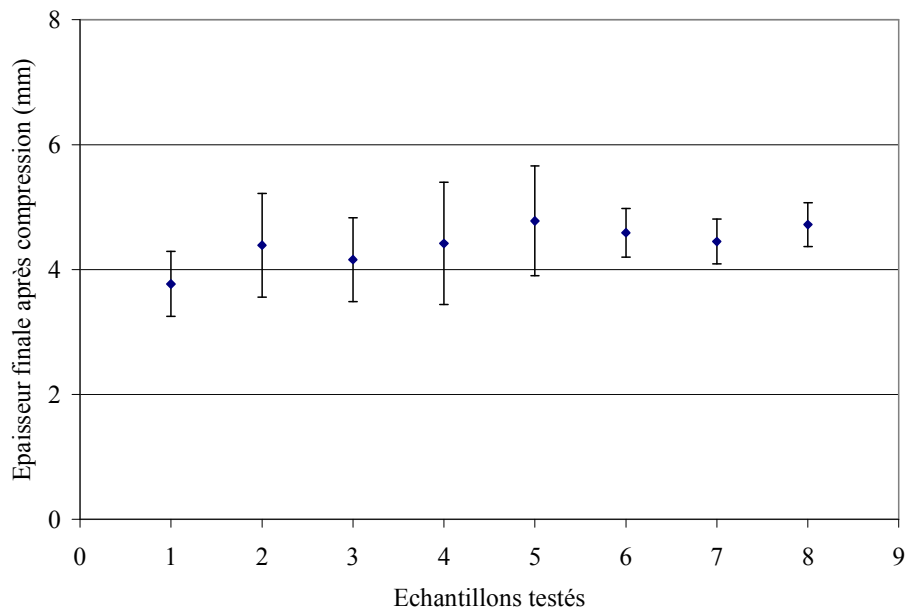


Figure 157. Epaisseur après compression des échantillons testés

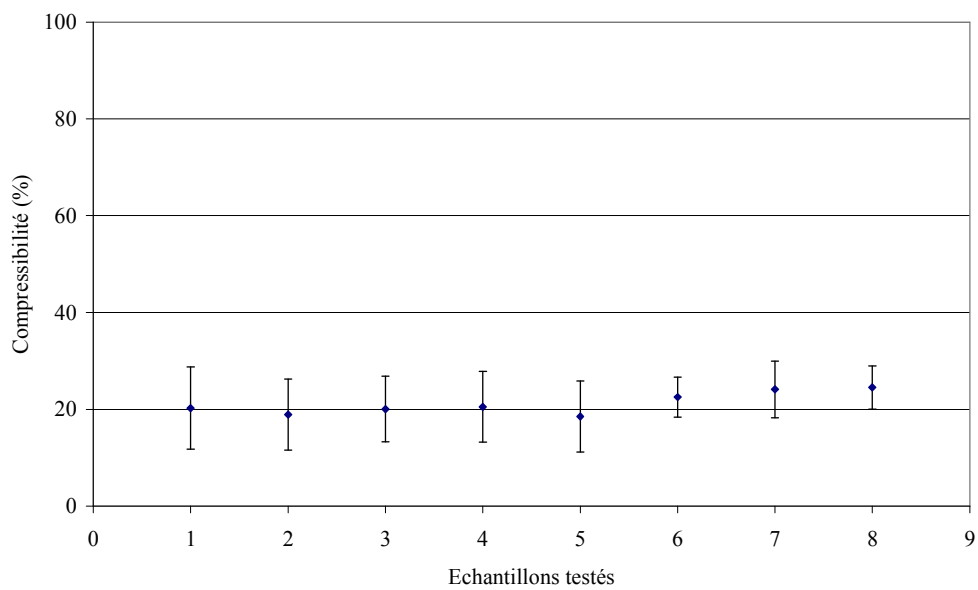


Figure 158. Compressibilité des échantillons testés

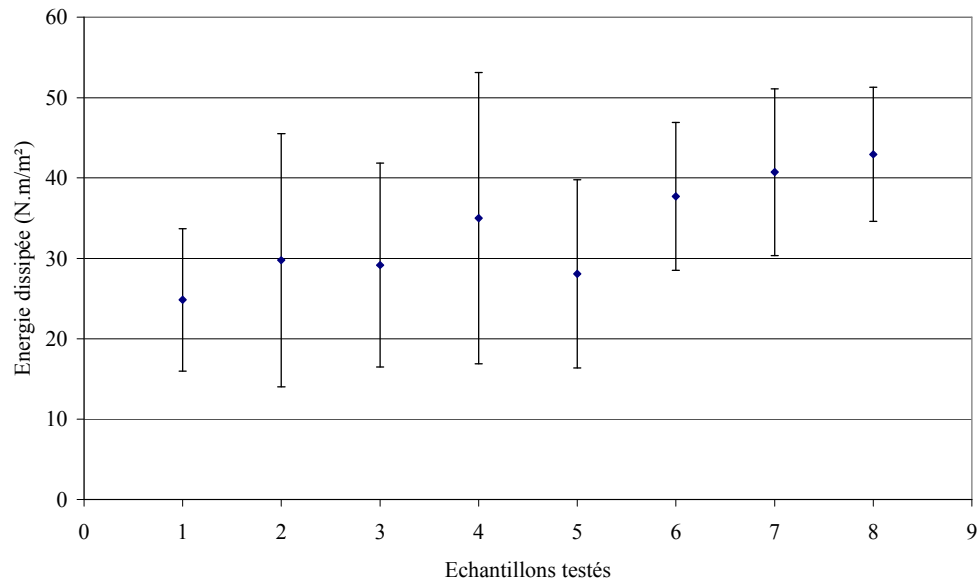


Figure 159. Energie dissipée lors de la compression des échantillons testés

V.5. Analyses statistiques

V.5.1. Test d'ajustement du Khi2

Le test du Khi2 est un test non paramétrique utilisé pour tester l'hypothèse H_0 selon laquelle les données observées sont engendrées par un modèle théorique faisant intervenir une loi de probabilité, la loi normale dans notre étude.

A partir du modèle observé de n échantillons, regroupés en k classes d'effectifs n_i , on construit un modèle théorique d'échantillons regroupés en k classes d'effectifs n'_i . On calcule ensuite l'écart E entre le modèle observé et le modèle théorique.

$$E = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i} \quad \text{Equation (7)}$$

E obéit à une loi du Khi2 de degré de liberté $k-3$. Soit $\chi^2_{1-\alpha}$ tel que $P(\chi^2 > \chi^2_{1-\alpha}) = \alpha$, avec α le risque d'erreur fixé à 5% ;

- Si $E < \chi^2_{1-\alpha}$: H_0 acceptée
- Si $E > \chi^2_{1-\alpha}$: H_0 refusée

V.5.2. Test d'ajustement de Kolmogorov-Smirnov

Il s'agit d'un test non paramétrique utilisé pour déterminer si la fonction de répartition empirique $F_n^*(x)$ d'un échantillon est en adéquation avec à une loi donnée, loi normale dans notre étude.

A partir d'un échantillon de n observations, on définit la « distance maximale » par rapport à

une fonction de répartition donnée $F_0(x)$.

$$D(n) = \max |F_n^*(x) - F_0(x)| \quad \text{Equation (8)}$$

On calcule :

$$d_n = \sqrt{n} \cdot D(n) \quad \text{Equation (9)}$$

- Si $d_n < d(n; \alpha)$: H_0 acceptée
- Si $d_n > d(n; \alpha)$: H_0 refusée

Les calculs sont effectués au risque d'erreur α de 5%.

V.5.3. Test de Friedman

Lorsque la condition de « normalité » n'est pas vérifiée, le test non paramétrique de Friedman permet de vérifier l'hypothèse H_0 selon laquelle les moyennes (μ_i) entre plus de deux échantillons ne sont pas significativement différentes. Ce s'applique à plus de deux échantillons appariés.

Les valeurs numériques sont classées par rangs par ordre croissant. Les colonnes représentent les différents échantillons et les lignes représentent les différentes variables (propriétés physiques ou mécaniques dans notre étude). Ce test est un test du Khi2 d'écart entre la somme des rangs obtenus par chaque produit et une somme des rangs moyenne. Le coefficient F de Friedman est ensuite calculé par :

$$F = \frac{12}{N \cdot k \cdot (k+1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^k R_i^2 \right) - 3 \cdot N \cdot (k+1) \quad \text{Equation (10)}$$

Avec, N le nombre de colonnes, k le nombre de lignes, R_i la somme des rangs de la ligne i .

F obéit à une loi du Khi2 de degré de liberté $k-1$. Soit χ_α^2 tel que $P(\chi^2 > \chi_\alpha^2) = \alpha$, avec α le risque d'erreur ;

- Si $F < \chi_\alpha^2$: H_0 acceptée
- Si $F > \chi_\alpha^2$: H_0 refusée

V.5.4. Test de comparaison des variances

V.5.4.1. Cas d'une population de taille réduite

On considère qu'une population est de taille réduite lorsque le nombre d'échantillons est inférieur à 30 ($n < 30$). Soit deux échantillons n_1 et n_2 dont les variances estimées sont respectivement s_1^2 et s_2^2 . L'hypothèse du test consiste à poser l'égalité des carrés des écart-types : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$.

Alors, on peut considérer que $\frac{n_1 s_1^2}{\sigma^2}$ et $\frac{n_2 s_2^2}{\sigma^2}$ suivent respectivement une loi du Khi2 $\chi^2(n_1 - 1)$ et $\chi^2(n_2 - 1)$. Ainsi, $F = \frac{n_1 s_1^2}{n_1 - 1} \cdot \frac{n_2 - 1}{n_2 s_2^2}$ obéit à une loi de Snedecor aux degrés de liberté (ν_1, ν_2) avec $\nu_1 = n_1 - 1$ et $\nu_2 = n_2 - 1$.

Si $F \in \left[F_{\frac{\alpha}{2}}(\nu_1, \nu_2), F_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu_1, \nu_2) \right]$, alors l'hypothèse d'égalité des variances est acceptée et le test de comparaison des moyennes peut être effectué.

V.5.4.2. Cas d'une population de taille élevée

On considère qu'une population est de taille élevée lorsque le nombre d'échantillons est supérieur ou égale à 30 ($n \geq 30$). Soit deux échantillons n_1 et n_2 dont les variances estimées sont respectivement s_1^2 et s_2^2 . L'hypothèse du test consiste à poser l'égalité des carrés des écart-types : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$.

Alors, on peut considérer que s_1 , s_2 et $s_1 - s_2$ suivent une loi normale $N(\mu, b)$ qui dépend de deux paramètres, la moyenne (μ) et l'écart-type (b). On a :

$$s_1 \quad N\left(\sigma, \frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot n_1}}\right)$$

$$s_2 \quad N\left(\sigma, \frac{\sigma}{\sqrt{2 \cdot n_2}}\right)$$

$$s_1 - s_2 \quad N\left(0, \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n_1} + \frac{1}{2 \cdot n_2}}\right)$$

$$\sigma^2 \text{ est estimé par } s'^2 = \frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}.$$

$$\text{Ainsi, } u = \frac{s_1 - s_2}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n_1} + \frac{1}{2 \cdot n_2}}} \text{ suit une loi normale } N(0, 1).$$

Si $u \in \left[u_{\frac{\alpha}{2}}, u_{1-\frac{\alpha}{2}} \right]$, soit $u \in [u_{0,025}, u_{0,975}] = [-1,96, 1,96]$: alors l'hypothèse est acceptée et le test de comparaison des moyennes peut être effectué.

V.5.5. Test de comparaison des moyennes

V.5.5.1. Cas d'une population de taille réduite

Soit deux échantillons n_1 et n_2 dont les moyennes et les variances estimées sont respectivement \bar{x}_1 et \bar{x}_2 , s_1^2 et s_2^2 . L'hypothèse du test consiste à poser l'égalité des moyennes : $\mu_1 = \mu_2 = \mu$.

Alors, on peut considérer que \bar{x}_1 et \bar{x}_2 suivent respectivement une loi normale $N(\mu_1, \frac{\sigma}{\sqrt{n_1}})$ et

$N(\mu_2, \frac{\sigma}{\sqrt{n_2}})$. Alors, on peut considérer que $\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{\sigma^2}$ suit une loi du Khi2

$\chi^2(n_1 + n_2 - 2)$. On calcule T qui obéit à une loi de Student à $n_1 + n_2 - 2$ degrés de liberté. T est estimé par :

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s' \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \text{ avec } s'^2 = \frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

Si $t \in \left[t_{\frac{\alpha}{2}}, t_{1-\frac{\alpha}{2}} \right]$, l'hypothèse d'égalité des moyennes est acceptée.

V.5.5.2. Cas d'une population de taille élevée

Soit deux échantillons n_1 et n_2 dont les moyennes et les variances estimées sont respectivement \bar{x}_1 et \bar{x}_2 , s_1^2 et s_2^2 . L'hypothèse du test consiste à poser l'égalité des moyennes : $\mu_1 = \mu_2 = \mu$.

Alors, on peut considérer que \bar{x}_1 , \bar{x}_2 et $\bar{x}_1 - \bar{x}_2$ suivent une loi normale. On a :

$$\bar{x}_1 \quad N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n_1}}\right)$$

$$\bar{x}_2 \quad N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n_2}}\right)$$

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \quad N\left(0, \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}\right)$$

σ^2 est estimé par $s'^2 = \frac{n_1 \cdot s_1^2 + n_2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$.

Ainsi, $u = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$ suit une loi normale $N(0, 1)$.

Si $u \in \left[u_{\frac{\alpha}{2}}, u_{1-\frac{\alpha}{2}} \right]$, soit $u \in [u_{0,025}, u_{0,975}] = [-1,96, 1,96]$: alors l'hypothèse est acceptée et on peut alors considérer qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux échantillons

testés.

V.5.6. Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) transforme les données de résultats de manière à les visualiser dans des plans ou les classer de façon homogène. Le tableau de données est un tableau de mesures quelconques croisant un ensemble **I** de n lignes représentant les unités statistiques (échantillons testés dans notre étude) et un ensemble **J** de p colonnes représentant les variables (paramètres physiques et de compression dans notre étude).

La réduction du nombre d'axes dans le plan va faciliter la visualisation ainsi que l'interprétation synthétique des résultats. La détermination des combinaisons linéaires des variables permet de réduire le nombre d'axes à trois axes principaux A1, A2, A3 appelés « composantes principales ». Chacun de ces axes représente une partie de l'information. Les résultats peuvent alors être représentés sous forme de graphes définis par des nuages de points corrélés dans un plan à deux axes renseignant sur le maximum d'information.

La ressemblance entre deux individus est mesurée par la distance euclidienne entre produits d , définie par :

$$d^2(i, i') = \sum_{j \in J} (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad \text{Equation (11)}$$

Le coefficient de corrélation entre deux variables j et k est déterminé à partir des valeurs de ces variables, de leurs moyennes et de leurs écarts-types. La relation est définie par :

$$\text{Corr}(j, k) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i \in I} (x_{ij} - \bar{x}_j) \cdot (x_{ik} - \bar{x}_k)}{s_j \cdot s_k} \quad \text{Equation (12)}$$

La méthode a été appliquée à l'aide du logiciel *TASTEL*[®].

V.6. Résultats des analyses statistiques

V.6.1. Comparaison des variances et des moyennes

1. Irrégularité d'aspect

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	NS						
u(moy)		NS						
u(var)	3	NS	NS					
u(moy)		NS	NS					
u(var)	4	NS	NS	NS				
u(moy)		NS	NS	NS				
u(var)	5	S	NS	NS	NS			
u(moy)		S	S	S	S			
u(var)	6	NS	NS	S	NS	S		
u(moy)		S	S	S	S			
u(var)	7	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
u(moy)		NS	NS	NS	NS	S	S	
u(var)	8	NS	NS	S	NS	S	NS	NS
u(moy)		NS	NS	S	NS	S	NS	NS

2. Epaisseur initiale T_0

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	S						
u(moy)		S						
u(var)	3	NS	NS					
u(moy)		S	NS					
u(var)	4	S	NS	S				
u(moy)		S	NS	S				
u(var)	5	S	NS	NS	NS			
u(moy)		S	S	S	NS			
u(var)	6	S	S	S	S	S		
u(moy)		S	S	S	S	S		
u(var)	7	S	S	S	S	S	NS	
u(moy)		S	S	S	S	S	NS	
u(var)	8	S	S	S	S	S	NS	NS
u(moy)		S	S	S	S	S	S	S

3. Epaisseur finale T_M

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	S						
u(moy)		S						
u(var)	3	S	NS					
u(moy)		S	NS					
u(var)	4	S	NS	S				
u(moy)		S	NS	S				
u(var)	5	S	NS	S	NS			
u(moy)		S	S	S	S			
u(var)	6	S	S	S	S	S		
u(moy)		S	S	S	S	S		
u(var)	7	S	S	S	S	S	NS	
u(moy)		S	S	S	S	S	NS	
u(var)	8	S	S	S	S	S	NS	NS
u(moy)		S	S	S	S	S	NS	S

4. Compressibilité

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	NS						
u(moy)		NS						
u(var)	3	NS	NS					
u(moy)		NS	NS					
u(var)	4	NS	NS	NS				
u(moy)		NS	NS	NS				
u(var)	5	NS	NS	NS	NS			
u(moy)		NS	NS	NS	NS			
u(var)	6	S	S	S	S	S		
u(moy)		S	S	S	S	S		
u(var)	7	S	NS	NS	NS	S	S	
u(moy)		S	S	S	S	S	S	
u(var)	8	S	S	S	S	S	NS	NS
u(moy)		S	S	S	S	S	S	NS

5. Energie dissipée

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	S						
u(moy)		S						
u(var)	3	S	NS					
u(moy)		S	NS					
u(var)	4	S	NS	S				
u(moy)		S	NS	S				
u(var)	5	S	S	NS	S			
u(moy)		S	S	NS	S			
u(var)	6	NS	S	S	S	NS		
u(moy)		S	S	S	S	S		
u(var)	7	NS	S	NS	S	NS	NS	
u(moy)		S	S	S	S	S	NS	
u(var)	8	NS	S	S	S	S	NS	NS
u(moy)		S	S	S	S	S	S	NS

6. Résilience

		1	2	3	4	5	6	7
u(var)	2	NS						
u(moy)		S						
u(var)	3	NS	NS					
u(moy)		S	S					
u(var)	4	NS	S	NS				
u(moy)		S	S	NS				
u(var)	5	NS	S	NS	NS			
u(moy)		NS	S	NS	S			
u(var)	6	S	S	S	S	S		
u(moy)		S	S	S	S	S		
u(var)	7	S	S	S	S	S	NS	
u(moy)		S	S	S	S	S	S	
u(var)	8	S	S	S	S	S	NS	S
u(moy)		S	S	S	S	S	NS	S

V.6.2. Résultats de l'ACP

1. Caractéristiques physiques et mécaniques en compression

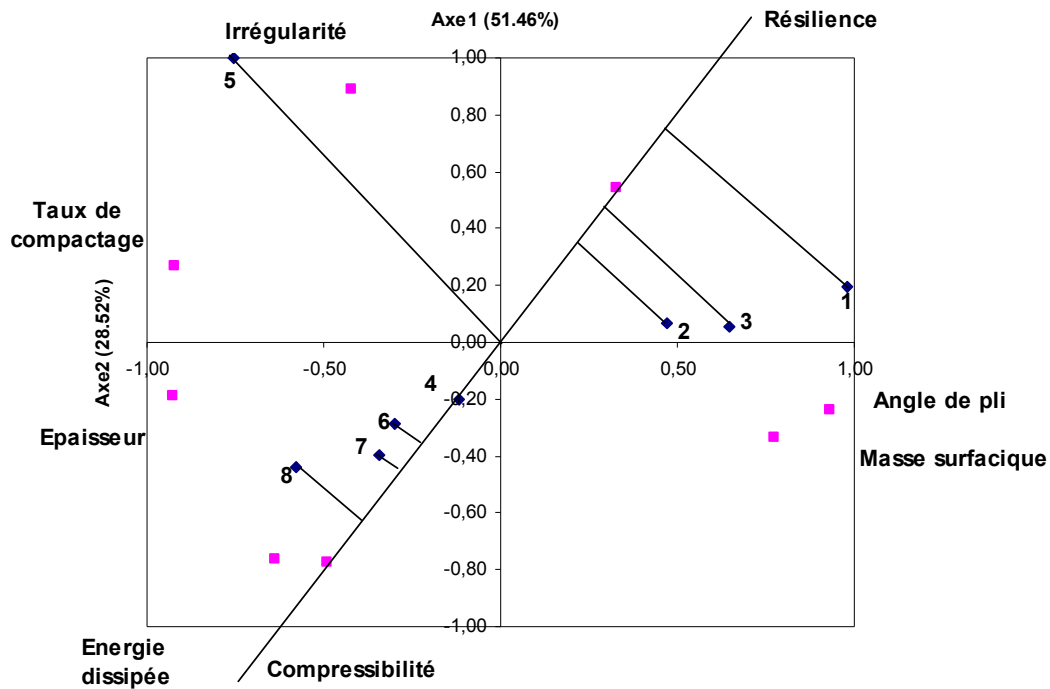


Figure 160. Projection orthogonale des produits suivant l'axe de la variable *résilience*

2. Caractéristiques physiques et mécaniques en compression et paramètres de fabrication

Tableau 43. Coefficients de corrélation entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Taux de compactage	Angle de pli	Irrégularité
Titre du câble	0,46	-0,70	0,00	0,41	0,09	-0,40	0,39	-0,73
T _{Consigne}	-0,82	0,15	-0,81	-0,83	0,23	-0,55	0,56	0,12
V _{ev}	0,73	0,02	0,61	0,85	-0,07	0,34	-0,35	-0,23
V _p	0,78	-0,11	0,83	0,78	-0,31	0,63	-0,63	-0,01
V _{ex}	0,69	-0,33	0,34	0,78	0,25	-0,13	0,11	-0,74
V _c	0,86	-0,27	0,64	0,92	0,03	0,24	-0,25	-0,49

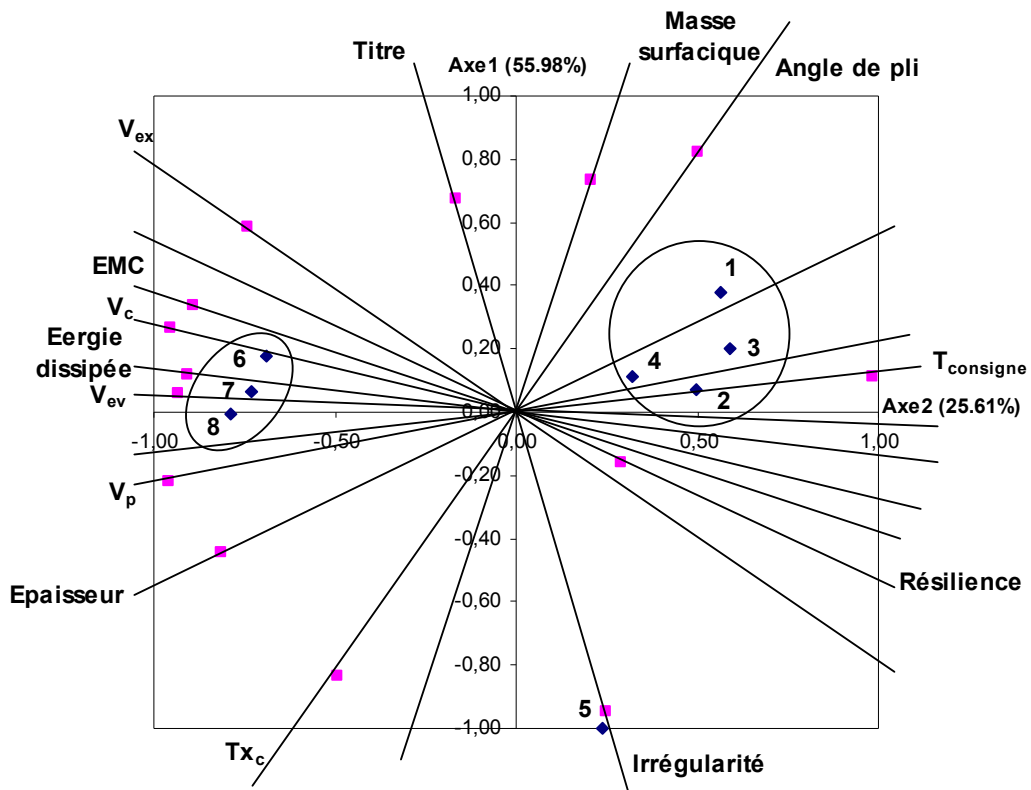


Figure 161. Carte des produits

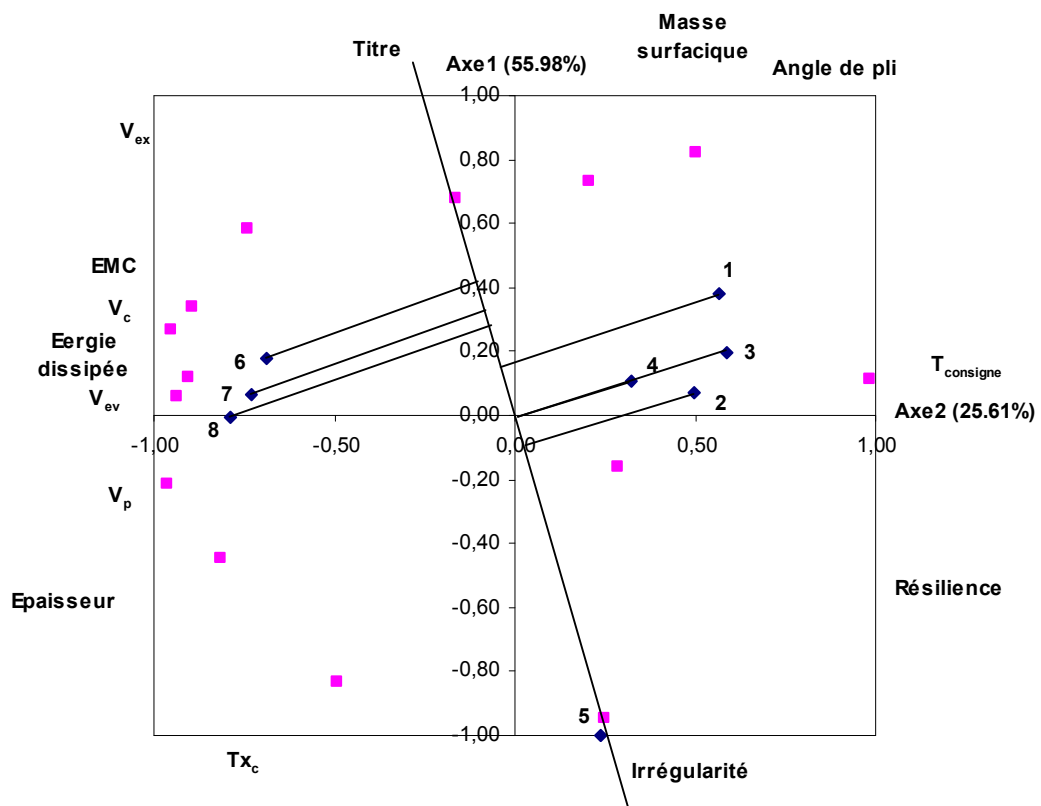


Figure 162. Projection orthogonale suivant l'axe des variables *titre* et *irrégularité*

ANNEXE VI : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 3

VI.A. ETUDE DES NON-TISSES 3D

VI.A.1. Compléments de caractérisations

VI.A.1.1. Test de perméabilité à l'air

Le principe du test consiste à appliquer une pression d'air perpendiculairement à un échantillon pendant un temps donné. Lors de la mesure, on relève le débit d'air qui passe à travers la surface d'essai de l'échantillon.

La perméabilité à l'air a été évaluée à l'aide de l'appareil FX3300 Air Permeability Tester. Le test a été réalisé suivant la norme BS 5'636 qui préconise une pression d'essai de 98 Pa. La surface d'essai été de 5 cm².

Dans le cas des non-tissés 3D plissés, la configuration classique de l'appareil de mesure donne lieu à des fuites latérales d'air lors de la mesure. Nous avons donc adapté l'appareillage de manière à éviter ces fuites. Pour cela, l'échantillon a été placé à l'intérieur d'un anneau isolant comme le montre la Figure 163.

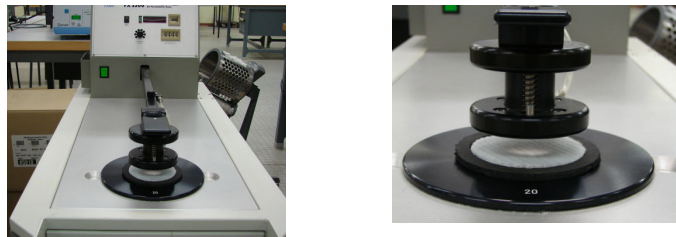


Figure 163. Configuration adaptée du test de perméabilité à l'air

VI.A.1.2. Test de conductivité thermique

La propriété d'isolation thermique des non-tissés 3D a été évaluée par la détermination du coefficient de conductivité thermique à l'aide du module thermique Thermolab II du KES. Le principe du test est illustré à la Figure 164. L'échantillon est placé entre deux plaques l'une à température ambiante et l'autre maintenue chaude. La plaque froide a été équipée d'un élément isolant afin d'éviter les fuites latérales. Le test consiste à évaluer le transfert de chaleur entre ces deux surfaces en mesurant la puissance nécessaire pour maintenir constante la différence de température entre les deux plaques. On relève la puissance moyenne \bar{w} fournie au boîtier chauffant pendant 60 secondes afin de maintenir le ΔT initial. L'essai est réalisé à une température de 20°C qui correspond à celle du laboratoire de métrologie textile (20°C \pm 2°C). La mesure est effectuée sur une surface A de 25 cm. La différence de température ΔT entre les surfaces chaude et froide est fixée à 10°C. Le coefficient de

conductivité thermique K est déterminée à partir de \bar{w} , ΔT et l'épaisseur D de l'échantillon mesurée avec le module de compression KES-FB3 sous une pression de 0,6 kPa dans les conditions standards Kawabata (cf. 2.2.1.1. du chapitre 4.1). Cette pression correspond à celle exercée par le boîtier chauffant. La relation entre ces grandeurs est donnée par :

$$K(w/m.k) = \frac{\bar{w}.D}{A.\Delta T} \quad \text{Equation (13)}$$



Figure 164. Configuration personnalisée du test de conductivité thermique

VI.A.2. Caractéristiques mesurées

1. Masse surfacique

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
M(g/m²)	399,06	482,77	452,35	458,77
écart-type	36,13	40,11	52,19	39,62
CV%	9,05	8,31	11,54	8,64
IC	13,25	14,71	19,14	14,53
LPE%	3,32	3,05	4,23	3,17
n	31	31	31	31

2. Irrégularité d'aspect

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
I (%)	2,01	0,78	0,82	0,30
écart-type	1,67	2,05	0,76	0,49
CV%	83,17	261,24	93,41	166,05
IC	0,61	0,75	0,28	0,18
LPE%	30,50	95,81	34,26	60,90
n	31	31	31	31

3. Angle de pli avant contrecollage θ

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
θ (°)	43,19	41,60	41,44	39,10
écart-type	4,16	2,75	3,00	3,37
CV%	9,64	6,62	7,25	8,63
IC	1,53	1,01	1,10	1,24
LPE%	3,54	2,43	2,66	3,16
n	31	31	31	31

4. Angle de pli après contrecollage θ'

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
θ' (°)	62,33	57,85	57,39	51,11
écart-type	11,46	7,71	8,44	9,12
CV%	18,39	13,32	14,71	17,84
IC	4,20	2,83	3,10	3,34
LPE%	6,74	4,89	5,40	6,54
n	31	31	31	31

5. Taux de compactage avant contrecollage T_{x_C}

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
T_{x_C} (%)	63,22	64,50	64,63	66,55
écart-type	3,37	2,24	2,44	2,76
CV%	5,34	3,48	3,77	4,15
IC	1,24	0,82	0,89	1,01
LPE%	1,96	1,28	1,38	1,52
n	31	31	31	31

6. Taux de compactage après contrecollage T'_{x_C}

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
T'_{x_C} (%)	76,76	76,95	77,00	77,56
écart-type	0,70	0,55	0,55	0,78
CV%	0,92	0,71	0,71	1,00
IC	0,26	0,20	0,20	0,28
LPE%	0,34	0,26	0,26	0,37
n	31	31	31	31

7. Perméabilité à l'air P_{air}

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
P_{air} (l/m²/s)	433,90	427,90	449,90	321,13
écart-type	100,33	84,70	60,72	90,51
CV%	23,12	19,79	13,50	28,18
IC	36,80	31,06	22,27	33,19
LPE%	8,48	7,26	4,95	10,34
n	31	31	31	31

8. Coefficient de conductivité thermique K

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
K (W/m.K)	0,04	0,04	0,05	0,03
écart-type	0,004	0,003	0,003	0,004
CV%	9,70	8,66	7,61	11,02
IC	0,00	0,00	0,00	0,00
LPE%	3,56	3,17	2,79	4,04
n	31	31	31	31

9. Epaisseur initiale T_0

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
T_0 (mm)	5,85	5,93	5,88	5,90
écart-type	0,24	0,26	0,24	0,22
CV%	4,15	4,38	4,09	3,81
IC	0,09	0,10	0,09	0,08
LPE%	1,52	1,60	1,50	1,40
n	31	31	31	31

10. Epaisseur finale T_M

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
T_M (mm)	5,20	5,11	5,15	5,06
écart-type	0,13	0,13	0,16	0,15
CV%	2,55	2,61	3,02	3,03
IC	0,05	0,05	0,06	0,06
LPE%	0,94	0,96	1,11	1,11
n	31	31	31	31

11. Compressibilité EMC

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
EMC (%)	11,10	13,62	12,40	14,22
écart-type	2,25	2,66	2,97	2,23
CV%	20,24	19,49	23,96	15,72
IC	0,82	0,97	1,09	0,82
LPE%	7,42	7,15	8,79	5,77
n	31	31	31	31

12. Energie dissipée WC

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
WC (N.m/m2)	23,77	29,03	26,87	29,80
écart-type	3,15	4,05	4,76	3,56
CV%	13,27	13,94	17,74	11,94
IC	1,16	1,48	1,75	1,31
LPE%	4,87	5,11	6,50	4,38
n	31	31	31	31

13. Résilience RC

Echantillons testés	NT1	NT2	NT3	NT4
RC (%)	87,17	87,33	83,25	85,89
écart-type	4,86	3,61	5,81	3,19
CV%	5,57	4,13	6,98	3,72
IC	1,78	1,32	2,13	1,17
LPE%	2,04	1,51	2,56	1,36
n	31	31	31	31

VI.A.3. Caractéristiques physiques

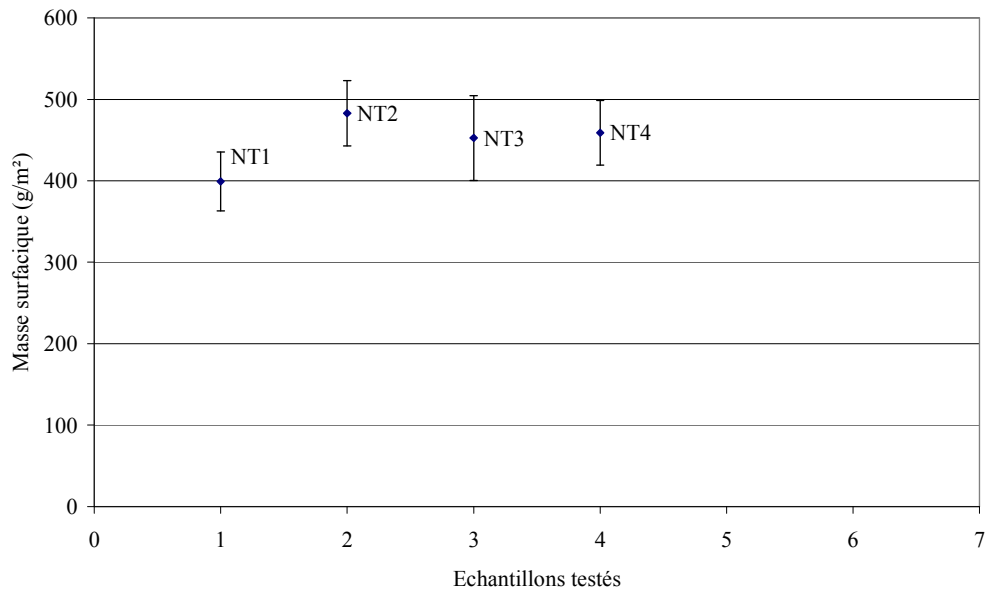


Figure 165. Masse surfacique des échantillons testés

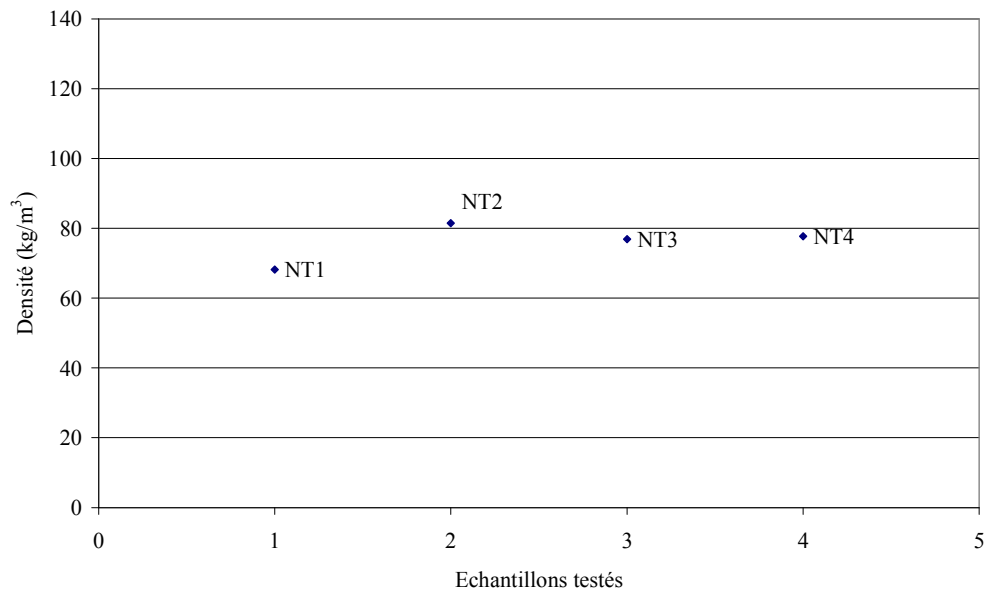


Figure 166. Densité des échantillons testés

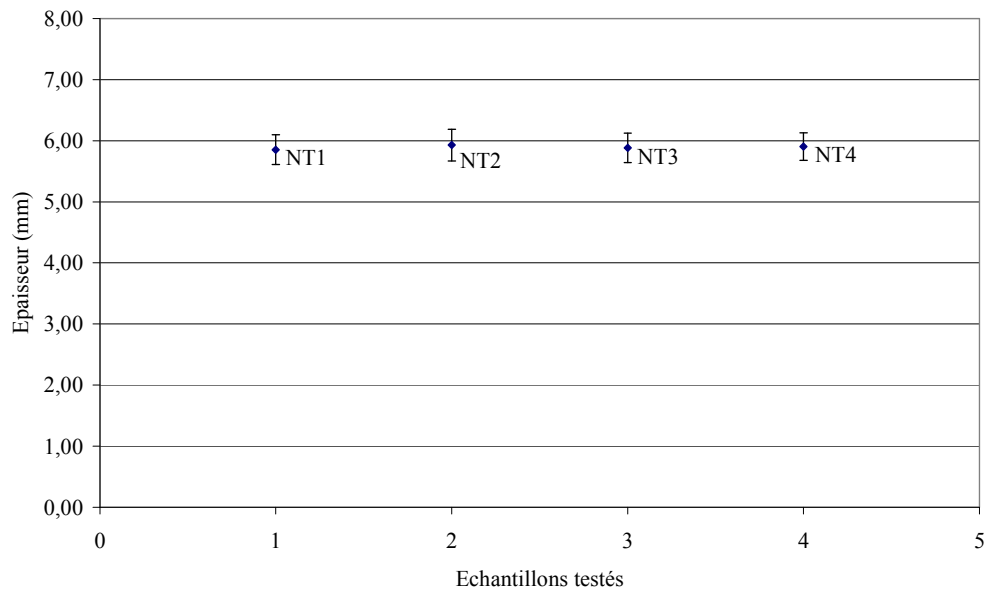


Figure 167. Epaisseur des échantillons testés

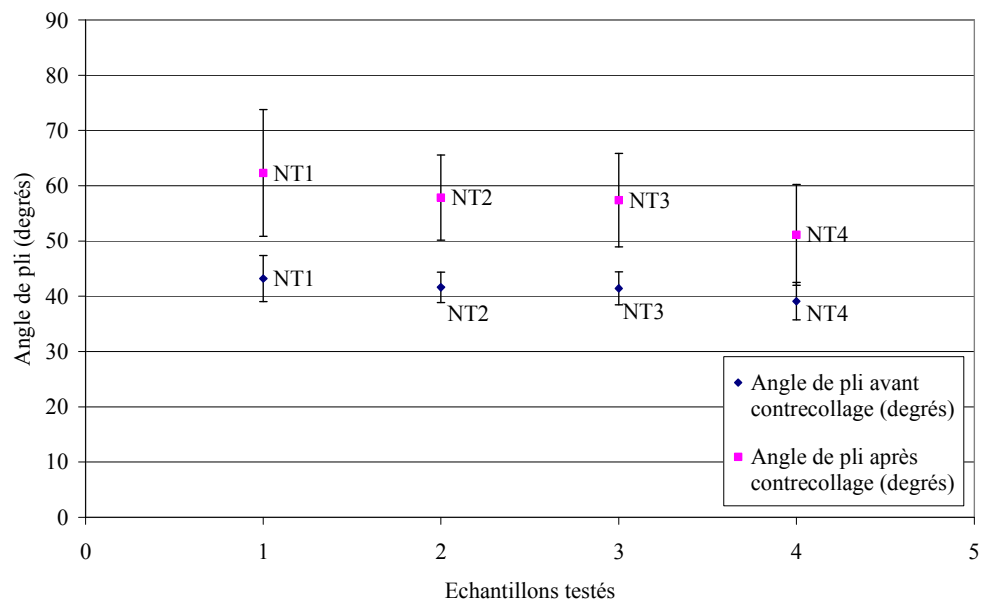


Figure 168. Angle de pli des échantillons testés

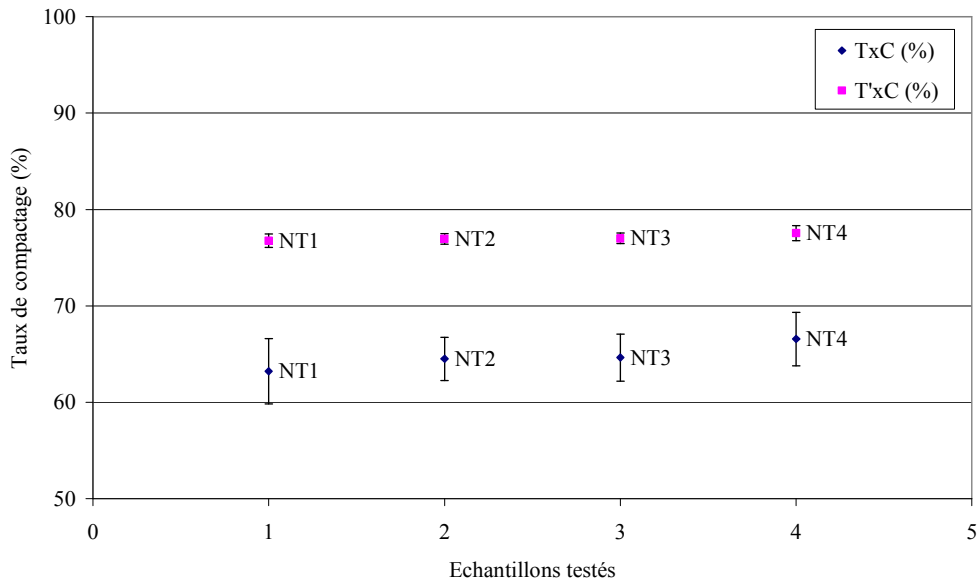


Figure 169. Taux de compactage des échantillons testés

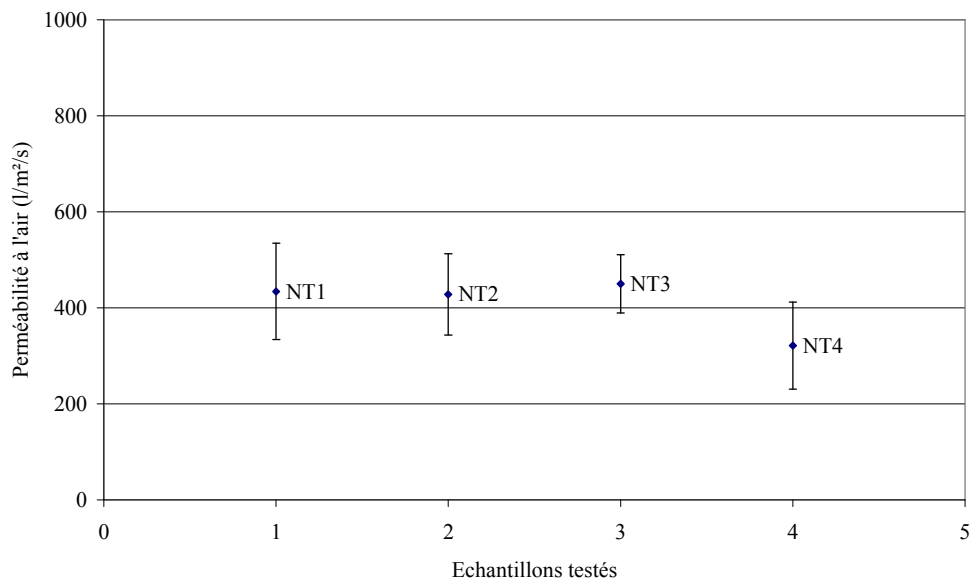


Figure 170. Perméabilité à l'air des échantillons testés

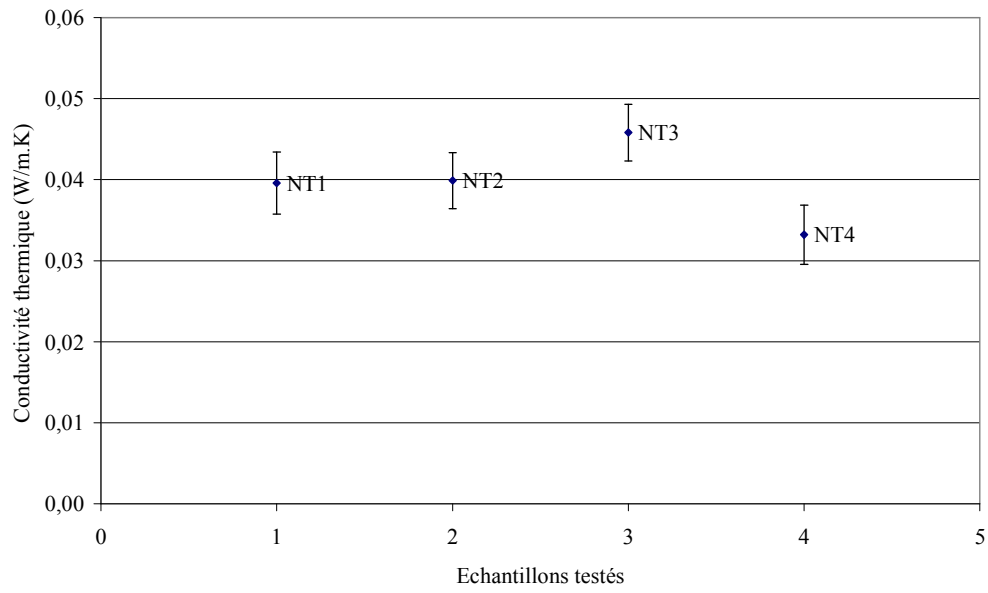


Figure 171. Conductivité thermique des échantillons testés

VI.A.4. Caractéristiques mécaniques en compression

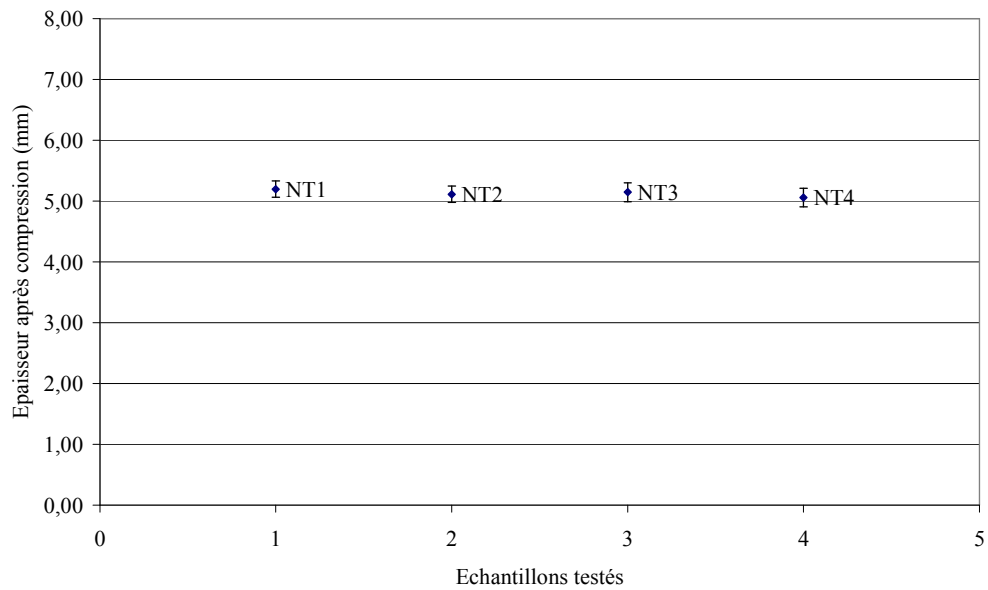


Figure 172. Epaisseur après compression des échantillons testés

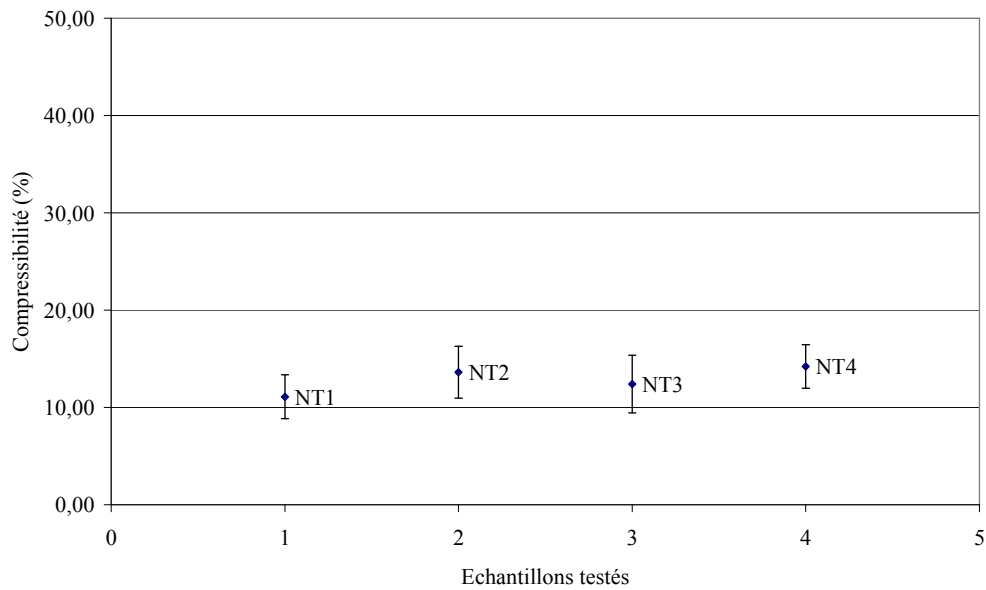


Figure 173. Compressibilité des échantillons testés

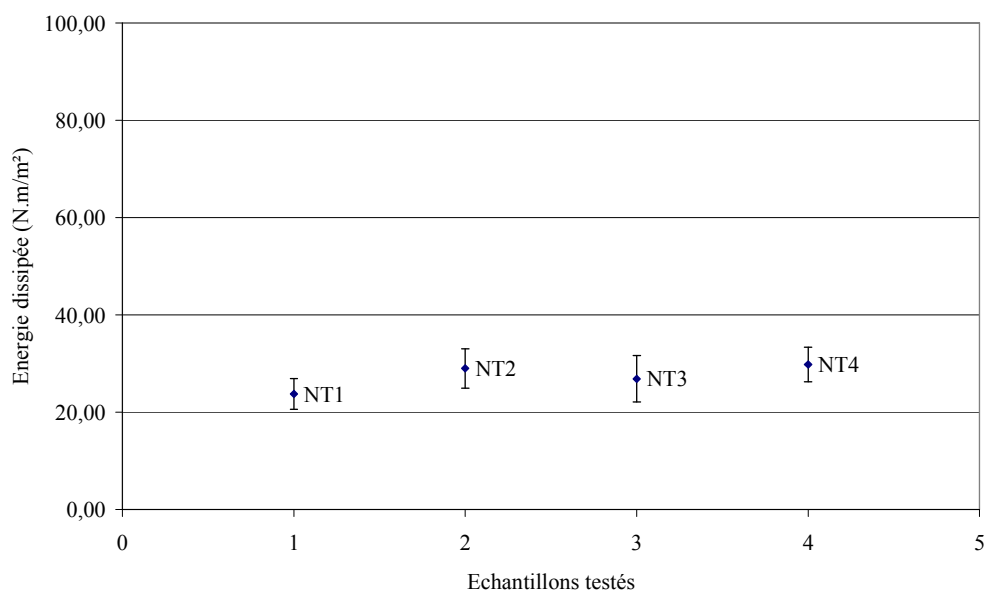


Figure 174. Energie dissipée lors de la compression des échantillons testés

VI.A.5. Résultats des analyses statistiques

VI.A.5.1. Comparaison des variances et des moyennes

Tableau 44. Résultats du test de comparaison des variances et des moyennes

Masse surfacique		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	NS	NS
u(moy)		S	S	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			S	S
u(var)	NT3			NS
u(moy)				NS

Epaisseur T_0		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	NS	NS
u(moy)		NS	NS	NS
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	NS
u(var)	NT3			NS
u(moy)				NS

Angle de pli		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	S	NS	NS
u(moy)		S	NS	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	S
u(var)	NT3			NS
u(moy)				S

Taux de compactage		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	S	NS	NS
u(moy)		S	NS	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	S
u(var)	NT3			NS
u(moy)				S

P_{air}		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	S	NS
u(moy)		NS	S	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	S
u(var)	NT3			S
u(moy)				S

Conductivité thermique		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	NS	NS
u(moy)		NS	S	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			S	S
u(var)	NT3			NS
u(moy)				S

Epaisseur T_M		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	NS	NS
u(moy)		S	NS	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	NS
u(var)	NT3			NS
u(moy)				S

Compressibilité		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	NS	NS
u(moy)		S	NS	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	NS
u(var)	NT3			NS
u(moy)				S

Energie dissipée WC		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	S	NS
u(moy)		S	S	S
u(var)	NT2		NS	NS
u(moy)			NS	NS
u(var)	NT3			NS
u(moy)				S

Résilience		NT2	NT3	NT4
u(var)	NT1	NS	NS	S
u(moy)		NS	S	S
u(var)	NT2		S	NS
u(moy)			S	NS
u(var)	NT3			S
u(moy)				S

S : différence significative

NS : différence non significative

VI.A.5.2. Résultats de l'ACP

1. Caractéristiques physiques et mécaniques en compression

Tableau 45. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Taux de compactage	Angle de pli	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Energie dissipée	1,00								
Résilience	0,06	1,00							
Epaisseur	0,85	0,24	1,00						
Compressibilité	0,99	0,14	0,82	1,00					
Masse surfacique	0,86	-0,11	0,94	0,80	1,00				
Taux de compactage	0,80	-0,25	0,37	0,81	0,47	1,00			
Angle de pli	-0,80	0,25	-0,37	-0,81	-0,47	-1,00	1,00		
Perméabilité à l'air	-0,70	-0,32	-0,34	-0,78	-0,24	-0,83	0,83	1,00	
Conductivité thermique	-0,56	-0,65	-0,33	-0,66	-0,11	-0,56	0,56	0,93	1,00

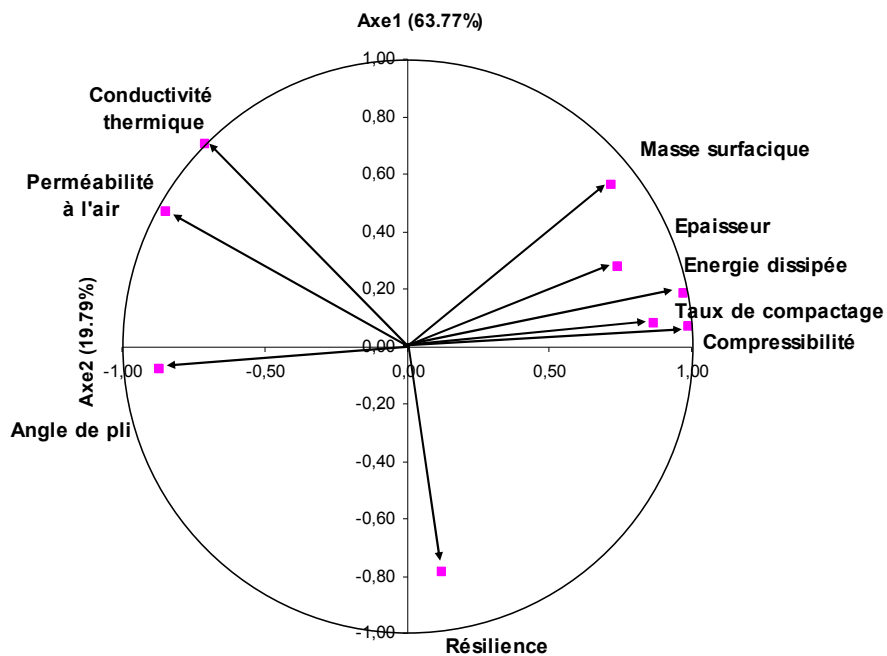


Figure 175. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

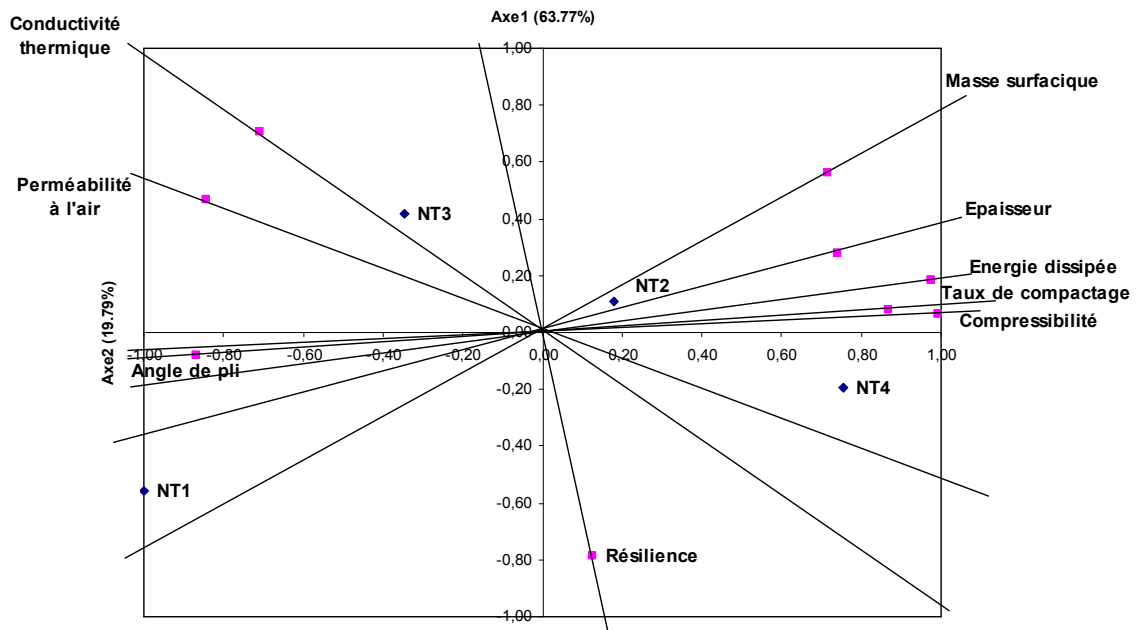


Figure 176. Carte des produits testés

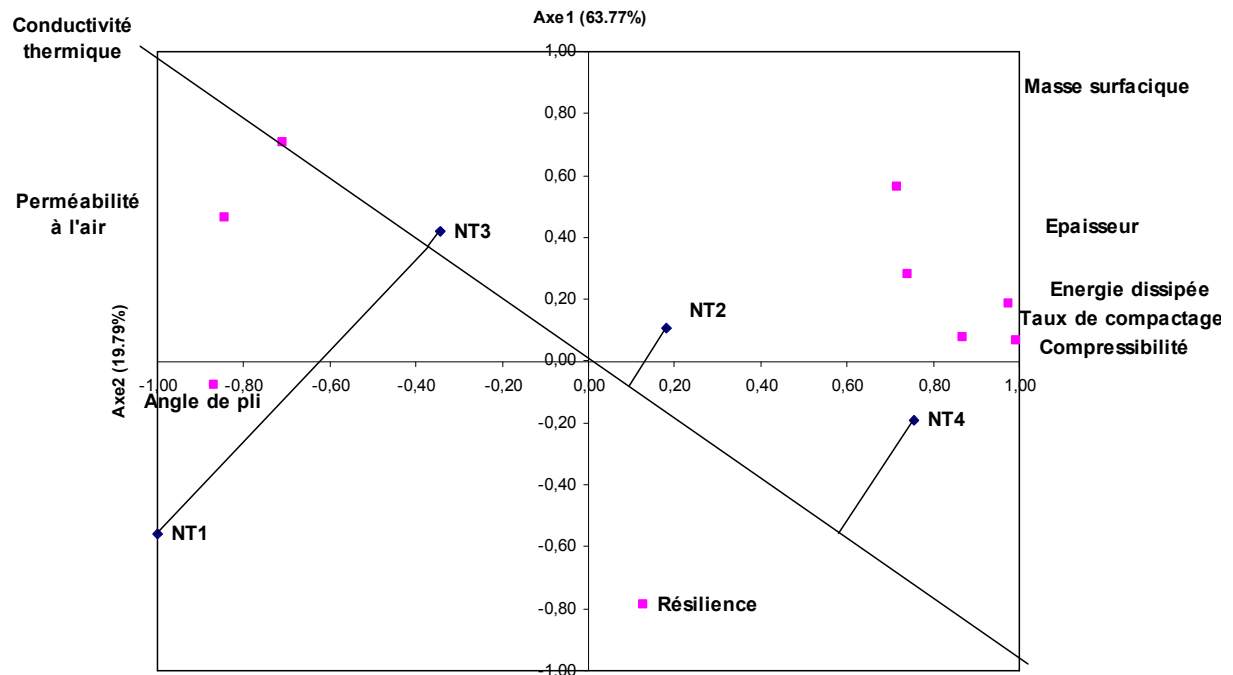
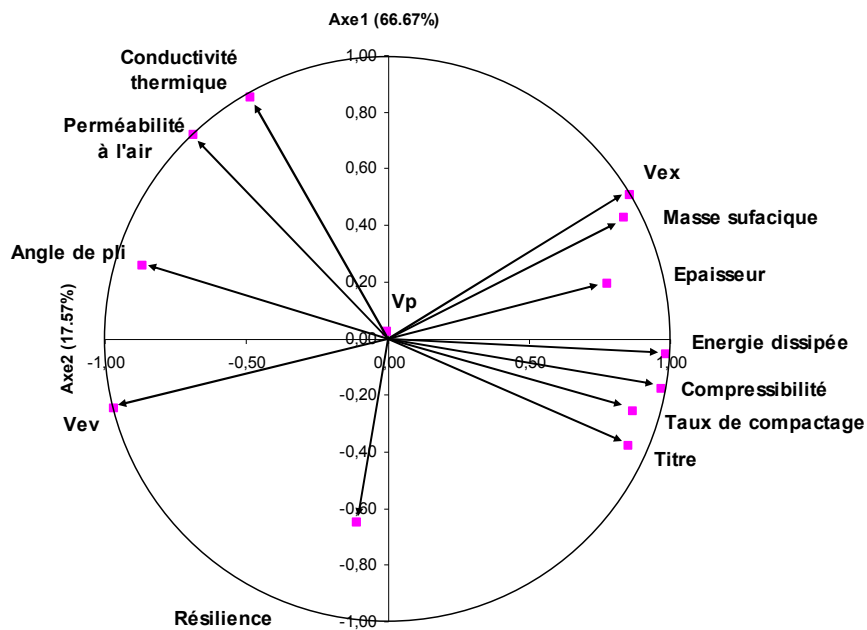


Figure 177. Projection orthogonale des produits suivant l'axe de la variable *conductivité thermique*

2. Caractéristiques physiques et mécaniques en compression et paramètres de fabrication

Tableau 46. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres variables de fabrication

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Taux de compactage	Angle de pli	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Titre	0,80	-0,12	0,37	0,83	0,42	0,99	-0,99	-0,90	-0,67
V _{ev}	-0,92	0,32	-0,75	-0,88	-0,89	-0,80	0,80	0,49	0,24
V _p	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00
V _{ex}	0,83	-0,37	0,81	0,75	0,96	0,58	-0,58	-0,22	0,00

**Figure 178. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression et les paramètres de fabrication**

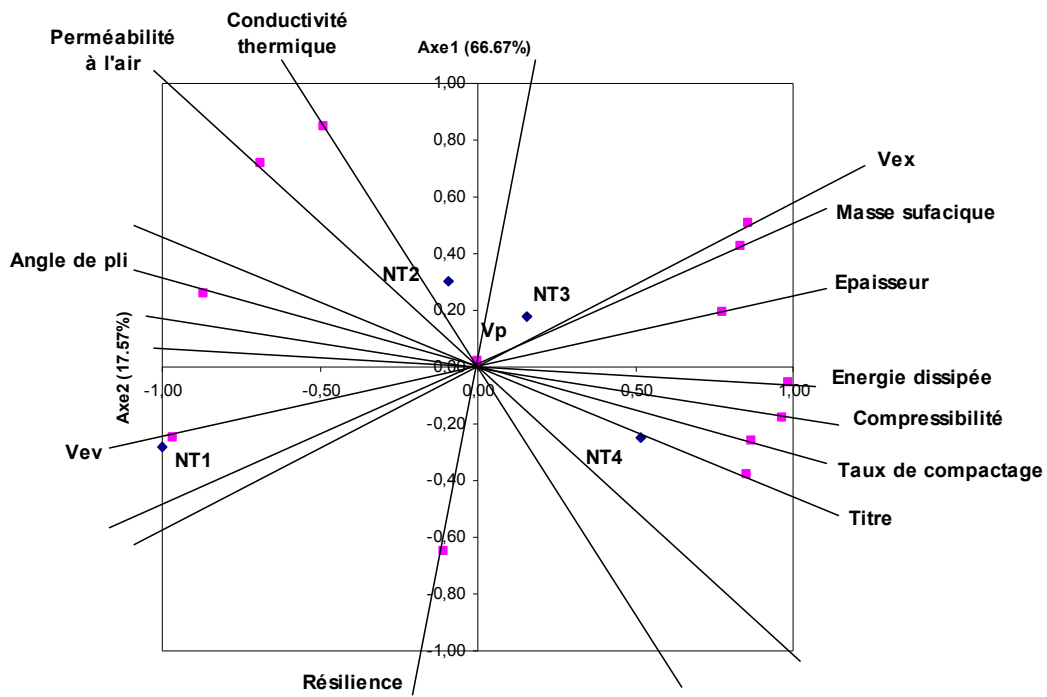


Figure 179. Carte des produits

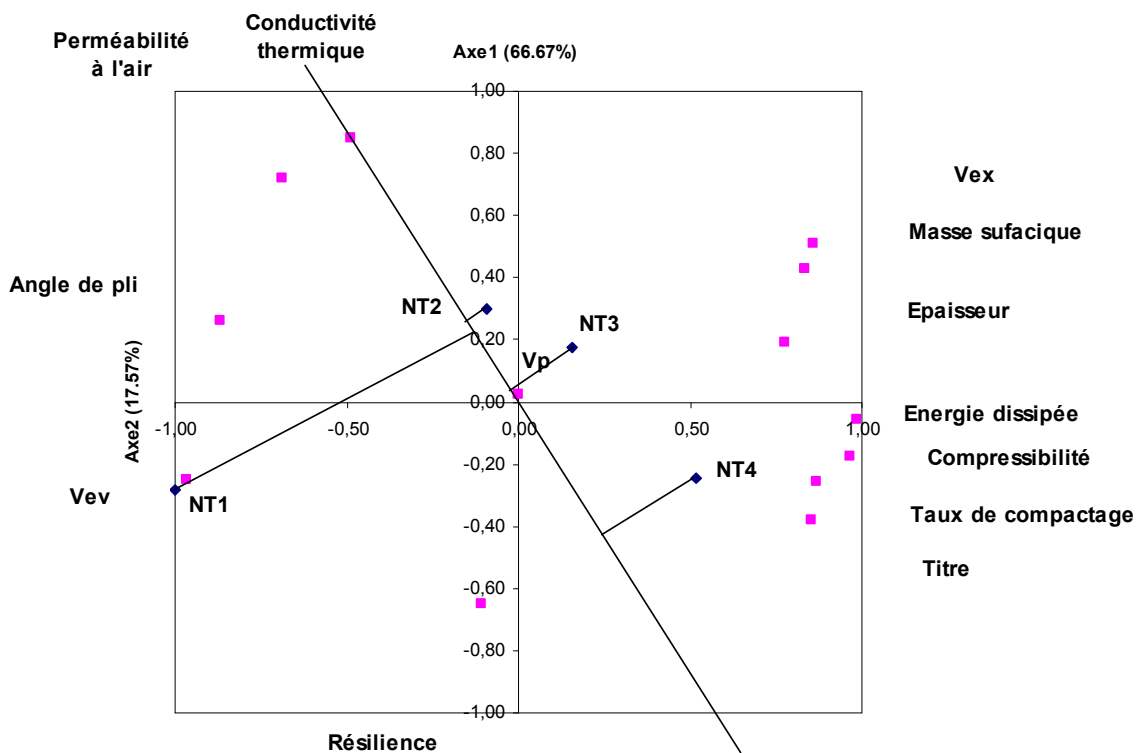


Figure 180. Projection orthogonale suivant l'axe de la variable *conductivité thermique*

VI.B. ETUDE DE L'INFLUENCE DES COUCHES DE CONTRECOLLAGE

VI.B.1. Caractéristiques mesurées

1. Masse surfacique

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	399,06	36,13	9,05	13,25	3,32
NT2	31	482,77	40,11	8,31	14,71	3,05
NT3	31	452,35	52,19	11,54	19,14	4,23
NT4	31	458,77	39,62	8,64	14,53	3,17
a1	15	519,13	26,69	5,14	14,78	2,85
a2	15	553,60	49,94	9,02	27,66	5,00
a3	15	644,13	56,40	8,76	31,23	4,85
a4	15	586,53	30,82	5,25	17,07	2,91
b1	15	518,73	28,35	5,47	15,70	3,03
b2	15	604,00	63,11	10,45	34,95	5,79
b3	15	677,40	63,51	9,38	35,18	5,19
b4	15	602,13	42,07	6,99	23,30	3,87
150_c1	10	580,90	36,86	6,34	26,36	4,54
150_c2	10	658,40	44,21	6,72	31,63	4,80
150_c3	6	651,80	51,68	7,93	54,24	8,32
150_c4	10	677,20	33,46	4,94	23,93	3,53
150_d1	10	719,30	25,42	3,53	18,18	2,53
150_d2	10	762,50	47,85	6,27	34,22	4,49
150_d3	6	829,17	51,92	6,26	54,49	6,57
150_d4	10	810,30	13,79	1,70	9,87	1,22
150_e1	6	679,50	18,06	2,66	18,96	2,79
150_e2	6	740,67	43,52	5,88	45,68	6,17
150_e3	6	714,17	41,81	5,85	43,88	6,14
150_e4	6	730,67	33,48	4,58	35,14	4,81

2. Perméabilité à l'air P_{air}

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	433,90	100,33	23,12	36,80	8,48
NT2	31	427,90	84,70	19,79	31,06	7,26
NT3	31	449,90	60,72	13,50	22,27	4,95
NT4	31	321,13	90,51	28,18	33,19	10,34
a1	15	452,87	79,68	17,60	44,13	9,75
a2	15	504,93	52,38	10,37	29,01	5,75
a3	15	407,53	77,98	19,13	43,19	10,60
a4	15	521,53	42,78	8,20	23,69	4,54
b1	15	719,00	91,81	12,77	50,85	7,07
b2	15	707,07	72,34	10,23	40,06	5,67
b3	15	581,20	102,94	17,71	57,01	9,81
b4	15	750,07	80,35	10,71	44,50	5,93
150_c1	10	270,90	53,17	19,63	38,03	14,04
150_c2	10	275,90	43,13	15,63	30,85	11,18
150_c3	6	253,50	29,23	11,53	30,68	12,10
150_c4	10	250,00	29,44	11,78	21,06	8,42
150_d1	10	182,00	15,37	8,44	10,99	6,04
150_d2	10	215,10	29,82	13,86	21,33	9,92
150_d3	6	176,00	32,24	18,32	33,84	19,22
150_d4	10	195,10	14,13	7,24	10,11	5,18
150_e1	6	182,67	34,42	18,85	36,13	19,78
150_e2	6	221,17	16,47	7,45	17,29	7,82
150_e3	6	235,00	35,24	14,99	36,98	15,74
150_e4	6	203,83	18,28	8,97	19,19	9,41

3. Coefficient de conductivité thermique K

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	0,04	0,004	9,70	0,001	3,56
NT2	31	0,04	0,003	8,66	0,001	3,17
NT3	31	0,05	0,003	7,61	0,001	2,79
NT4	31	0,03	0,004	11,02	0,001	4,04
a1	15	0,00	0,001	34,25	0,001	18,97
a2	15	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00
a3	15	0,02	0,002	9,94	0,001	5,51
a4	15	0,01	0,002	18,46	0,001	10,22
b1	15	0,01	0,001	21,72	0,001	12,03
b2	15	0,00	0,001	41,74	0,001	23,11
b3	15	0,02	0,002	12,30	0,001	6,81
b4	15	0,01	0,002	20,31	0,001	11,25
150_c1	10	0,04	0,003	6,98	0,002	4,99
150_c2	10	0,04	0,001	3,19	0,001	2,28
150_c3	6	0,04	0,001	2,98	0,001	3,13
150_c4	10	0,05	0,002	4,11	0,001	2,94
150_d1	10	0,02	0,002	9,30	0,001	6,65
150_d2	10	0,02	0,001	5,86	0,001	4,19
150_d3	6	0,02	0,000	0,00	0,000	0,00
150_d4	10	0,02	0,002	8,11	0,001	5,80
150_e1	6	0,02	0,001	5,21	0,001	5,47
150_e2	6	0,03	0,002	5,77	0,002	6,05
150_e3	6	0,03	0,002	8,75	0,002	9,18
150_e4	6	0,03	0,001	5,34	0,001	5,61

4. Epaisseur initiale T_0

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	5,85	0,24	4,15	0,09	1,52
NT2	31	5,93	0,26	4,38	0,10	1,60
NT3	31	5,88	0,24	4,09	0,09	1,50
NT4	31	5,90	0,22	3,81	0,08	1,40
a1	15	6,19	0,23	3,65	0,13	2,02
a2	15	6,05	0,18	2,98	0,10	1,65
a3	15	6,36	0,18	2,87	0,10	1,59
a4	15	6,22	0,20	3,17	0,11	1,76
b1	15	5,45	0,16	3,00	0,09	1,66
b2	15	5,33	0,16	2,96	0,09	1,64
b3	15	5,55	0,05	0,86	0,03	0,48
b4	15	5,39	0,14	2,65	0,08	1,47
150_c1	10	6,22	0,35	5,62	0,25	4,02
150_c2	10	6,42	0,22	3,42	0,16	2,45
150_c3	6	6,33	0,30	4,79	0,32	5,03
150_c4	10	6,46	0,29	4,44	0,21	3,18
150_d1	10	6,69	0,17	2,51	0,12	1,80
150_d2	10	6,70	0,27	3,98	0,19	2,84
150_d3	6	6,63	0,10	1,43	0,10	1,51
150_d4	10	6,66	0,17	2,57	0,12	1,84
150_e1	6	7,27	0,12	1,69	0,13	1,77
150_e2	6	7,41	0,15	2,06	0,16	2,16
150_e3	6	7,35	0,19	2,53	0,20	2,66
150_e4	6	7,29	0,21	2,93	0,22	3,08

5. Epaisseur finale T_M

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	5,20	0,13	2,55	0,05	0,94
NT2	31	5,11	0,13	2,61	0,05	0,96
NT3	31	5,15	0,16	3,02	0,06	1,11
NT4	31	5,06	0,15	3,03	0,06	1,11
a1	15	5,23	0,17	3,26	0,09	1,80
a2	15	5,14	0,21	4,00	0,11	2,22
a3	15	5,44	0,16	2,92	0,09	1,62
a4	15	5,24	0,15	2,77	0,08	1,53
b1	15	5,09	0,11	2,23	0,06	1,24
b2	15	5,01	0,17	3,45	0,10	1,91
b3	15	5,25	0,08	1,55	0,05	0,86
b4	15	5,04	0,11	2,17	0,06	1,20
150_c1	10	5,43	0,35	6,37	0,25	4,56
150_c2	10	5,58	0,11	1,98	0,08	1,42
150_c3	6	5,44	0,20	3,70	0,21	3,88
150_c4	10	5,55	0,10	1,82	0,07	1,30
150_d1	10	5,88	0,21	3,50	0,15	2,50
150_d2	10	5,76	0,16	2,75	0,11	1,97
150_d3	6	5,90	0,08	1,33	0,08	1,39
150_d4	10	5,91	0,15	2,56	0,11	1,83
150_e1	6	5,97	0,15	2,49	0,16	2,62
150_e2	6	5,95	0,14	2,31	0,14	2,42
150_e3	6	5,92	0,17	2,94	0,18	3,08
150_e4	6	5,91	0,13	2,18	0,14	2,29

6. Compressibilité EMC

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	11,10	2,25	20,24	0,82	7,42
NT2	31	13,62	2,66	19,49	0,97	7,15
NT3	31	12,40	2,97	23,96	1,09	8,79
NT4	31	14,22	2,23	15,72	0,82	5,77
a1	15	15,51	1,30	8,38	0,72	4,64
a2	15	15,03	2,05	13,61	1,13	7,54
a3	15	14,35	1,74	12,16	0,97	6,73
a4	15	15,69	2,16	13,79	1,20	7,64
b1	15	6,54	1,64	25,09	0,91	13,89
b2	15	5,96	1,73	29,11	0,96	16,12
b3	15	5,37	1,65	30,67	0,91	16,99
b4	15	6,39	1,41	22,04	0,78	12,21
150_c1	10	12,70	1,90	14,98	1,36	10,72
150_c2	10	13,10	2,09	15,93	1,49	11,40
150_c3	6	13,95	2,30	16,49	2,42	17,31
150_c4	10	13,86	3,36	24,24	2,40	17,34
150_d1	10	12,09	1,69	13,97	1,21	9,99
150_d2	10	13,94	2,09	15,00	1,50	10,73
150_d3	6	11,03	1,96	17,79	2,06	18,67
150_d4	10	11,25	1,27	11,27	0,91	8,06
150_e1	6	17,87	2,93	16,42	3,08	17,23
150_e2	6	19,66	2,97	15,11	3,12	15,86
150_e3	6	19,50	2,76	14,13	2,89	14,83
150_e4	6	18,88	2,52	13,37	2,65	14,03

7. Energie dissipée WC

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	23,77	3,15	13,27	1,16	4,87
NT2	31	29,03	4,05	13,94	1,48	5,11
NT3	31	26,87	4,76	17,74	1,75	6,50
NT4	31	29,80	3,56	11,94	1,31	4,38
a1	15	30,93	1,96	6,33	1,08	3,51
a2	15	31,71	2,65	8,36	1,47	4,63
a3	15	31,11	2,55	8,20	1,41	4,54
a4	15	32,68	2,08	6,37	1,15	3,53
b1	15	18,98	3,78	19,91	2,09	11,03
b2	15	20,54	4,31	21,00	2,39	11,63
b3	15	21,81	4,02	18,42	2,22	10,20
b4	15	20,32	3,44	16,90	1,90	9,36
150_c1	10	25,58	2,73	10,68	1,95	7,64
150_c2	10	25,32	1,77	6,99	1,27	5,00
150_c3	6	26,47	2,32	8,77	2,44	9,21
150_c4	10	24,19	1,81	7,50	1,30	5,36
150_d1	10	31,09	4,65	14,95	3,32	10,69
150_d2	10	27,98	1,78	6,38	1,28	4,56
150_d3	6	27,53	1,82	6,59	1,91	6,92
150_d4	10	26,92	1,74	6,47	1,24	4,62
150_e1	6	34,93	3,09	8,86	3,25	9,30
150_e2	6	33,37	2,64	7,90	2,77	8,29
150_e3	6	37,16	6,88	18,51	7,22	19,43
150_e4	6	33,50	1,35	4,03	1,42	4,23

8. Résilience RC

Echantillons testés	n	moyenne	écart-type	CV%	IC	LPE%
NT1	31	87,17	4,86	5,57	1,78	2,04
NT2	31	87,33	3,61	4,13	1,32	1,51
NT3	31	83,25	5,81	6,98	2,13	2,56
NT4	31	85,89	3,19	3,72	1,17	1,36
a1	15	70,80	2,10	2,96	1,16	1,64
a2	15	71,08	3,36	4,72	1,86	2,62
a3	15	68,31	3,46	5,07	1,92	2,81
a4	15	70,94	1,71	2,41	0,95	1,34
b1	15	86,04	11,18	13,00	6,19	7,20
b2	15	88,13	6,83	7,75	3,78	4,29
b3	15	84,12	10,02	11,91	5,55	6,59
b4	15	88,81	9,65	10,86	5,34	6,02
150_c1	10	66,04	4,57	6,91	3,27	4,95
150_c2	10	65,22	1,33	2,03	0,95	1,45
150_c3	6	64,72	2,08	3,22	2,19	3,38
150_c4	10	66,88	2,31	3,45	1,65	2,47
150_d1	10	63,48	5,65	8,91	4,05	6,37
150_d2	10	65,87	2,02	3,07	1,45	2,20
150_d3	6	66,92	1,17	1,75	1,23	1,84
150_d4	10	66,75	1,84	2,76	1,32	1,97
150_e1	6	63,50	4,01	6,32	4,21	6,63
150_e2	6	65,84	3,03	4,60	3,18	4,83
150_e3	6	59,43	0,61	1,03	0,65	1,09
150_e4	6	63,22	3,27	5,17	3,43	5,43

VI.B.2. Caractéristiques physiques

VI.B.2.1. Graphiques

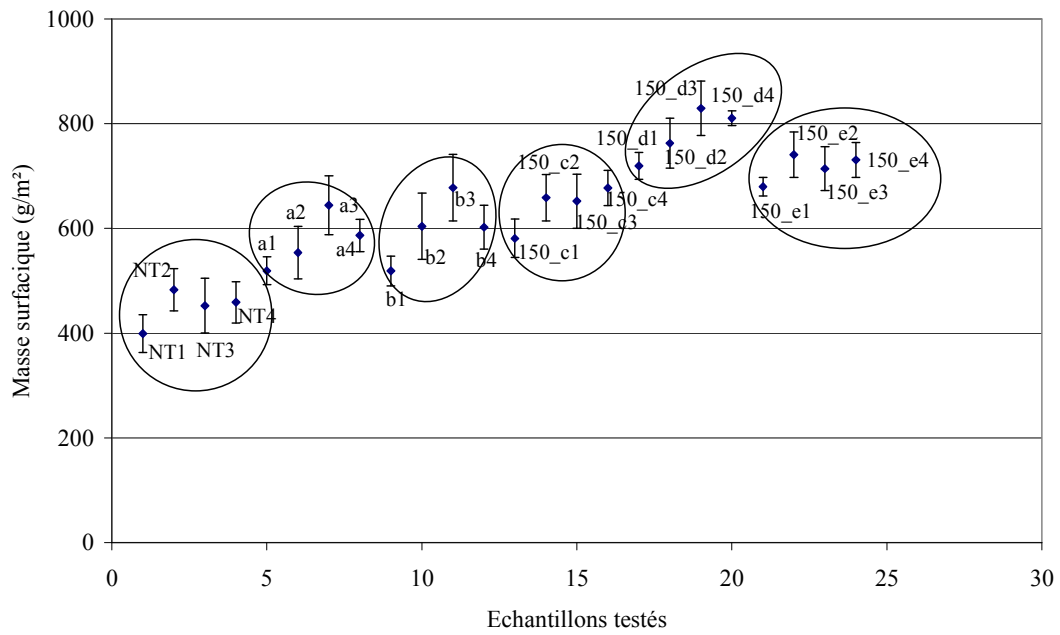


Figure 181. Masse surfacique des échantillons testés

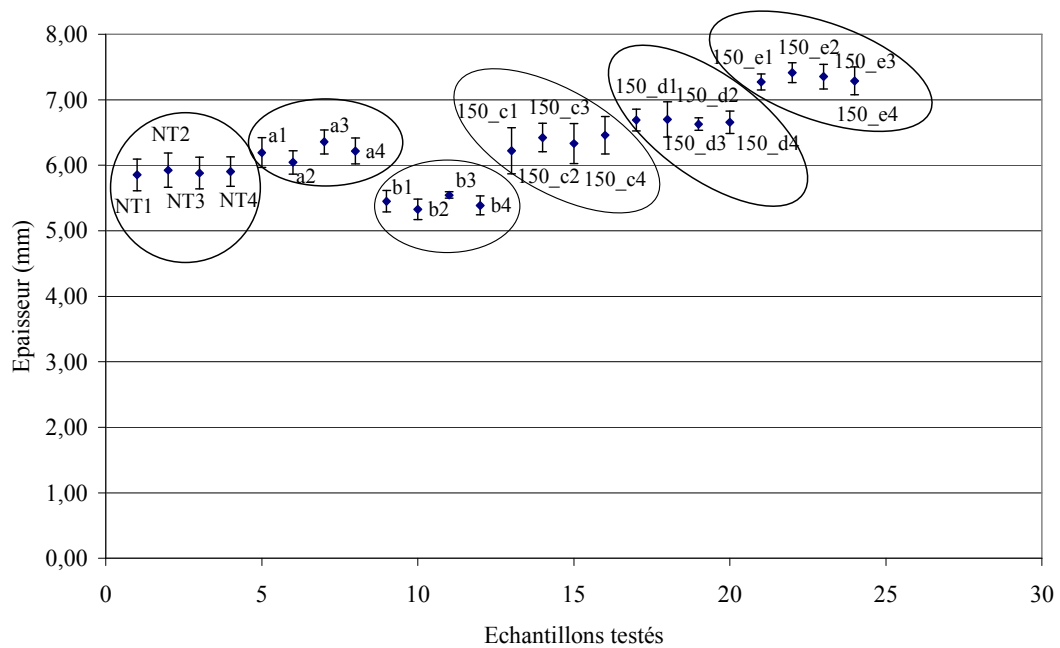


Figure 182. Épaisseur des échantillons testés

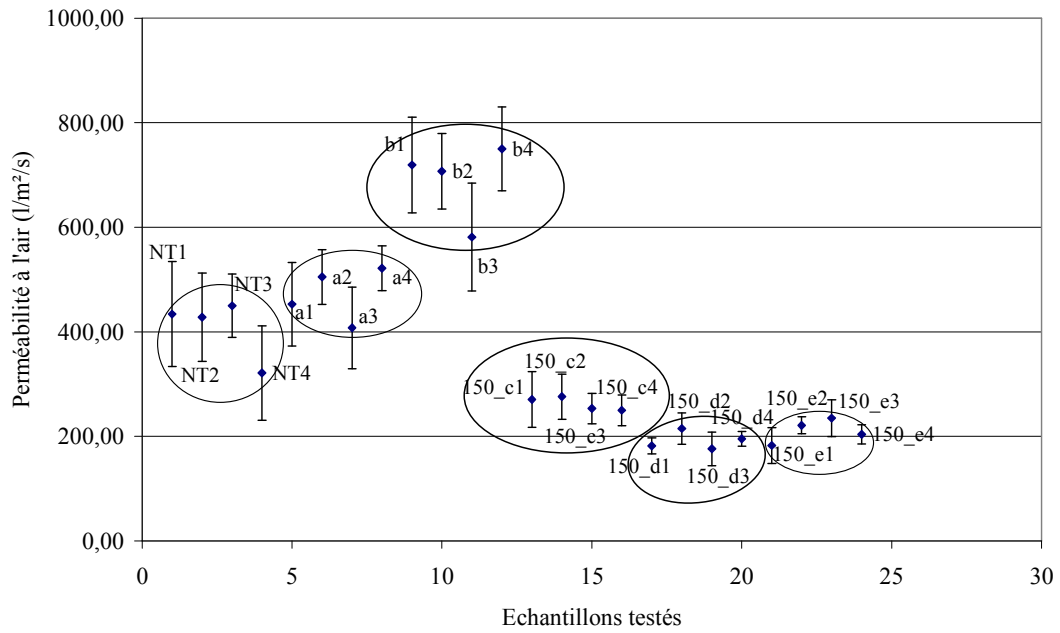


Figure 183. Perméabilité à l'air des échantillons testés

VI.B.2.2. Diagrammes radar

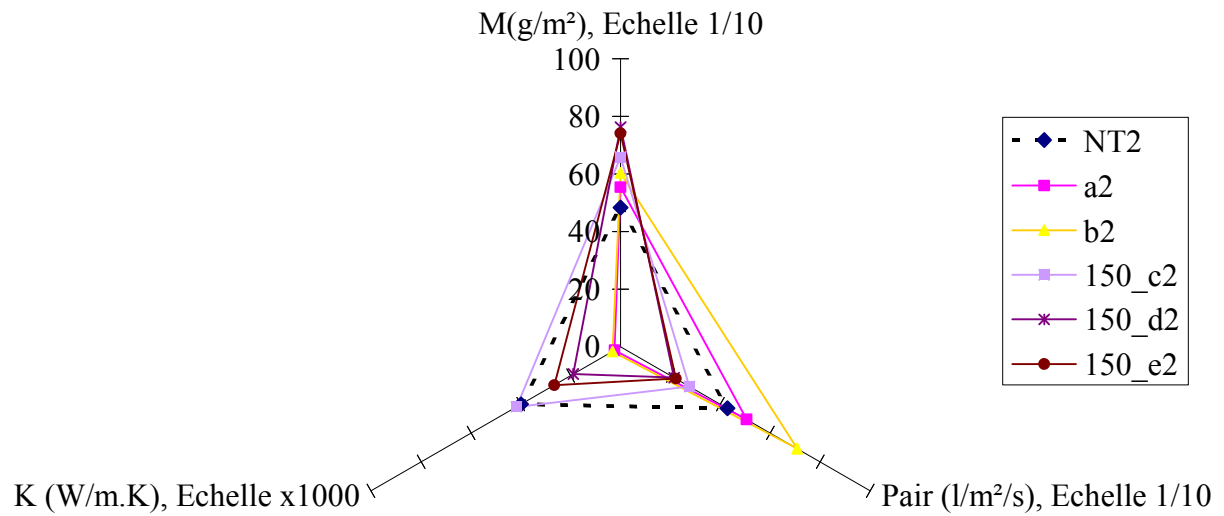


Figure 184. Caractéristiques physiques des produits dérivés de NT2

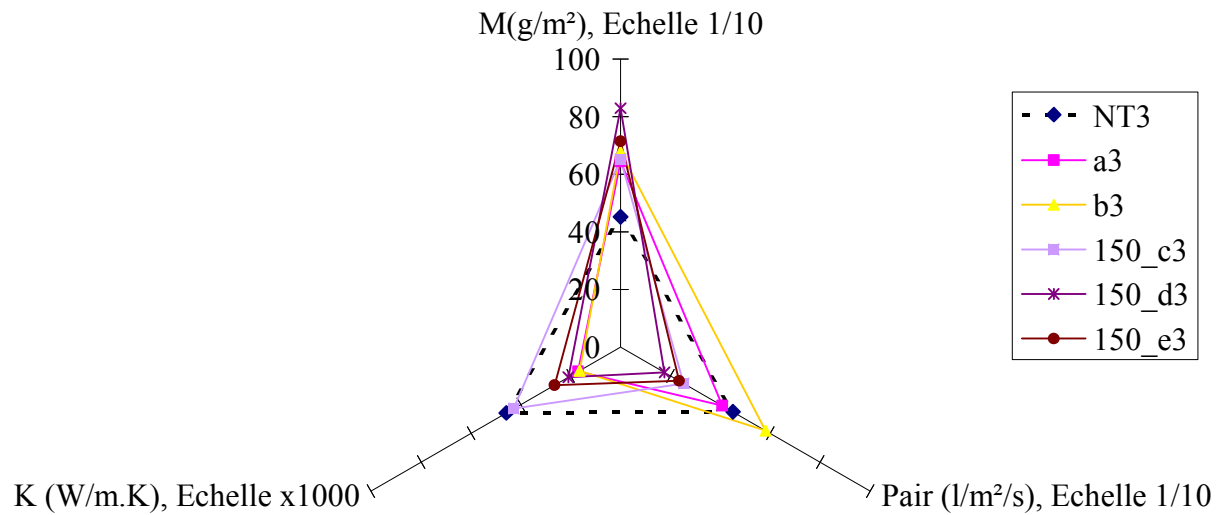


Figure 185. Caractéristiques physiques des produits dérivés de NT3

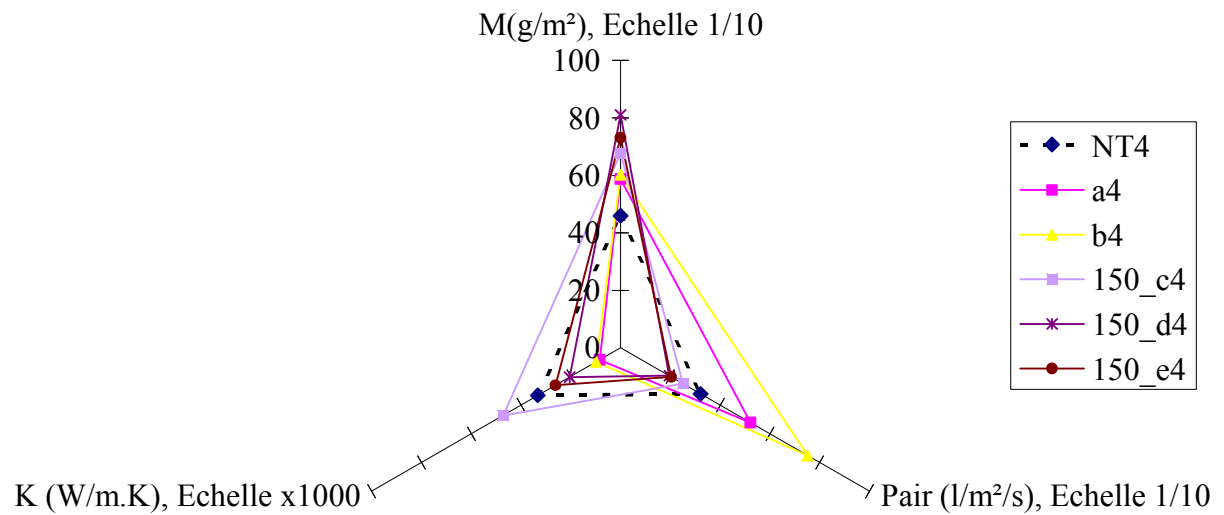


Figure 186. Caractéristiques physiques des produits dérivés de NT

VI.B.3. Caractéristiques mécaniques en compression

VI.B.3.1. Graphiques

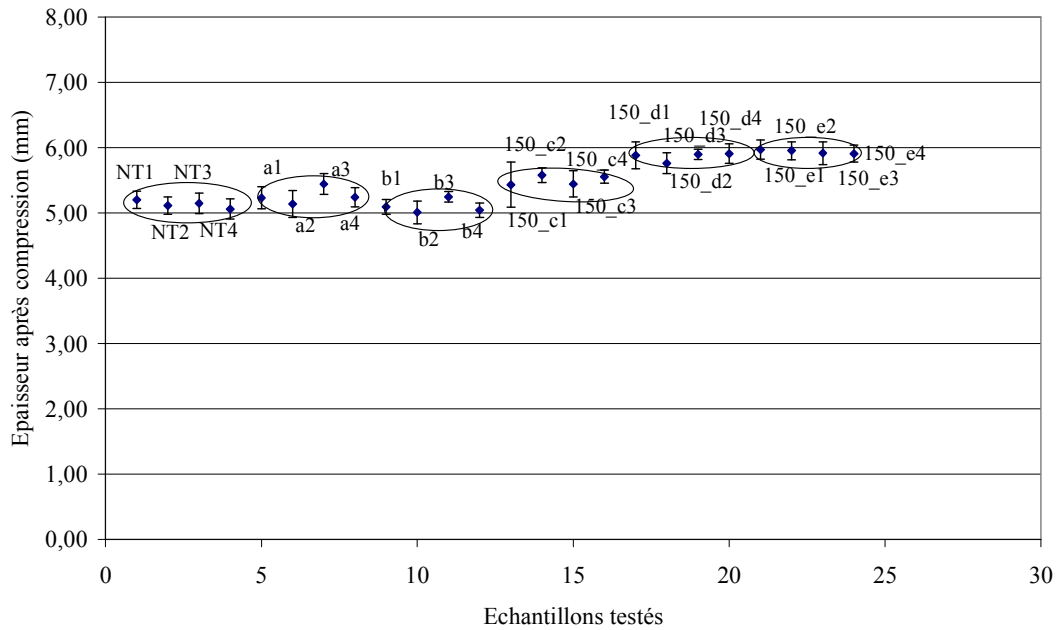


Figure 187. Épaisseur après compression des produits testés

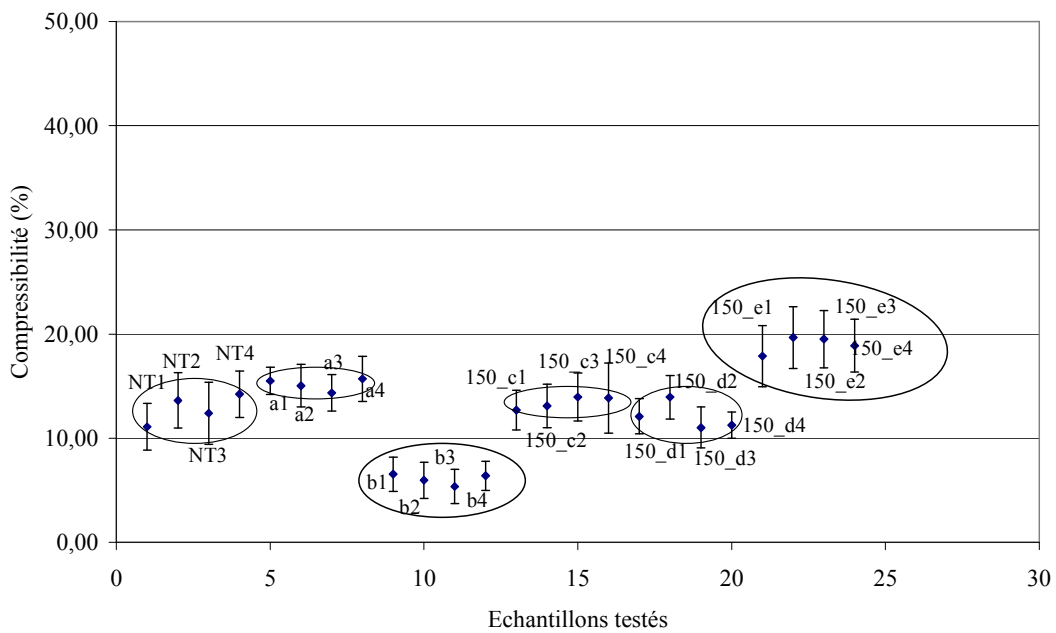


Figure 188. Compressibilité des produits testés

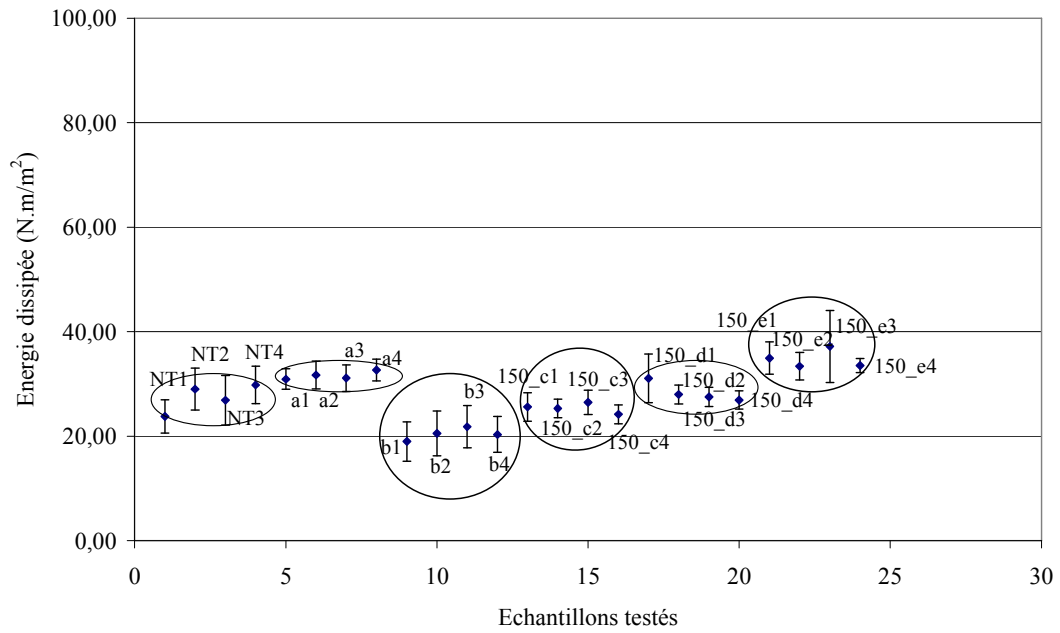


Figure 189. Energie dissipée des produits testés

VI.B.3.2. Diagrammes radar

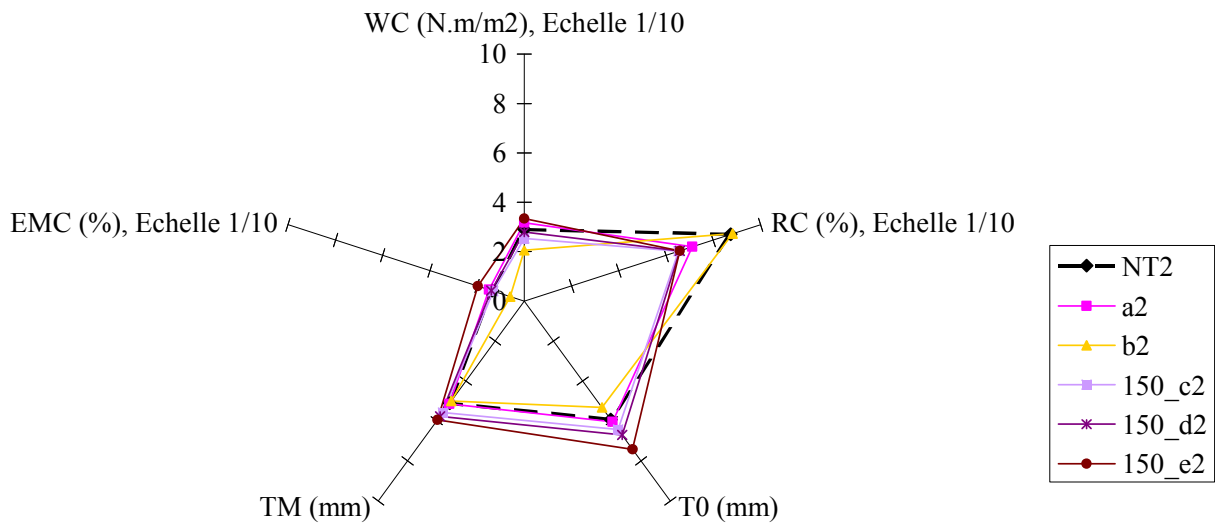


Figure 190. Caractéristiques mécaniques en compression des produits dérivés de NT2

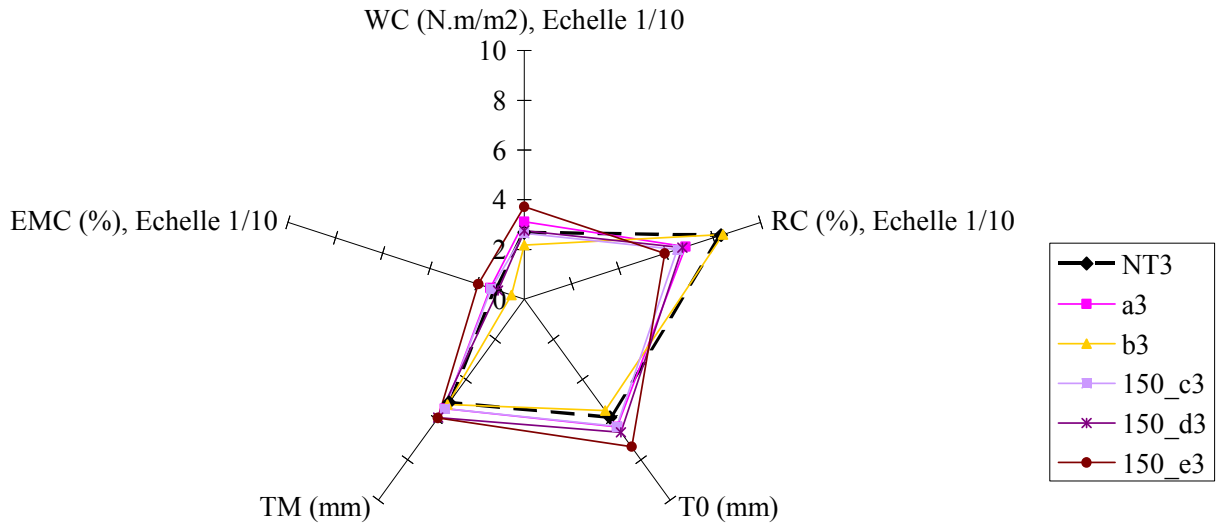


Figure 191. Caractéristiques mécaniques en compression des produits dérivés de NT3

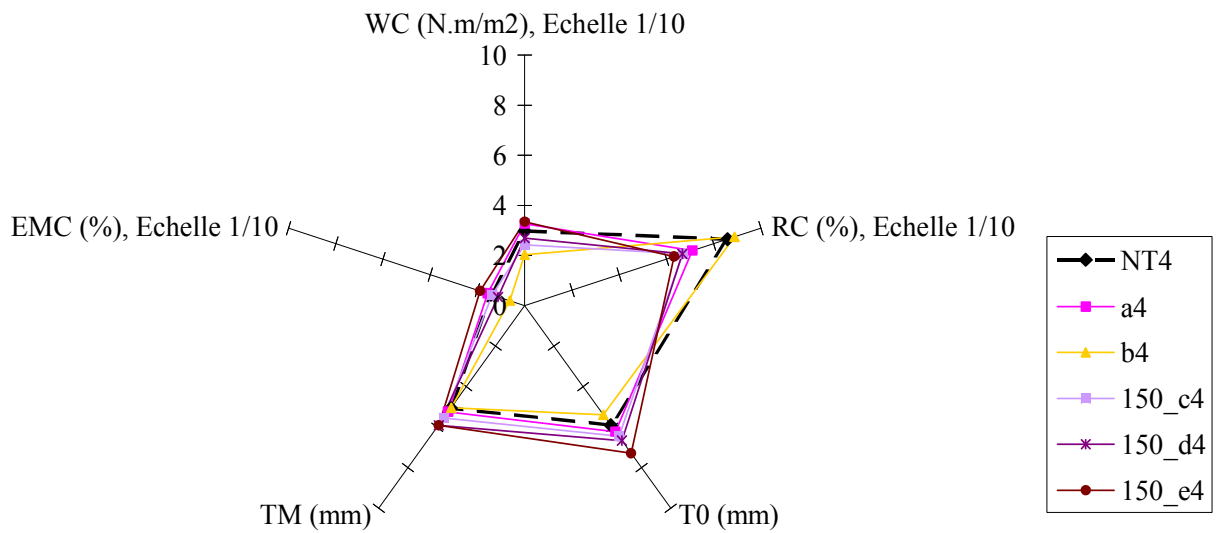


Figure 192. Caractéristiques mécaniques en compression des produits dérivés de NT4

VI.B.3.3. Courbes de compression

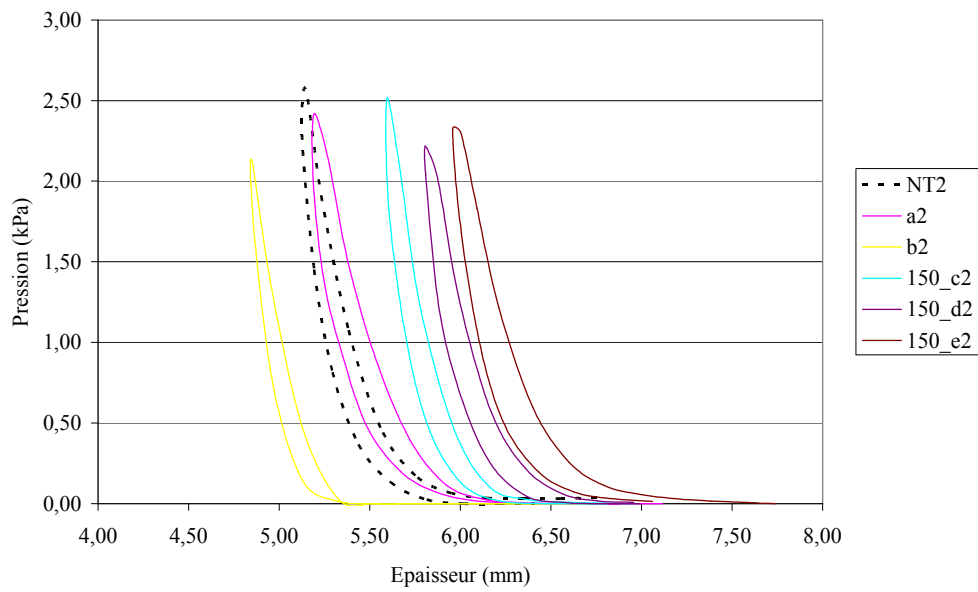


Figure 193. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT2

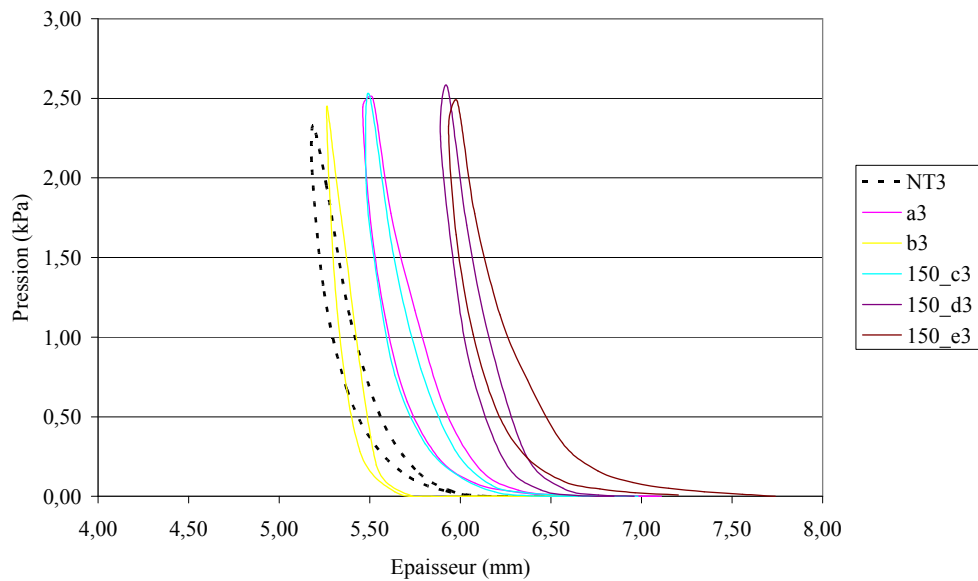


Figure 194. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT3

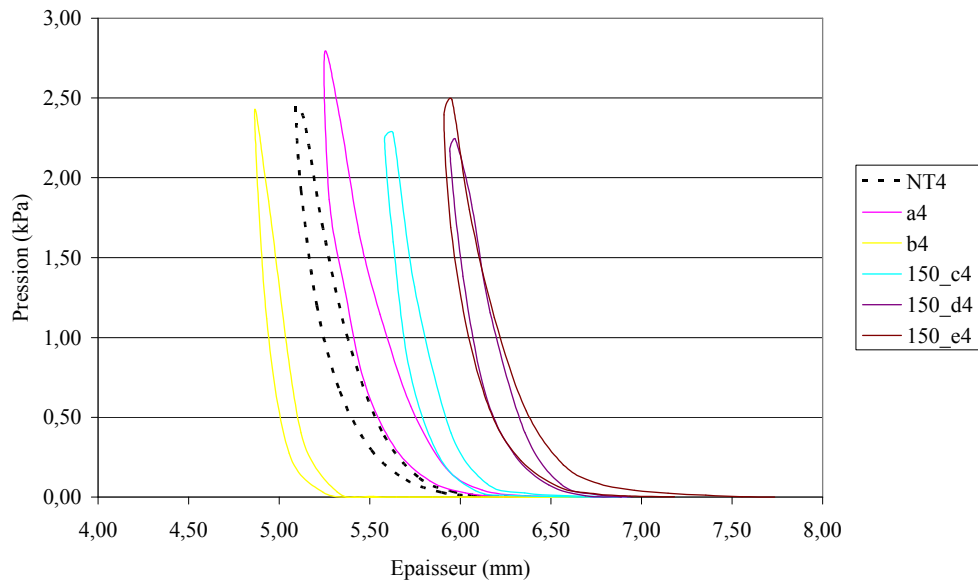


Figure 195. Courbes de compression des produits dérivés du non-tissé 3D NT4

VI.B.4. Résultats des analyses statistiques

VI.B.4.1. Comparaison des variances et des moyennes

1. Produits dérivés de NT1

M		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1	T ₀		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	NS	NS	NS	S	S	F(var)	NT1	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	S	S	S	S	t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a1		NS	NS	S	NS	F(var)	a1		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	S	t(moy)		S	NS	S	S	S
F(var)	b1			NS	S	NS	F(var)	b1			S	NS	NS
t(moy)				S	S	S	t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	150_c1				S	NS	F(var)	150_c1				S	S
t(moy)						S	t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	150_d1					NS	F(var)	150_d1					NS
t(moy)						NS	t(moy)		S	S	S	S	S

P _{air}		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	NS	NS	NS	S	S
t(moy)		NS	S	S	S	S
F(var)	a1		NS	NS	S	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b1			NS	S	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c1				S	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d1					NS
t(moy)						NS

K		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	S	S	NS	S	S
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a1		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b1			NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c1				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d1					NS
t(moy)						S

T _M		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	S	S	S	S
F(var)	a1		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b1			S	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c1				S	S
t(moy)					S	S
F(var)	150_d1					NS
t(moy)						NS

EMC		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	S	NS	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	NS	NS	S
F(var)	a1		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b1			NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c1				NS	NS
t(moy)					NS	S
F(var)	150_d1					NS
t(moy)						S

WC		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	NS	S	S
F(var)	a1		NS	NS	S	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b1			NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c1				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d1					NS
t(moy)						NS

RC		a1	b1	150_c1	150_d1	150_e1
F(var)	NT1	S	S	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a1		S	S	S	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b1			S	NS	S
t(moy)					S	S
F(var)	150_c1				NS	NS
t(moy)					NS	NS
F(var)	150_d1					NS
t(moy)						NS

2. Produits dérivés de NT2

M		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a2		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b2			NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						NS

T ₀		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	S	S	S	S
F(var)	a2		NS	NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	b2			NS	NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)						S
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						S

P _{air}		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a2		NS	NS	NS	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	b2			NS	S	S
t(moy)					S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						NS

K		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	S	S	S	S	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a2		S	S	S	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	b2			NS	NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)						S
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						S

T _M		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	S	S	S	S
F(var)	a2		NS	NS	NS	NS
t(moy)				NS	S	S
F(var)	b2			NS	NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						S

EMC		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	S	NS	NS	S
F(var)	a2		NS	NS	NS	NS
t(moy)				S	S	NS
F(var)	b2			NS	NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)						NS
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						S

WC		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	S	S	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a2		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	NS
F(var)	b2			S	S	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						S

RC		a2	b2	150_c2	150_d2	150_e2
F(var)	NT2	NS	NS	S	NS	NS
t(moy)		S	NS	S	S	S
F(var)	a2		NS	S	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	b2			S	S	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c2				NS	NS
t(moy)					NS	NS
F(var)	150_d2					NS
t(moy)						NS

3. Produits dérivés de NT3

M		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	NS	NS	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a3		NS	NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	S	S
F(var)	b3			NS	NS	NS
t(moy)				NS	S	NS
F(var)	150_c3				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						S

T ₀		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	NS	S	NS	S	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a3		S	NS	NS	NS
t(moy)				S	NS	S
F(var)	b3			S	S	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c3				S	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						S

P _{air}		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	NS	S	S	NS	NS
t(moy)		NS	S	S	S	S
F(var)	a3		NS	S	S	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b3			S	S	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c3				NS	NS
t(moy)					S	NS
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						S

K		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	S	S	NS	S	S
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a3		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	S
F(var)	b3			NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c3				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						S

T _M		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	NS	S	NS	S	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a3		S	NS	S	NS
t(moy)			S	NS	S	S
F(var)	b3			S	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c3				S	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						NS

EMC		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	S	S	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	NS	NS	S
F(var)	a3		NS	NS	NS	NS
t(moy)				S	NS	S
F(var)	b3			NS	NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_c3				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						S

WC		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	S	NS	S	S	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a3		NS	NS	NS	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	b3			NS	S	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_c3				NS	S
t(moy)					NS	S
F(var)	150_d3					S
t(moy)						S

RC		a3	b3	150_c3	150_d3	150_e3
F(var)	NT3	NS	S	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a3		S	NS	S	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	b3			S	S	S
t(moy)					S	S
F(var)	150_c3				NS	S
t(moy)					S	S
F(var)	150_d3					NS
t(moy)						S

4. Produits dérivés de NT4

<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">M</th> <th>a4</th> <th>b4</th> <th>150_c4</th> <th>150_d4</th> <th>150_e4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">NT4</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">a4</td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">b4</td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_c4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_d4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>							M		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4	F(var)	NT4	NS	NS	NS	S	NS	t(moy)	S	S	S	S	S	F(var)	a4		NS	NS	S	NS	t(moy)		NS	S	S	S	F(var)	b4			NS	S	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	150_c4				S	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_d4					NS	t(moy)					S	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">T₀</th> <th>a4</th> <th>b4</th> <th>150_c4</th> <th>150_d4</th> <th>150_e4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">NT4</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">a4</td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">b4</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_c4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_d4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>							T ₀		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4	F(var)	NT4	NS	NS	NS	NS	NS	t(moy)	S	S	S	S	S	F(var)	a4		NS	NS	NS	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	b4			S	NS	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	150_c4				NS	NS	t(moy)				NS	S	F(var)	150_d4					NS	t(moy)					S
M		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4																																																																																																																																																							
F(var)	NT4	NS	NS	NS	S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)		S	S	S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	a4		NS	NS	S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)			NS	S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	b4			NS	S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_c4				S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_d4					NS																																																																																																																																																							
t(moy)						S																																																																																																																																																							
T ₀		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4																																																																																																																																																							
F(var)	NT4	NS	NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)		S	S	S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	a4		NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	b4			S	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_c4				NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					NS	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_d4					NS																																																																																																																																																							
t(moy)						S																																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">P_{air}</th> <th>a4</th> <th>b4</th> <th>150_c4</th> <th>150_d4</th> <th>150_e4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">NT4</td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">a4</td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">b4</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_c4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_d4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> </tbody> </table>							P _{air}		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4	F(var)	NT4	S	NS	S	S	S	t(moy)	S	S	S	S	S	F(var)	a4		S	NS	S	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	b4			S	S	S	t(moy)				S	S	F(var)	150_c4				S	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_d4					NS	t(moy)					NS	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">K</th> <th>a4</th> <th>b4</th> <th>150_c4</th> <th>150_d4</th> <th>150_e4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">NT4</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">a4</td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">b4</td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_c4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_d4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>							K		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4	F(var)	NT4	S	S	NS	S	NS	t(moy)	S	S	S	S	S	F(var)	a4		NS	NS	NS	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	b4			NS	NS	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_c4				NS	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_d4					NS	t(moy)					S
P _{air}		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4																																																																																																																																																							
F(var)	NT4	S	NS	S	S	S																																																																																																																																																							
t(moy)		S	S	S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	a4		S	NS	S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	b4			S	S	S																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_c4				S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_d4					NS																																																																																																																																																							
t(moy)						NS																																																																																																																																																							
K		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4																																																																																																																																																							
F(var)	NT4	S	S	NS	S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)		S	S	S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	a4		NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	b4			NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_c4				NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_d4					NS																																																																																																																																																							
t(moy)						S																																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">T_M</th> <th>a4</th> <th>b4</th> <th>150_c4</th> <th>150_d4</th> <th>150_e4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">NT4</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">a4</td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">b4</td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_c4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_d4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> </tbody> </table>							T _M		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4	F(var)	NT4	NS	NS	NS	NS	NS	t(moy)	S	NS	S	S	S	F(var)	a4		NS	NS	NS	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	b4			NS	NS	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_c4				NS	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_d4					NS	t(moy)					NS	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EMC</th> <th>a4</th> <th>b4</th> <th>150_c4</th> <th>150_d4</th> <th>150_e4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">NT4</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">a4</td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">b4</td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_c4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F(var)</td> <td rowspan="2">150_d4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t(moy)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>							EMC		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4	F(var)	NT4	NS	NS	NS	NS	NS	t(moy)	S	S	NS	S	S	F(var)	a4		NS	NS	NS	NS	t(moy)			S	S	S	F(var)	b4			S	NS	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_c4				S	NS	t(moy)				S	S	F(var)	150_d4					NS	t(moy)					S
T _M		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4																																																																																																																																																							
F(var)	NT4	NS	NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)		S	NS	S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	a4		NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	b4			NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_c4				NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_d4					NS																																																																																																																																																							
t(moy)						NS																																																																																																																																																							
EMC		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4																																																																																																																																																							
F(var)	NT4	NS	NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)		S	S	NS	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	a4		NS	NS	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)				S	S	S																																																																																																																																																							
F(var)	b4			S	NS	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_c4				S	NS																																																																																																																																																							
t(moy)					S	S																																																																																																																																																							
F(var)	150_d4					NS																																																																																																																																																							
t(moy)						S																																																																																																																																																							

WC		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4
F(var)	NT4	S	NS	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a4		NS	NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S	NS
F(var)	b4			NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c4				NS	NS
t(moy)					S	S
F(var)	150_d4					NS
t(moy)						S

RC		a4	b4	150_c4	150_d4	150_e4
F(var)	NT4	S	S	NS	NS	NS
t(moy)		S	S	S	S	S
F(var)	a4		S	NS	NS	NS
t(moy)				S	S	S
F(var)	b4			S	S	S
t(moy)				S	S	S
F(var)	150_c4				NS	NS
t(moy)					NS	S
F(var)	150_d4					NS
t(moy)						S

VI.B.4.2. Analyse en Composantes Principales

Tableau 47. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Energie dissipée	1,00						
Résilience	-0,64	1,00					
Epaisseur	0,79	-0,86	1,00				
Compressibilité	0,91	-0,68	0,83	1,00			
Masse surfacique	0,24	-0,70	0,64	0,19	1,00		
Perméabilité à l'air	-0,59	0,79	-0,85	-0,66	-0,56	1,00	
Conductivité thermique	0,01	-0,11	0,21	0,25	-0,13	-0,49	1,00

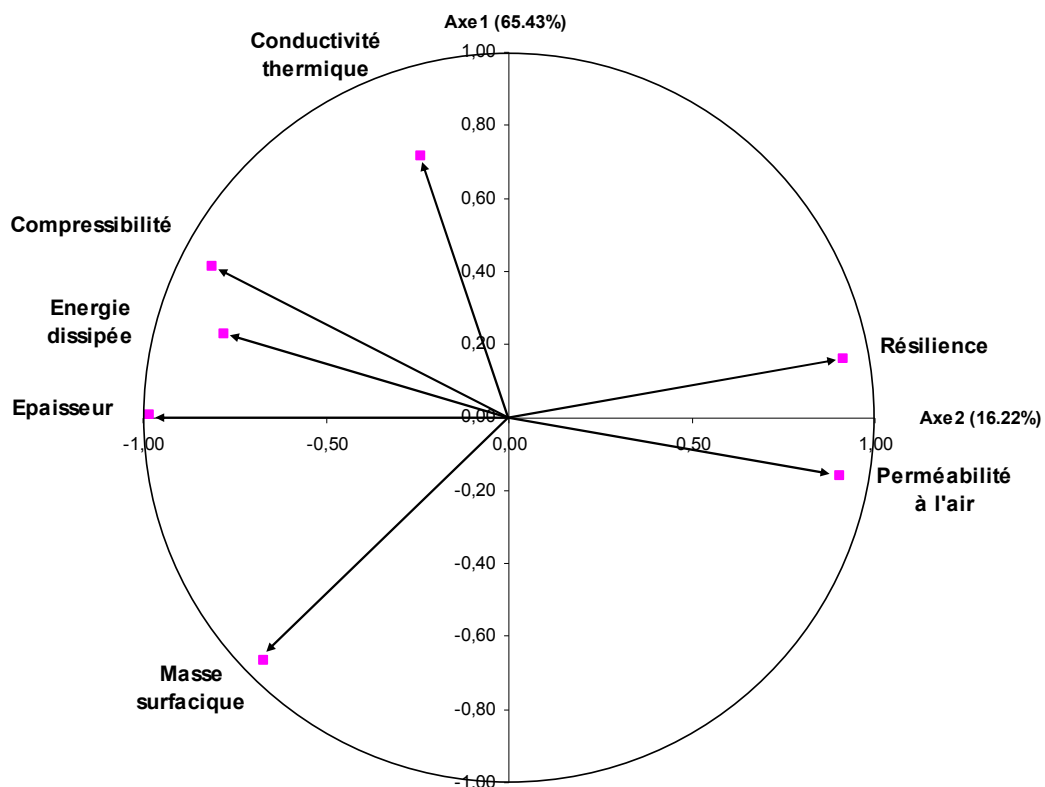


Figure 196. Cercle de corrélation entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

VI.C. ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE DE CONTRECOLLAGE

VI.C.1. Caractéristiques mesurées

1. Masse surfacique

Echantillons testés	n	M (g/m²)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	568,38	33,41	5,88	27,93	4,91
130_c2	11	650,55	40,30	6,19	27,07	4,16
130_c3	12	676,83	46,01	6,80	29,23	4,32
130_c4	12	659,75	31,73	4,81	20,16	3,06
140_c1	8	562,89	34,56	6,14	28,90	5,13
140_c2	12	680,25	34,02	5,00	21,62	3,18
140_c3	9	721,22	62,14	8,62	47,77	6,62
140_c4	12	660,58	53,98	8,17	34,30	5,19
150_c1	10	580,90	36,86	6,34	26,36	4,54
150_c2	10	658,40	44,21	6,72	31,63	4,80
150_c3	6	651,80	51,68	7,93	54,24	8,32
150_c4	10	677,20	33,46	4,94	23,93	3,53
130_d1	10	720,50	22,84	3,17	16,34	2,27
130_d2	12	800,33	48,69	6,08	30,94	3,87
130_d3	11	831,45	59,04	7,10	39,66	4,77
130_d4	9	767,22	47,85	6,24	36,78	4,79
140_d1	8	698,71	36,94	5,29	30,88	4,42
140_d2	12	785,67	33,58	4,27	21,34	2,72
140_d3	10	842,18	62,54	7,43	44,73	5,31
140_d4	10	795,30	19,37	2,44	13,86	1,74
150_d1	10	719,30	25,42	3,53	18,18	2,53
150_d2	10	762,50	47,85	6,27	34,22	4,49
150_d3	6	829,17	51,92	6,26	54,49	6,57
150_d4	10	810,30	13,79	1,70	9,87	1,22
130_e1	6	686,50	38,75	5,65	40,68	5,93
130_e2	6	785,50	27,52	3,50	28,88	3,68
130_e3	6	715,83	26,62	3,72	27,94	3,90
130_e4	6	644,00	20,86	3,24	21,90	3,40
140_e1	6	637,50	20,25	3,18	21,25	3,33
140_e2	6	739,33	12,77	1,73	13,40	1,81
140_e3	6	705,17	61,35	8,70	64,39	9,13
140_e4	6	720,33	23,25	3,23	24,41	3,39
150_e1	6	679,50	18,06	2,66	18,96	2,79
150_e2	6	740,67	43,52	5,88	45,68	6,17
150_e3	6	714,17	41,81	5,85	43,88	6,14
150_e4	6	730,67	33,48	4,58	35,14	4,81

2. Perméabilité à l'air

Echantillons testés	n	P_{air} (l/m ² /s)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	221,13	33,43	15,12	27,95	12,64
130_c2	11	253,67	24,40	9,62	16,39	6,46
130_c3	12	219,08	18,89	8,62	12,00	5,48
130_c4	12	232,25	24,50	10,55	15,57	6,70
140_c1	8	223,00	23,01	10,32	19,24	8,63
140_c2	12	286,67	45,86	16,00	29,14	10,17
140_c3	9	252,22	28,80	11,42	22,14	8,78
140_c4	12	239,42	40,62	16,97	25,81	10,78
150_c1	10	270,90	53,17	19,63	38,03	14,04
150_c2	10	275,90	43,13	15,63	30,85	11,18
150_c3	6	253,50	29,23	11,53	30,68	12,10
150_c4	10	250,00	29,44	11,78	21,06	8,42
130_d1	10	180,10	22,50	12,49	16,10	8,94
130_d2	12	166,42	25,16	15,12	15,99	9,61
130_d3	11	150,17	13,99	9,31	9,40	6,26
130_d4	9	183,18	29,32	16,01	22,54	12,30
140_d1	8	165,55	15,90	9,60	13,29	8,03
140_d2	12	206,67	25,35	12,26	16,10	7,79
140_d3	10	165,45	19,82	11,98	14,18	8,57
140_d4	10	206,50	26,99	13,07	19,31	9,35
150_d1	10	182,00	15,37	8,44	10,99	6,04
150_d2	10	215,10	29,82	13,86	21,33	9,92
150_d3	6	176,00	32,24	18,32	33,84	19,22
150_d4	10	195,10	14,13	7,24	10,11	5,18
130_e1	6	175,33	23,06	13,15	24,21	13,81
130_e2	6	187,00	22,73	12,16	23,86	12,76
130_e3	6	175,17	29,81	17,02	31,29	17,86
130_e4	6	256,17	25,13	9,81	26,38	10,30
140_e1	6	159,67	16,62	10,41	17,45	10,93
140_e2	6	182,50	22,28	12,21	23,38	12,81
140_e3	6	208,67	38,42	18,41	40,32	19,32
140_e4	6	216,17	44,85	20,75	47,07	21,78
150_e1	6	182,67	34,42	18,85	36,13	19,78
150_e2	6	221,17	16,47	7,45	17,29	7,82
150_e3	6	235,00	35,24	14,99	36,98	15,74
150_e4	6	203,83	18,28	8,97	19,19	9,41

3. Conductivité thermique

Echantillons testés	n	K (W/m.K)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	0,02	0,002	9,11	1,57E-03	7,62
130_c2	11	0,02	0,001	5,39	8,72E-04	3,62
130_c3	12	0,03	0,003	10,05	1,65E-03	6,38
130_c4	12	0,03	0,002	6,06	1,00E-03	3,85
140_c1	8	0,03	0,001	4,86	1,10E-03	4,06
140_c2	12	0,03	0,001	4,09	7,63E-04	2,60
140_c3	9	0,03	0,002	5,40	1,41E-03	4,15
140_c4	12	0,04	0,002	5,19	1,19E-03	3,30
150_c1	10	0,04	0,003	6,98	1,82E-03	4,99
150_c2	10	0,04	0,001	3,19	9,53E-04	2,28
150_c3	6	0,04	0,001	2,98	1,34E-03	3,13
150_c4	10	0,05	0,002	4,11	1,39E-03	2,94
130_d1	10	0,03	0,002	6,68	1,50E-03	4,78
130_d2	12	0,03	0,001	4,86	9,09E-04	3,09
130_d3	11	0,03	0,002	6,58	1,28E-03	4,42
130_d4	9	0,03	0,002	8,96	1,81E-03	6,89
140_d1	8	0,01	0,002	13,47	1,56E-03	11,26
140_d2	12	0,02	0,001	4,75	4,81E-04	3,02
140_d3	10	0,02	0,001	6,94	9,02E-04	4,97
140_d4	10	0,02	0,002	9,21	1,17E-03	6,59
150_d1	10	0,02	0,002	9,30	1,19E-03	6,65
150_d2	10	0,02	0,001	5,86	7,91E-04	4,19
150_d3	6	0,02	0,000	0,00	0,00E+00	0,00
150_d4	10	0,02	0,002	8,11	1,19E-03	5,80
130_e1	6	0,02	0,002	12,87	2,54E-03	13,51
130_e2	6	0,02	0,002	11,13	2,50E-03	11,69
130_e3	6	0,02	0,002	10,50	2,21E-03	11,02
130_e4	6	0,02	0,002	12,25	2,38E-03	12,86
140_e1	6	0,02	0,002	11,13	2,32E-03	11,69
140_e2	6	0,02	0,001	6,20	1,51E-03	6,50
140_e3	6	0,02	0,003	13,47	3,02E-03	14,14
140_e4	6	0,02	0,001	5,00	1,20E-03	5,25
150_e1	6	0,02	0,001	5,21	1,19E-03	5,47
150_e2	6	0,03	0,002	5,77	1,61E-03	6,05
150_e3	6	0,03	0,002	8,75	2,43E-03	9,18
150_e4	6	0,03	0,001	5,34	1,47E-03	5,61

4. Epaisseur

Echantillons testés	n	T₀ (mm)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	6,48	0,10	1,62	0,09	1,35
130_c2	11	6,49	0,13	2,04	0,09	1,37
130_c3	12	6,54	0,20	3,12	0,13	1,98
130_c4	12	6,41	0,20	3,17	0,13	2,01
140_c1	8	6,26	0,16	2,52	0,13	2,10
140_c2	12	6,44	0,20	3,08	0,13	1,96
140_c3	9	6,55	0,18	2,82	0,14	2,17
140_c4	12	6,72	0,36	5,40	0,23	3,43
150_c1	10	6,22	0,35	5,62	0,25	4,02
150_c2	10	6,42	0,22	3,42	0,16	2,45
150_c3	6	6,33	0,30	4,79	0,32	5,03
150_c4	10	6,46	0,29	4,44	0,21	3,18
130_d1	10	6,76	0,09	1,38	0,07	0,99
130_d2	12	6,73	0,13	1,90	0,08	1,20
130_d3	11	7,07	0,19	2,65	0,13	1,78
130_d4	9	6,96	0,08	1,20	0,06	0,92
140_d1	8	6,69	0,14	2,12	0,12	1,77
140_d2	12	6,65	0,14	2,11	0,09	1,34
140_d3	10	6,88	0,17	2,48	0,12	1,77
140_d4	10	6,70	0,18	2,74	0,13	1,96
150_d1	10	6,69	0,17	2,51	0,12	1,80
150_d2	10	6,70	0,27	3,98	0,19	2,84
150_d3	6	6,63	0,10	1,43	0,10	1,51
150_d4	10	6,66	0,17	2,57	0,12	1,84
130_e1	6	7,33	0,24	3,26	0,25	3,42
130_e2	6	7,58	0,01	0,18	0,01	0,19
130_e3	6	7,19	0,16	2,28	0,17	2,39
130_e4	6	7,28	0,17	2,36	0,18	2,47
140_e1	6	7,02	0,23	3,31	0,24	3,47
140_e2	6	7,40	0,08	1,11	0,09	1,16
140_e3	6	7,24	0,21	2,93	0,22	3,08
140_e4	6	7,39	0,01	0,18	0,01	0,19
150_e1	6	7,27	0,12	1,69	0,13	1,77
150_e2	6	7,41	0,15	2,06	0,16	2,16
150_e3	6	7,35	0,19	2,53	0,20	2,66
150_e4	6	7,29	0,21	2,93	0,22	3,08

5. Epaisseur après compression

Echantillons testés	n	T_M (mm)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	5,79	0,10	1,77	0,09	1,48
130_c2	11	5,87	0,10	1,69	0,07	1,13
130_c3	12	5,83	0,15	2,51	0,09	1,59
130_c4	12	5,73	0,15	2,61	0,10	1,66
140_c1	8	5,53	0,15	2,70	0,12	2,26
140_c2	12	5,67	0,21	3,67	0,13	2,33
140_c3	9	5,85	0,16	2,74	0,12	2,10
140_c4	12	5,66	0,16	2,81	0,10	1,78
150_c1	10	5,43	0,35	6,37	0,25	4,56
150_c2	10	5,58	0,11	1,98	0,08	1,42
150_c3	6	5,44	0,20	3,70	0,21	3,88
150_c4	10	5,55	0,10	1,82	0,07	1,30
130_d1	10	6,04	0,12	2,06	0,09	1,48
130_d2	12	6,07	0,17	2,80	0,11	1,78
130_d3	11	6,25	0,12	1,97	0,08	1,32
130_d4	9	6,18	0,05	0,84	0,04	0,65
140_d1	8	5,86	0,14	2,33	0,11	1,95
140_d2	12	5,96	0,11	1,88	0,07	1,20
140_d3	10	6,08	0,15	2,53	0,11	1,81
140_d4	10	6,00	0,12	1,94	0,08	1,39
150_d1	10	5,88	0,21	3,50	0,15	2,50
150_d2	10	5,76	0,16	2,75	0,11	1,97
150_d3	6	5,90	0,08	1,33	0,08	1,39
150_d4	10	5,91	0,15	2,56	0,11	1,83
130_e1	6	6,26	0,12	1,97	0,13	2,06
130_e2	6	6,38	0,14	2,17	0,15	2,28
130_e3	6	6,02	0,16	2,64	0,17	2,77
130_e4	6	6,08	0,08	1,28	0,08	1,34
140_e1	6	5,90	0,15	2,55	0,16	2,68
140_e2	6	6,05	0,10	1,61	0,10	1,69
140_e3	6	6,01	0,17	2,90	0,18	3,04
140_e4	6	6,06	0,06	1,01	0,06	1,06
150_e1	6	5,97	0,15	2,49	0,16	2,62
150_e2	6	5,95	0,14	2,31	0,14	2,42
150_e3	6	5,92	0,17	2,94	0,18	3,08
150_e4	6	5,91	0,13	2,18	0,14	2,29

6. Compressibilité

Echantillons testés	n	EMC (%)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	10,63	1,89	17,74	1,58	14,84
130_c2	11	9,59	1,61	16,83	1,08	11,30
130_c3	12	10,83	1,94	17,93	1,23	11,39
130_c4	12	10,54	1,67	15,83	1,06	10,06
140_c1	8	11,64	1,52	13,06	1,27	10,92
140_c2	12	11,85	1,91	16,13	1,22	10,25
140_c3	9	10,67	2,14	20,06	1,64	15,42
140_c4	12	15,61	3,27	20,97	2,08	13,32
150_c1	10	12,70	1,90	14,98	1,36	10,72
150_c2	10	13,10	2,09	15,93	1,49	11,40
150_c3	6	13,95	2,30	16,49	2,42	17,31
150_c4	10	13,86	3,36	24,24	2,40	17,34
130_d1	10	10,65	1,24	11,67	0,89	8,35
130_d2	12	9,72	1,14	11,76	0,73	7,47
130_d3	11	11,65	1,42	12,22	0,96	8,21
130_d4	9	11,14	1,26	11,30	0,97	8,69
140_d1	8	12,36	1,46	11,81	1,22	9,87
140_d2	12	10,43	0,81	7,75	0,51	4,92
140_d3	10	11,56	1,52	13,11	1,08	9,38
140_d4	10	10,36	1,70	16,39	1,21	11,72
150_d1	10	12,09	1,69	13,97	1,21	9,99
150_d2	10	13,94	2,09	15,00	1,50	10,73
150_d3	6	11,03	1,96	17,79	2,06	18,67
150_d4	10	11,25	1,27	11,27	0,91	8,06
130_e1	6	14,53	3,09	21,26	3,24	22,31
130_e2	6	15,84	1,87	11,84	1,97	12,43
130_e3	6	16,19	1,84	11,34	1,93	11,90
130_e4	6	16,45	1,54	9,34	1,61	9,80
140_e1	6	15,85	2,01	12,70	2,11	13,33
140_e2	6	18,24	1,63	8,95	1,71	9,39
140_e3	6	17,06	1,90	11,15	2,00	11,70
140_e4	6	17,96	0,71	3,98	0,75	4,17
150_e1	6	17,87	2,93	16,42	3,08	17,23
150_e2	6	19,66	2,97	15,11	3,12	15,86
150_e3	6	19,50	2,76	14,13	2,89	14,83
150_e4	6	18,88	2,52	13,37	2,65	14,03

7. Energie dissipée de compression

Echantillons testés	n	WC (N.m/m ²)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	25,74	2,88	11,18	2,41	9,35
130_c2	11	22,69	1,72	7,57	1,15	5,09
130_c3	12	25,24	3,00	11,89	1,91	7,56
130_c4	12	23,90	2,08	8,72	1,32	5,54
140_c1	8	22,82	1,10	4,83	0,92	4,04
140_c2	12	26,56	1,45	5,48	0,92	3,48
140_c3	9	25,86	2,65	10,25	2,04	7,88
140_c4	12	27,30	4,85	17,78	3,08	11,30
150_c1	10	25,58	2,73	10,68	1,95	7,64
150_c2	10	25,32	1,77	6,99	1,27	5,00
150_c3	6	26,47	2,32	8,77	2,44	9,21
150_c4	10	24,19	1,81	7,50	1,30	5,36
130_d1	10	27,80	1,29	4,63	0,92	3,31
130_d2	12	27,24	3,62	13,28	2,30	8,44
130_d3	11	26,84	0,86	3,21	0,58	2,16
130_d4	9	25,56	1,95	7,61	1,50	5,85
140_d1	8	27,22	0,71	2,59	0,59	2,17
140_d2	12	27,38	1,84	6,73	1,17	4,28
140_d3	10	26,79	2,11	7,87	1,51	5,63
140_d4	10	26,56	1,43	5,37	1,02	3,84
150_d1	10	31,09	4,65	14,95	3,32	10,69
150_d2	10	27,98	1,78	6,38	1,28	4,56
150_d3	6	27,53	1,82	6,59	1,91	6,92
150_d4	10	26,92	1,74	6,47	1,24	4,62
130_e1	6	30,23	3,02	9,99	3,17	10,48
130_e2	6	33,44	3,00	8,98	3,15	9,42
130_e3	6	34,27	2,90	8,47	3,05	8,89
130_e4	6	34,83	2,46	7,06	2,58	7,41
140_e1	6	29,92	1,76	5,89	1,85	6,18
140_e2	6	30,76	1,51	4,90	1,58	5,15
140_e3	6	33,01	3,16	9,58	3,32	10,06
140_e4	6	33,72	2,76	8,19	2,90	8,60
150_e1	6	34,93	3,09	8,86	3,25	9,30
150_e2	6	33,37	2,64	7,90	2,77	8,29
150_e3	6	37,16	6,88	18,51	7,22	19,43
150_e4	6	33,50	1,35	4,03	1,42	4,23

8. Résilience de compression

Echantillons testés	n	RC (%)	écart-type	CV%	IC	LPE%
130_c1	8	64,87	1,25	1,93	1,05	1,61
130_c2	11	65,10	1,41	2,17	0,95	1,46
130_c3	12	65,68	2,69	4,10	1,71	2,60
130_c4	12	64,08	2,68	4,19	1,70	2,66
140_c1	8	65,61	1,94	2,96	1,62	2,47
140_c2	12	66,30	2,19	3,31	1,39	2,10
140_c3	9	63,72	1,78	2,80	1,37	2,15
140_c4	12	62,32	4,23	6,78	2,69	4,31
150_c1	10	66,04	4,57	6,91	3,27	4,95
150_c2	10	65,22	1,33	2,03	0,95	1,45
150_c3	6	64,72	2,08	3,22	2,19	3,38
150_c4	10	66,88	2,31	3,45	1,65	2,47
130_d1	10	64,57	1,74	2,70	1,25	1,93
130_d2	12	62,99	5,74	9,11	3,65	5,79
130_d3	11	64,33	2,92	4,54	1,96	3,05
130_d4	9	68,22	5,20	7,63	4,00	5,86
140_d1	8	66,23	2,00	3,02	1,67	2,53
140_d2	12	67,11	1,73	2,58	1,10	1,64
140_d3	10	66,66	1,13	1,70	0,81	1,22
140_d4	10	65,69	1,11	1,69	0,80	1,21
150_d1	10	63,48	5,65	8,91	4,05	6,37
150_d2	10	65,87	2,02	3,07	1,45	2,20
150_d3	6	66,92	1,17	1,75	1,23	1,84
150_d4	10	66,75	1,84	2,76	1,32	1,97
130_e1	6	62,05	4,02	6,48	4,22	6,80
130_e2	6	61,75	2,82	4,57	2,96	4,80
130_e3	6	64,34	3,70	5,75	3,88	6,03
130_e4	6	56,11	3,82	6,81	4,01	7,14
140_e1	6	66,32	1,74	2,63	1,83	2,76
140_e2	6	67,20	1,47	2,19	1,55	2,30
140_e3	6	65,69	2,42	3,69	2,54	3,87
140_e4	6	64,45	3,57	5,53	3,74	5,81
150_e1	6	63,50	4,01	6,32	4,21	6,63
150_e2	6	65,84	3,03	4,60	3,18	4,83
150_e3	6	59,43	0,61	1,03	0,65	1,09
150_e4	6	63,22	3,27	5,17	3,43	5,43

VI.C.2. Caractéristiques physiques

VI.C.2.1. Graphiques

VI.C.2.1.1. Produits de type c

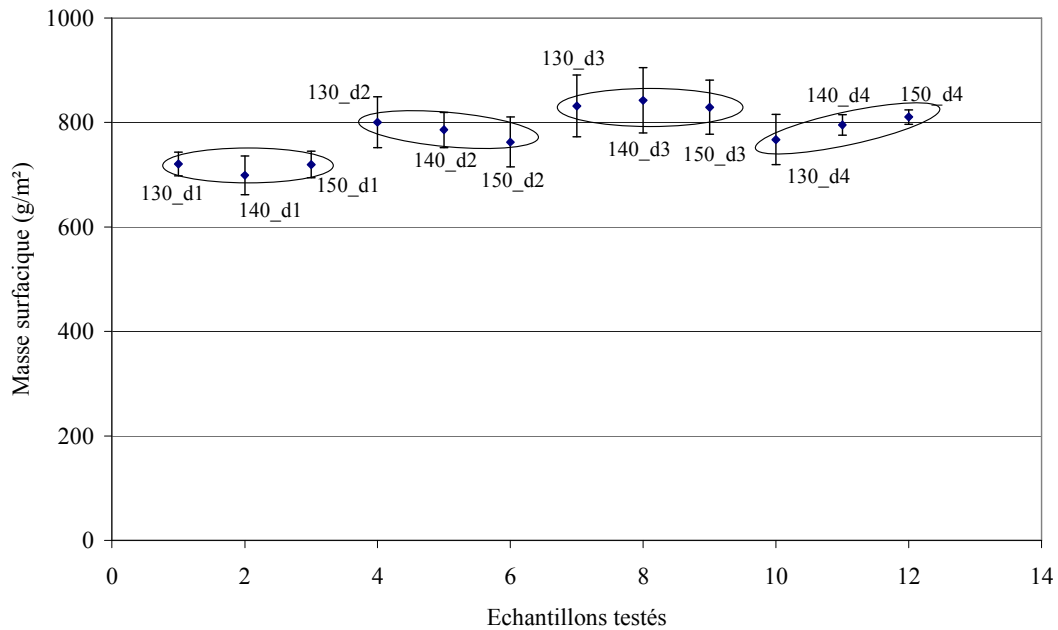


Figure 197. Masse surfacique des produits de type c

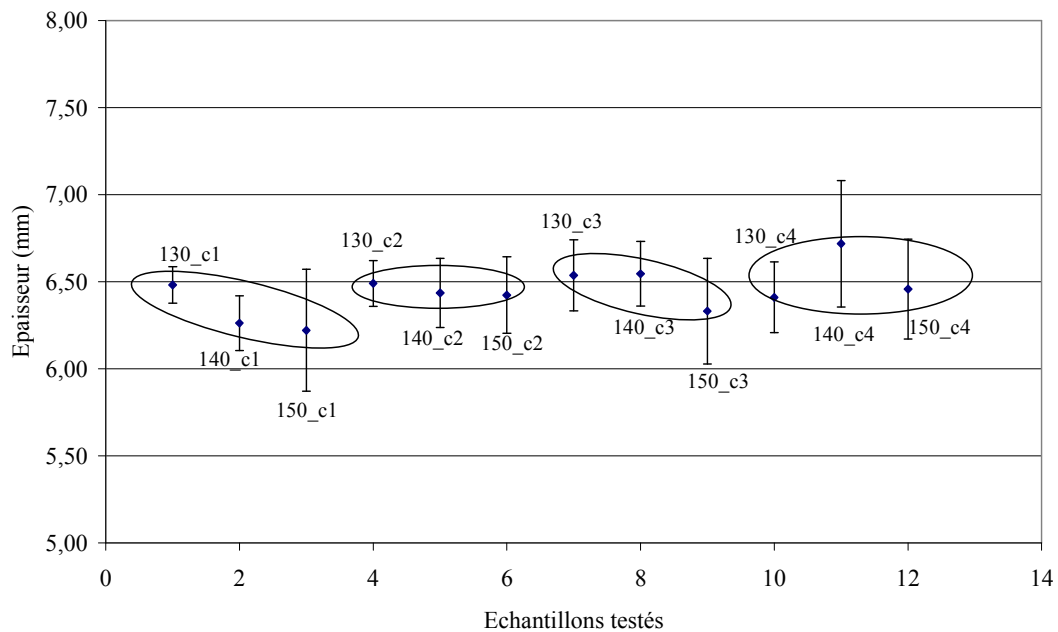


Figure 198. Epaisseur des produits de type c

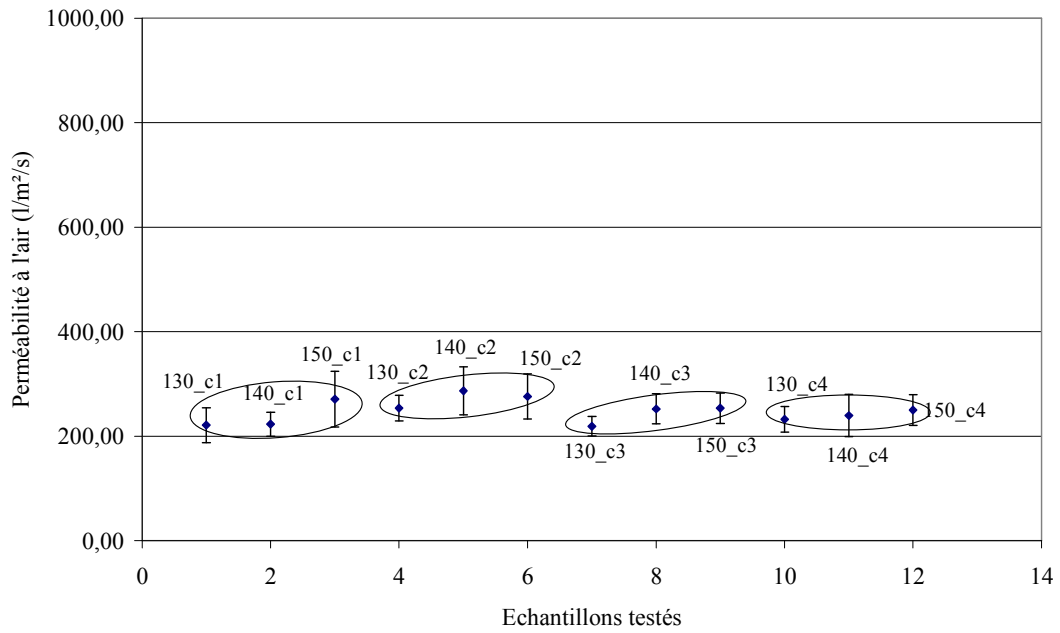


Figure 199. Perméabilité à l'air des produits de type c

VI.C.2.1.2. Produits de type d

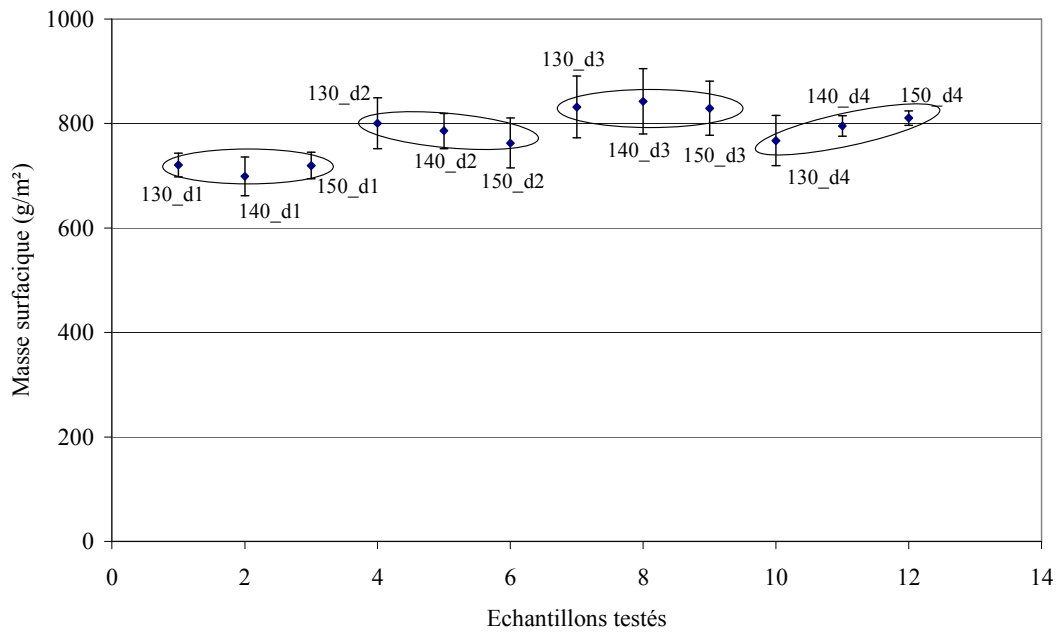


Figure 200. Masse surfacique des produits de type d

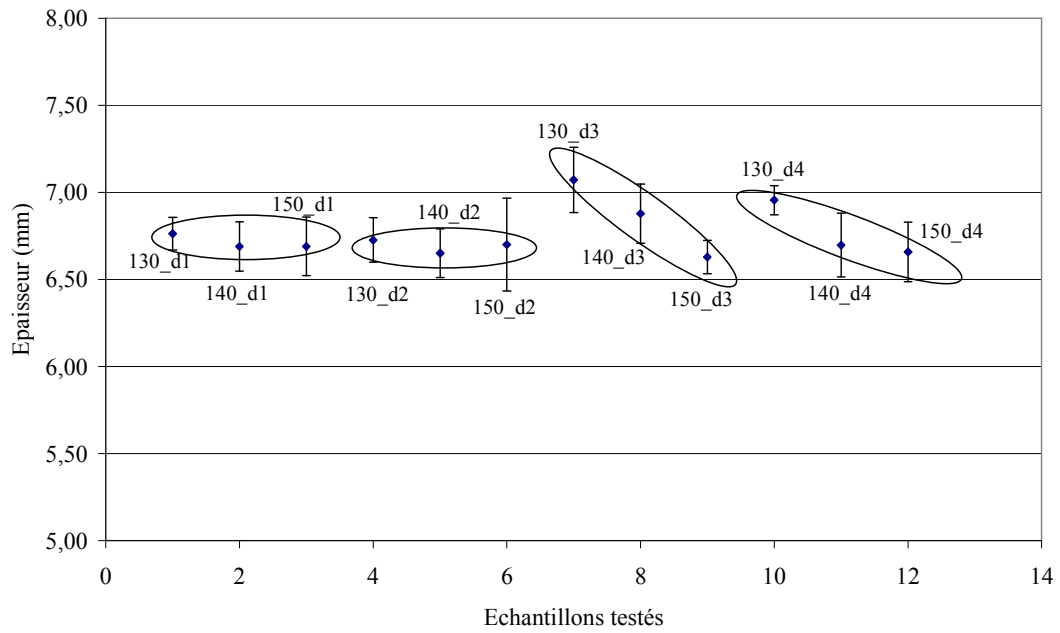


Figure 201. Epaisseur des produits de type d

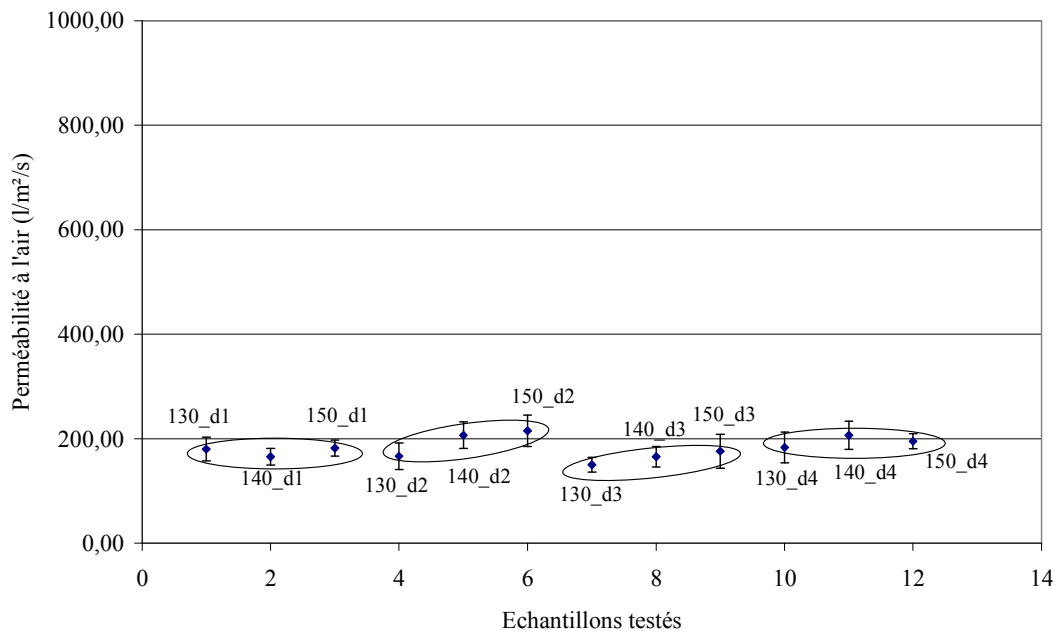


Figure 202. Perméabilité à l'air des produits de type d

VI.C.2.1.3. Produits de type e

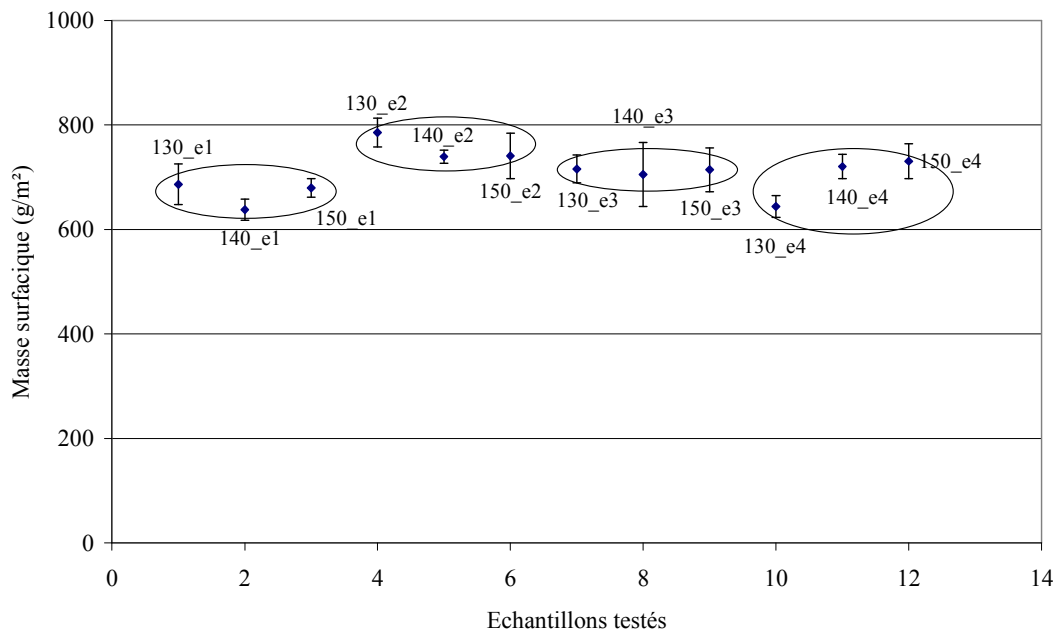


Figure 203. Masse surfacique des produits de type e

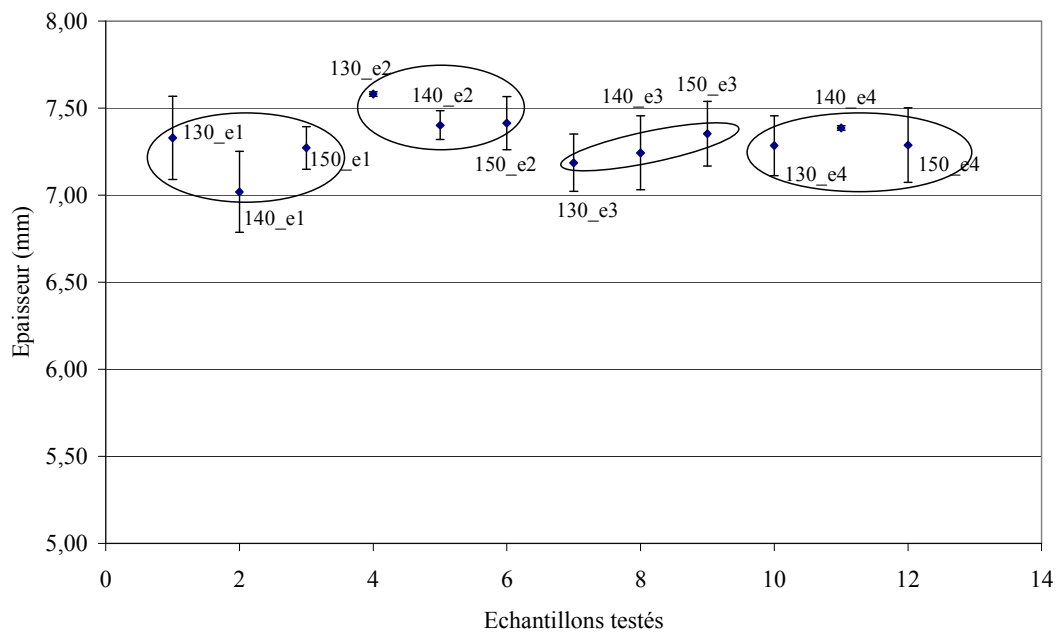


Figure 204. Epaisseur des produits de type e

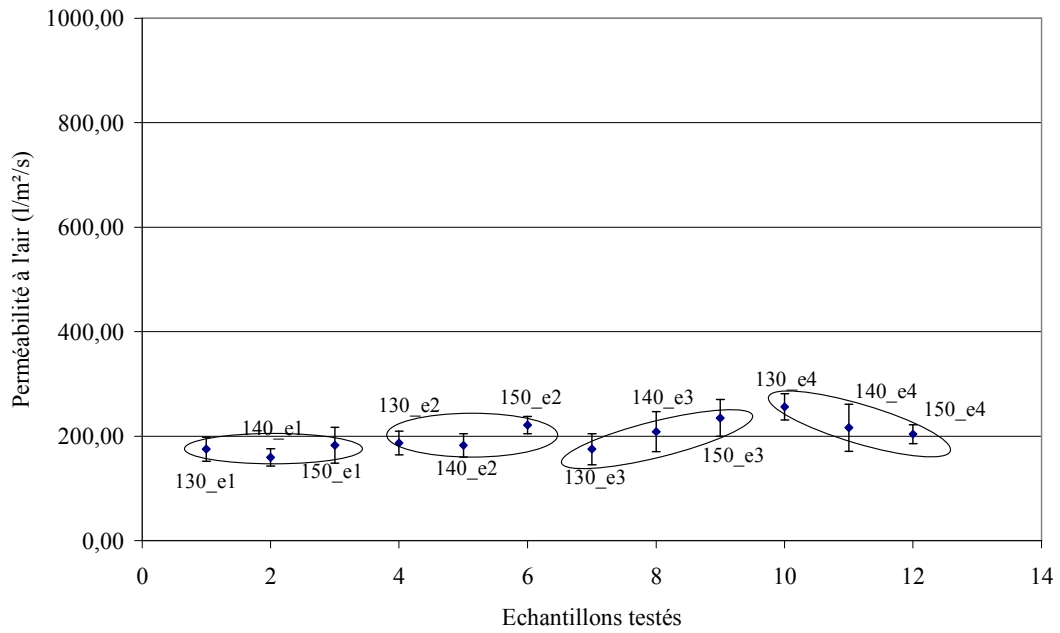


Figure 205. Perméabilité à l'air des produits de type e

VI.C.2.2. Diagrammes radar

VI.C.2.2.1. Produits de type c

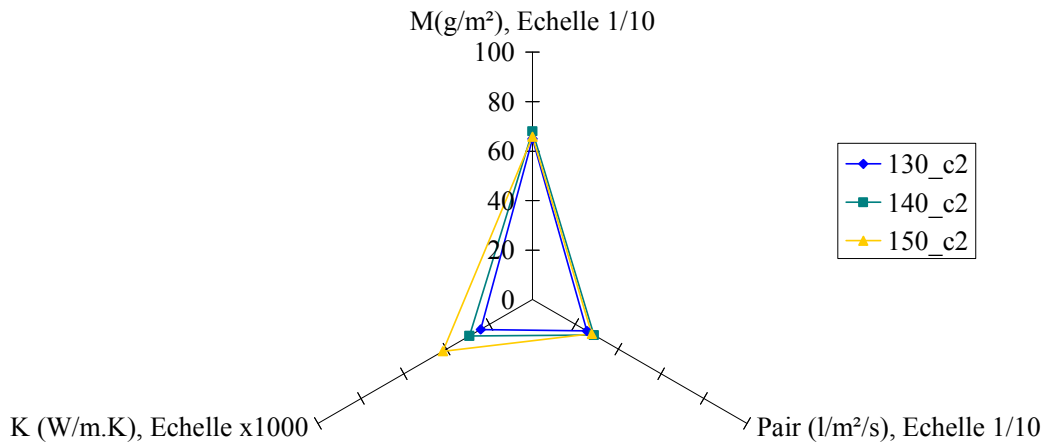


Figure 206. Caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT2

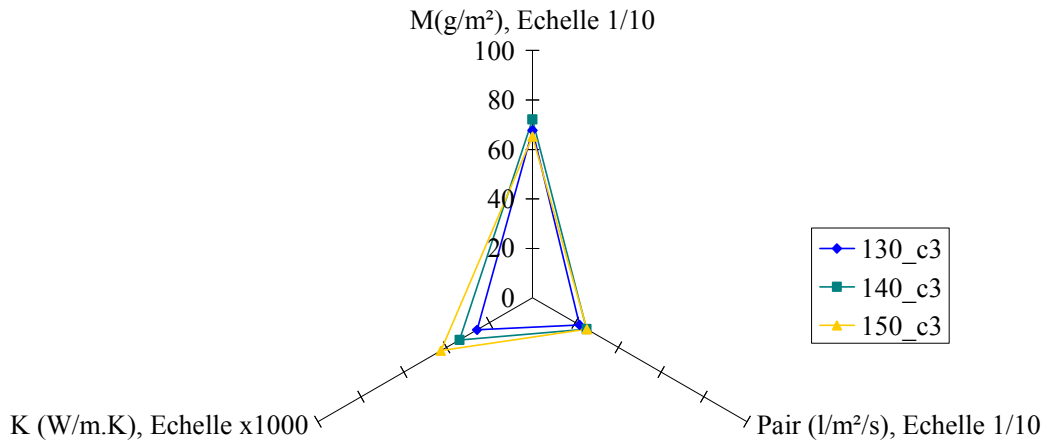


Figure 207. Caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT3

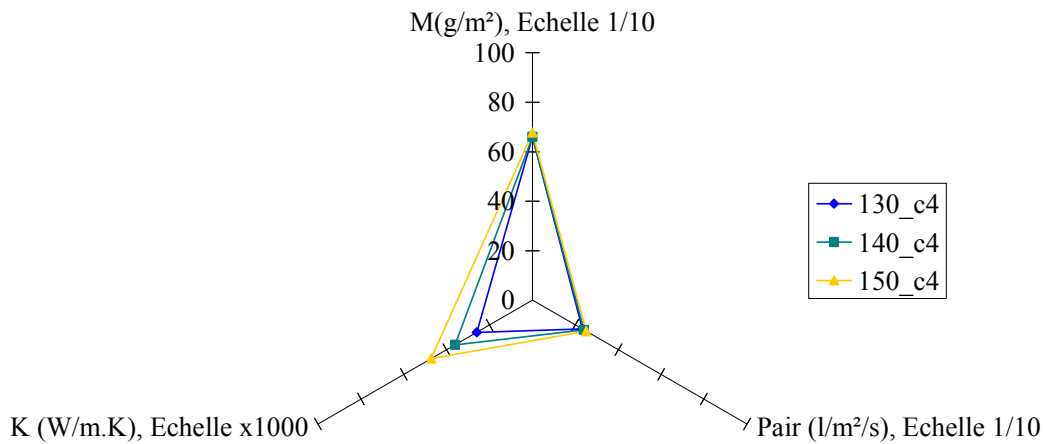


Figure 208. Caractéristiques physiques des produits de type c dérivés de NT4

VI.C.2.2.2. Produits de type d

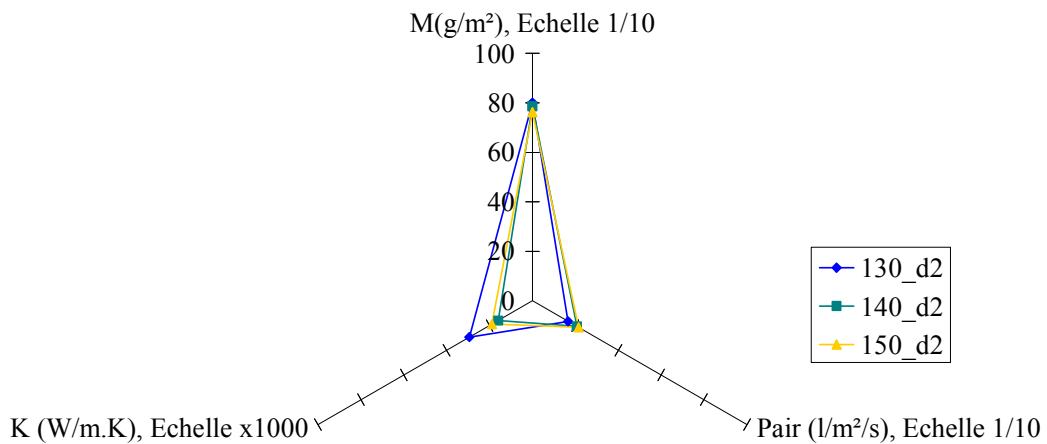


Figure 209. Caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT2

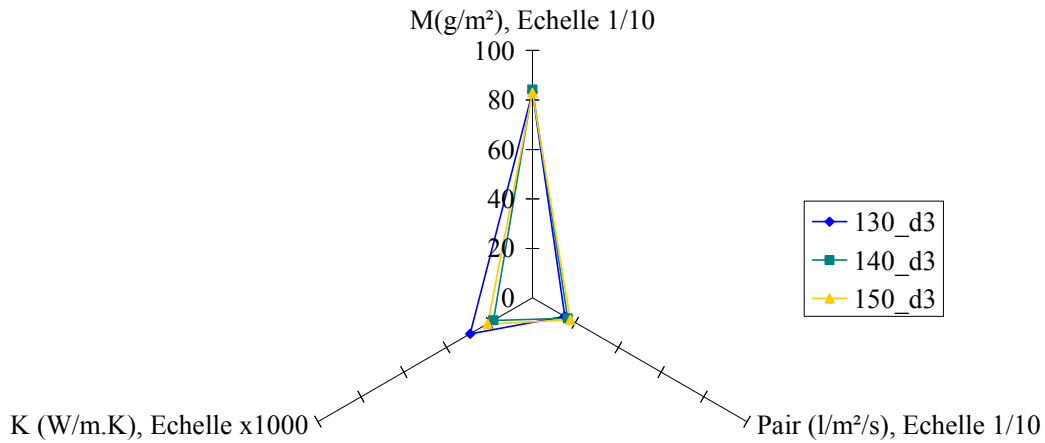


Figure 210. Caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT3

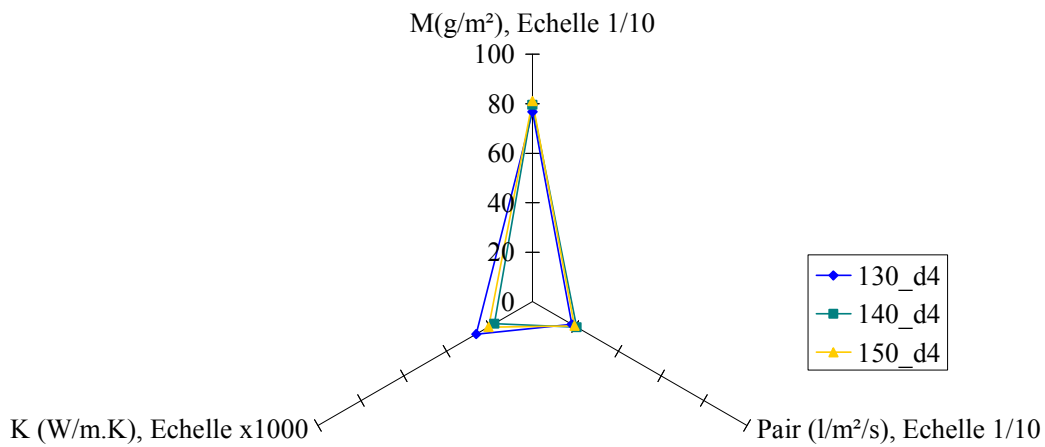


Figure 211. Caractéristiques physiques des produits de type d dérivés de NT4

VI.C.2.2.3. Produits de type e

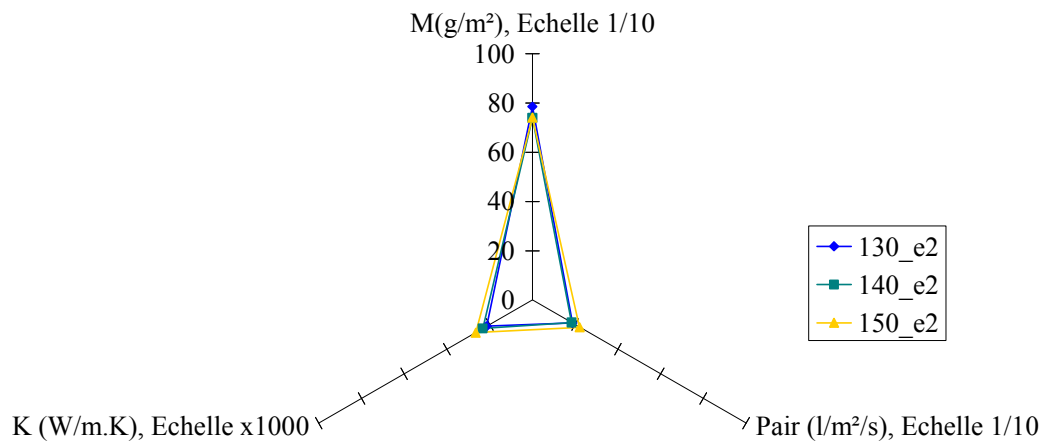


Figure 212. Caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT2

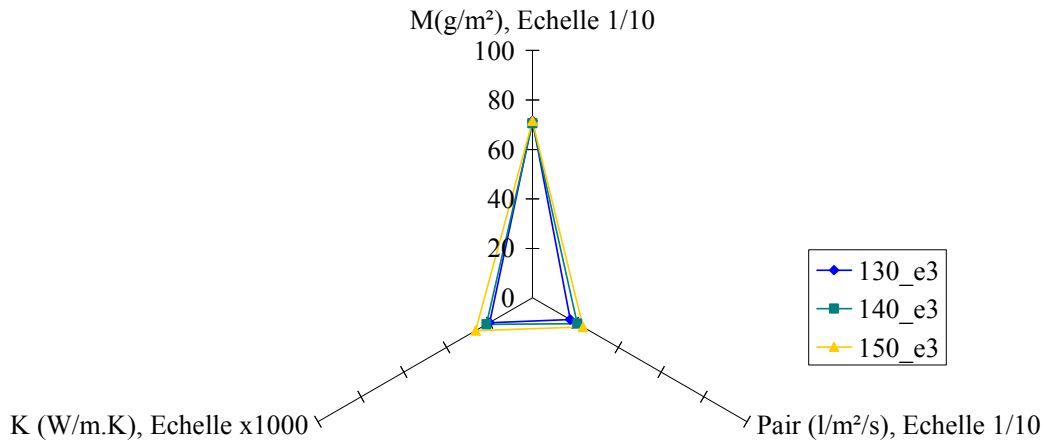


Figure 213. Caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT3

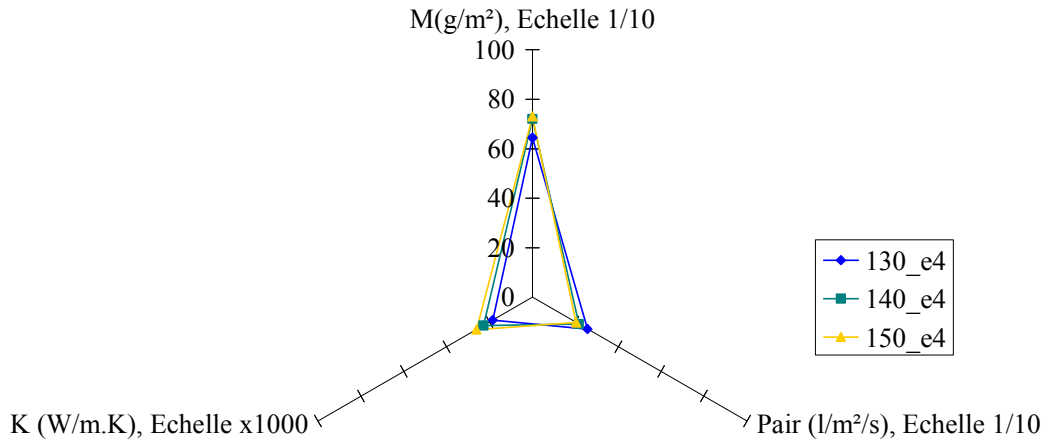


Figure 214. Caractéristiques physiques des produits de type e dérivés de NT4

VI.C.3. Caractéristiques mécaniques en compression

VI.C.3.1. Graphiques

VI.C.3.1.1. Produits de type c

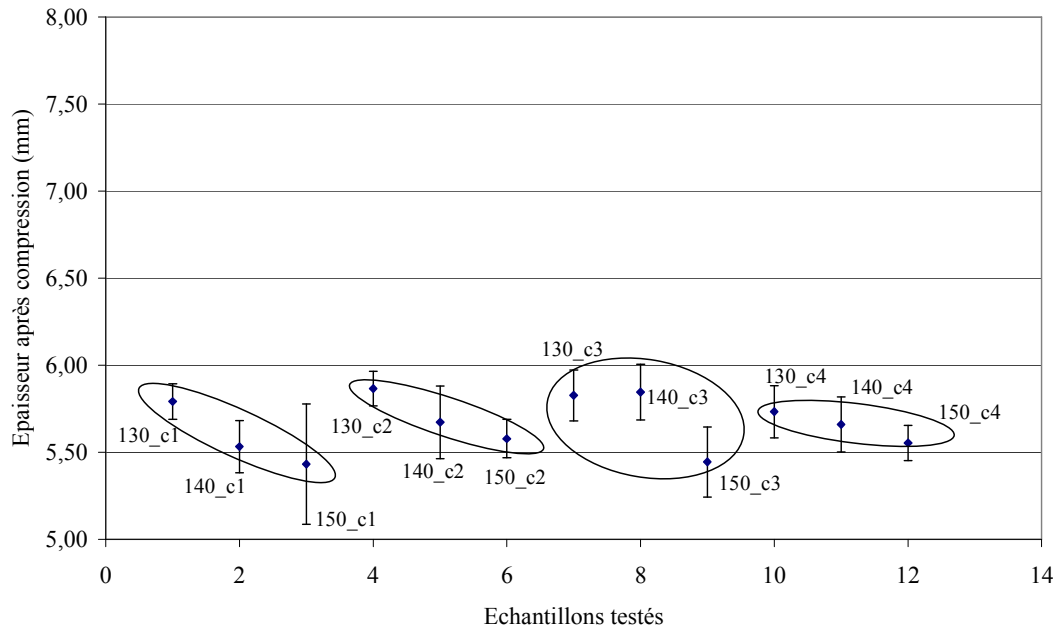


Figure 215. Épaisseur après compression des produits de type c

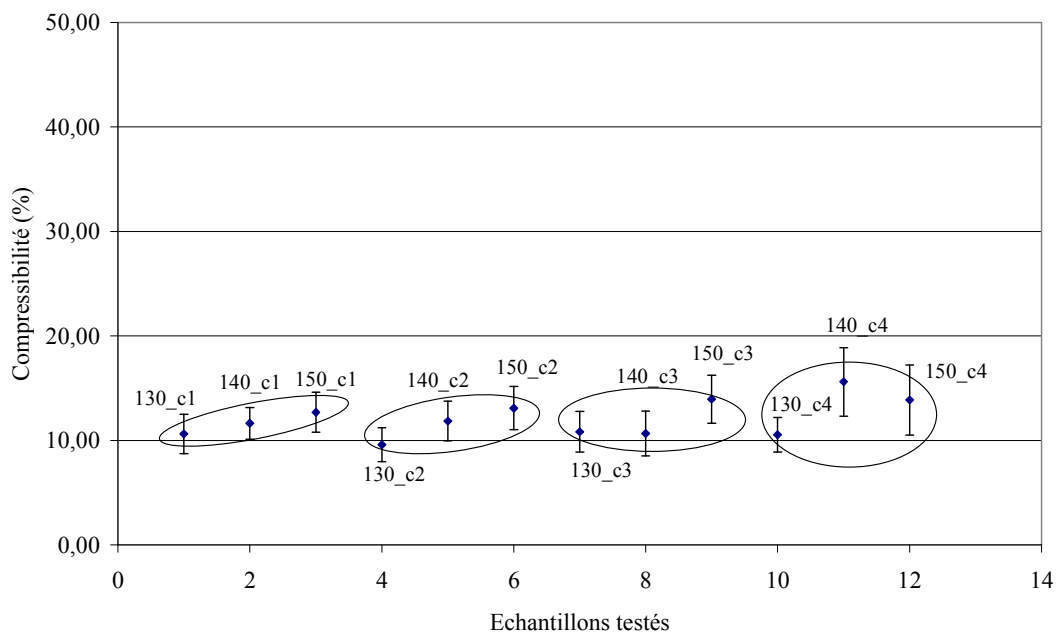


Figure 216. Compressibilité des produits de type c

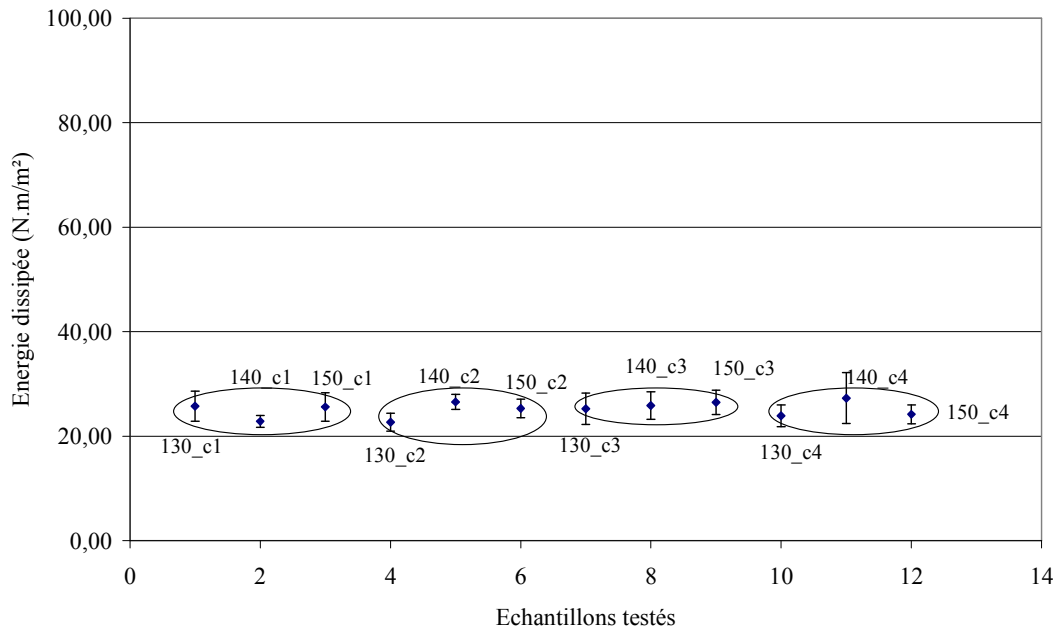


Figure 217. Energie dissipée lors de la compression des produits de type c

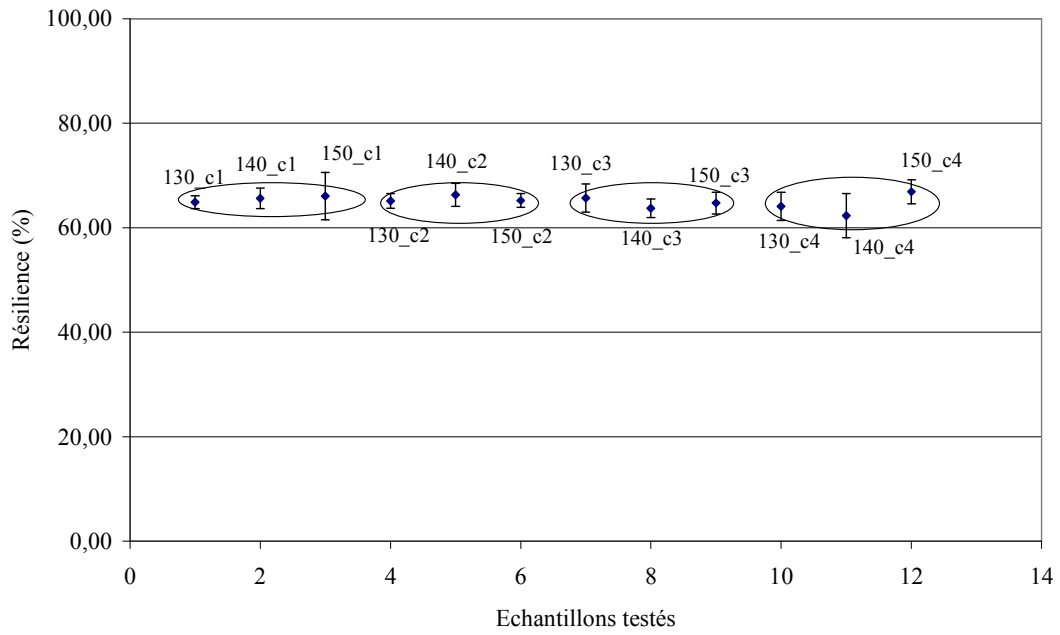


Figure 218. Caractéristiques en compression des produits de type c

VI.C.3.1.2. Produits de type d

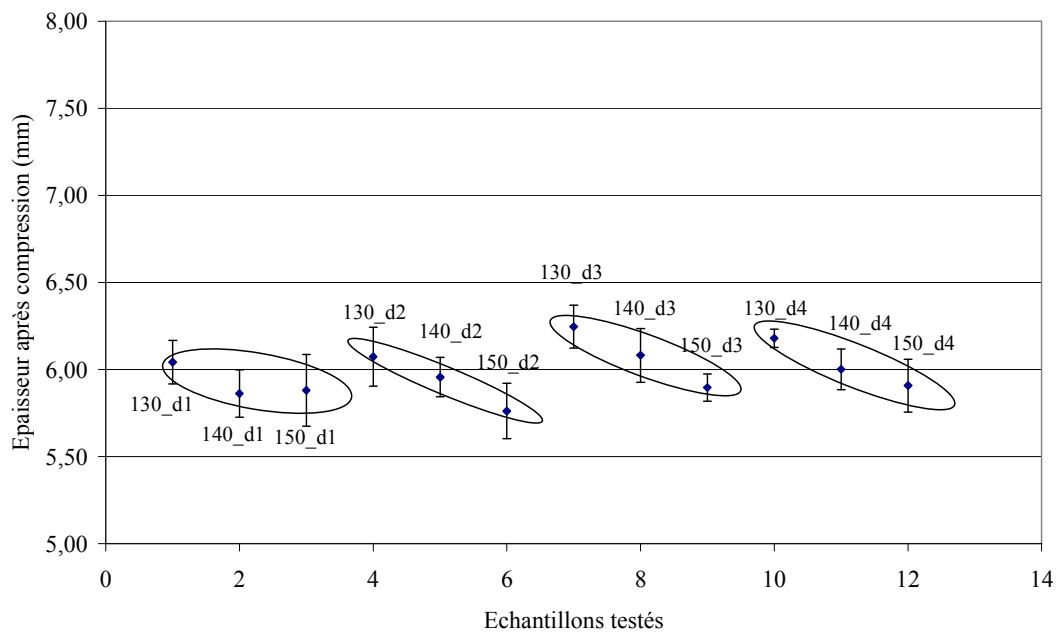


Figure 219. Épaisseur après compression des produits de type d

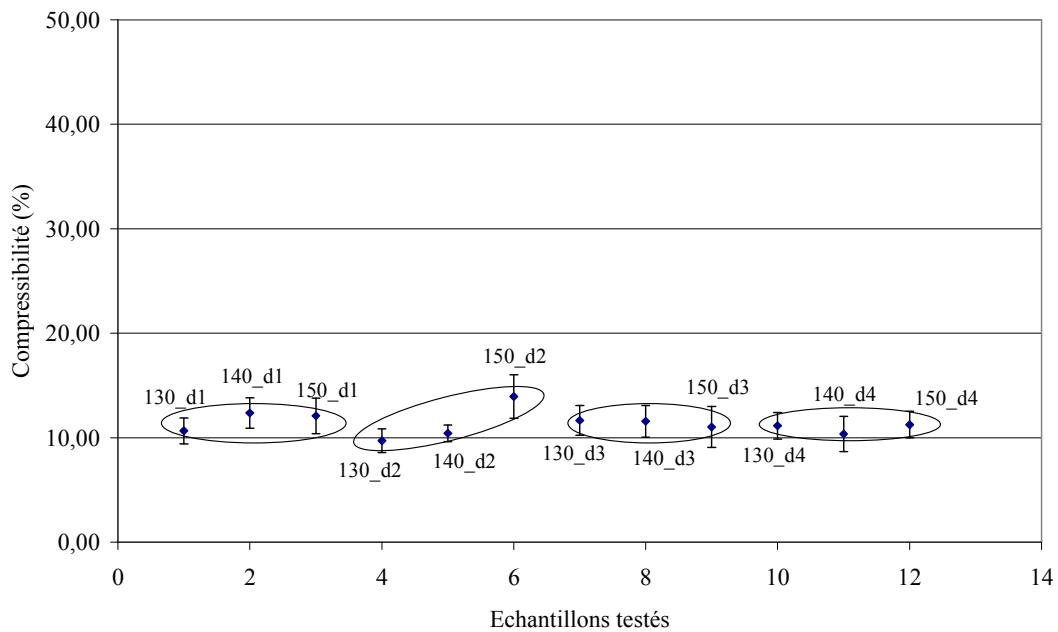


Figure 220. Compressibilité des produits de type d

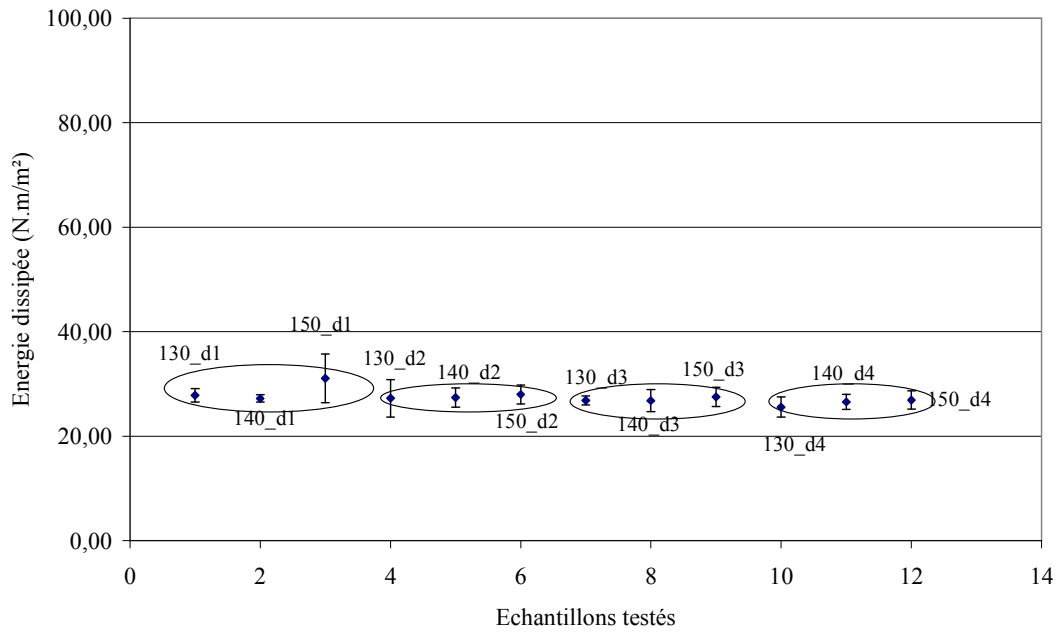


Figure 221. Energie dissipée lors de la compression des produits de type d

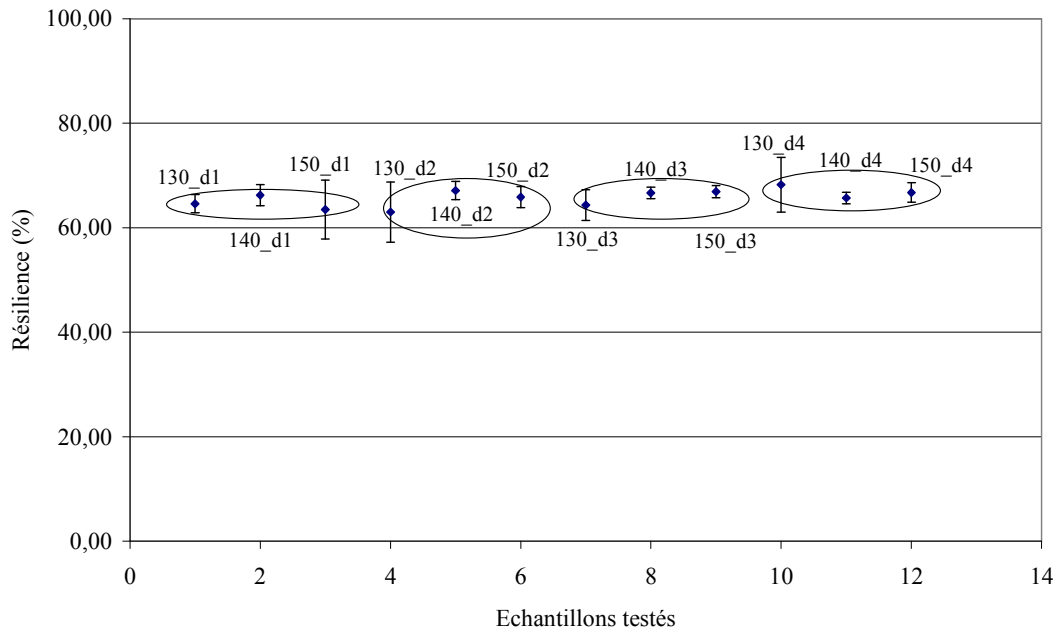


Figure 222. Caractéristiques en compression des produits de type d

VI.C.3.1.3. Produits de type e

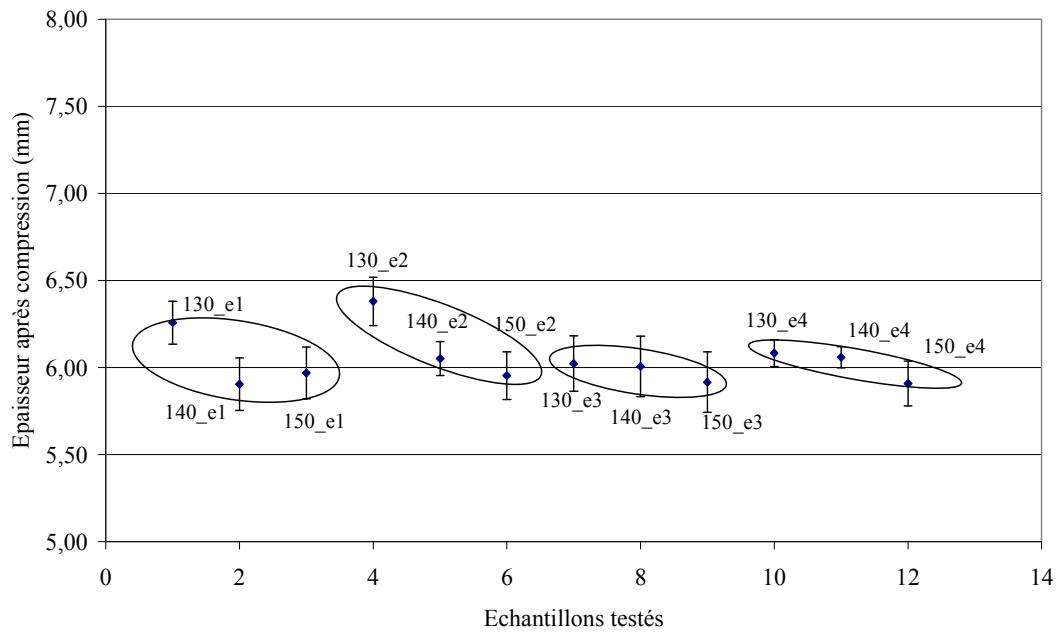


Figure 223. Épaisseur après compression des produits de type e

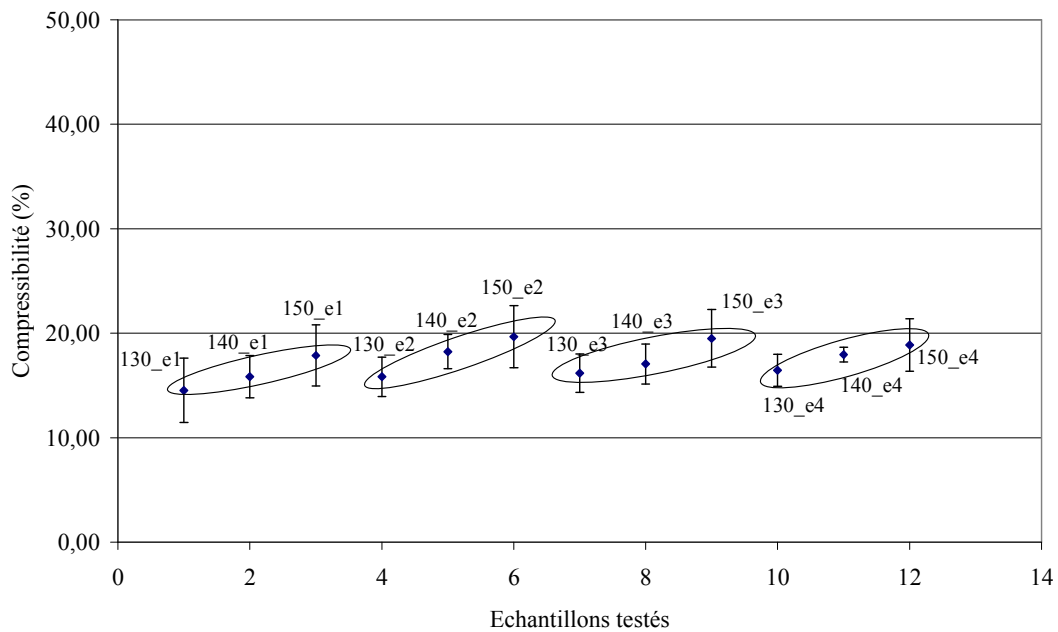


Figure 224. Compressibilité des produits de type e

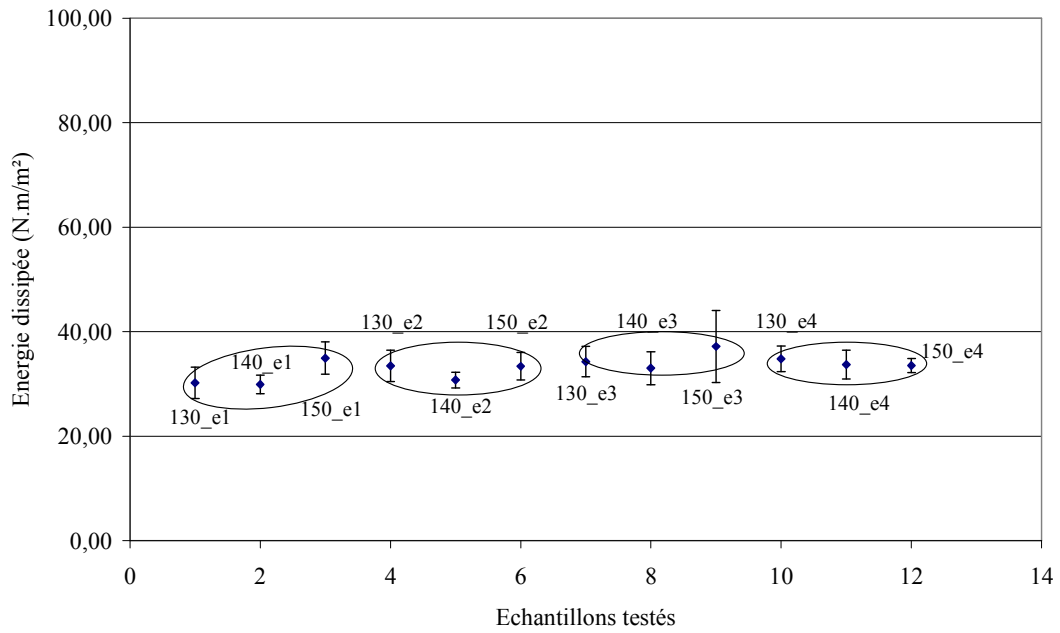


Figure 225. Energie dissipée lors de la compression des produits de type e

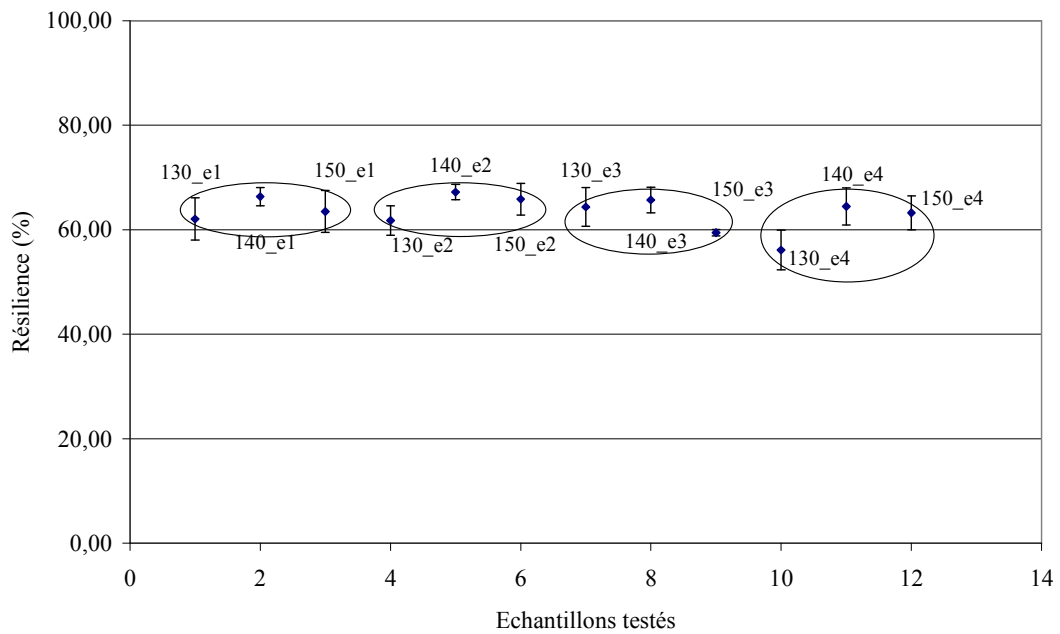


Figure 226. Caractéristiques en compression des produits de type e

VI.C.3.2. Diagrammes radar

VI.C.3.2.1. Produits de type c

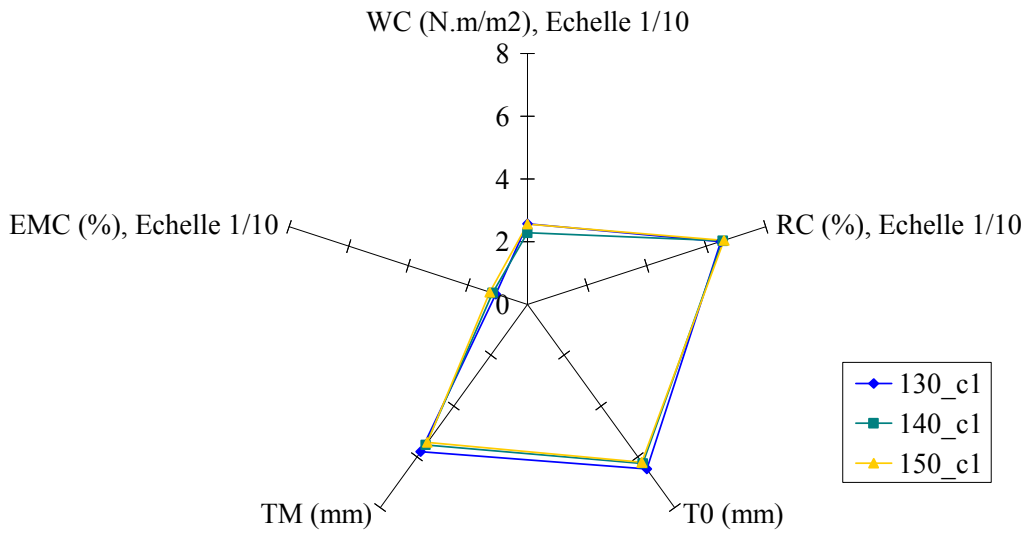


Figure 227. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits de type c dérivés de NT1

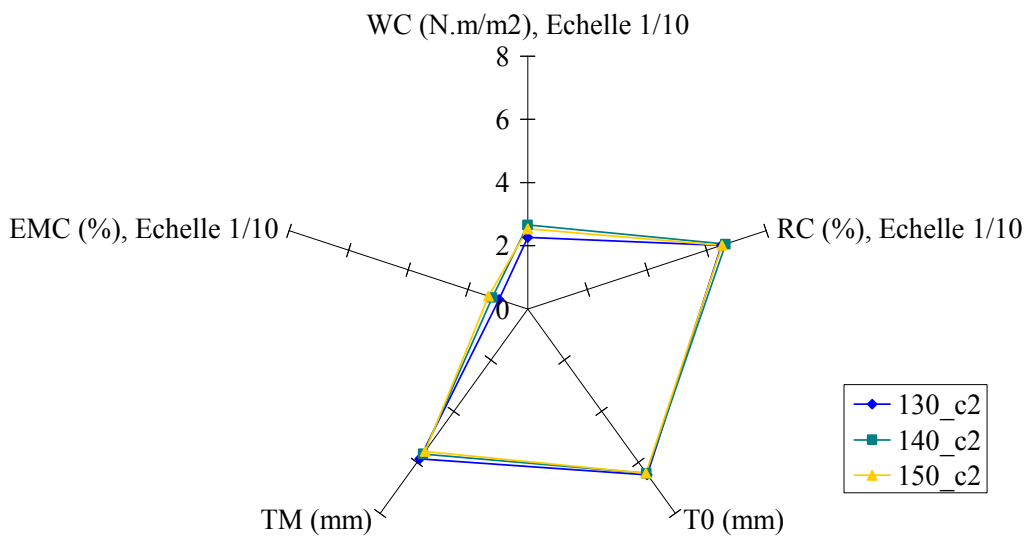


Figure 228. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type c dérivés de NT2

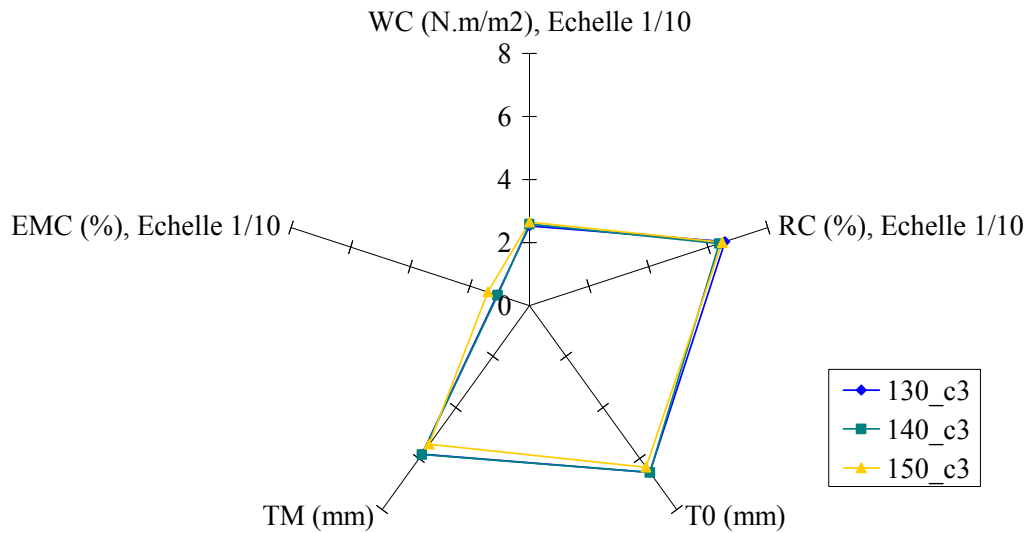


Figure 229. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type c dérivés de NT3

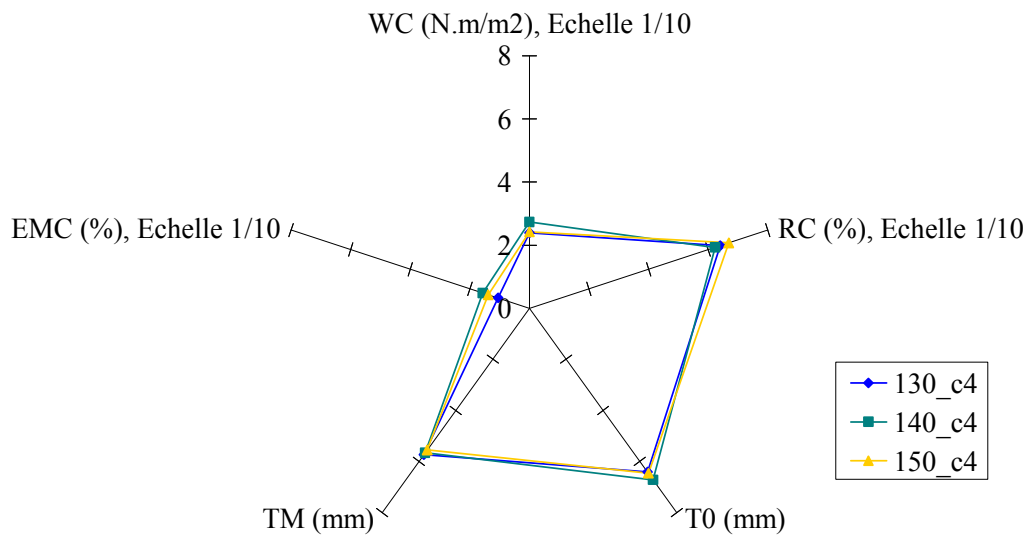
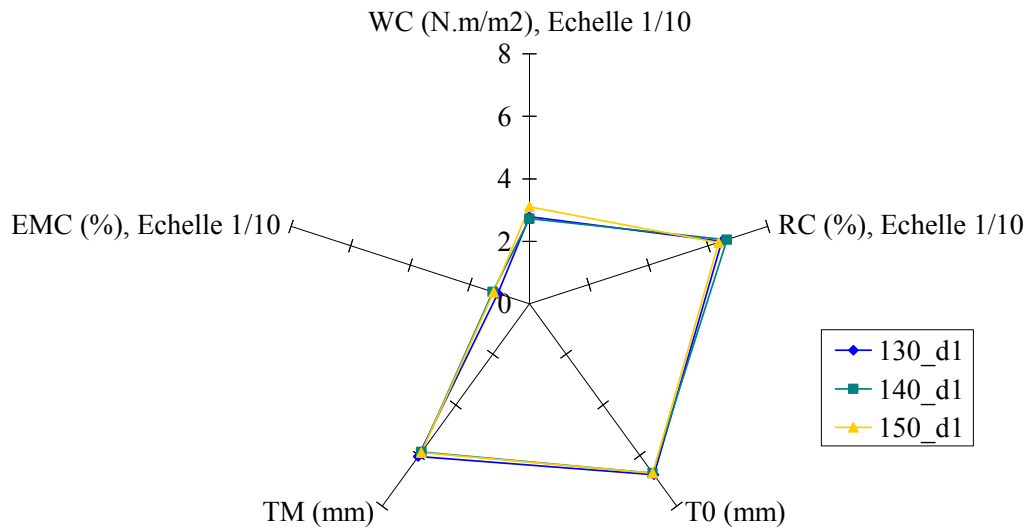
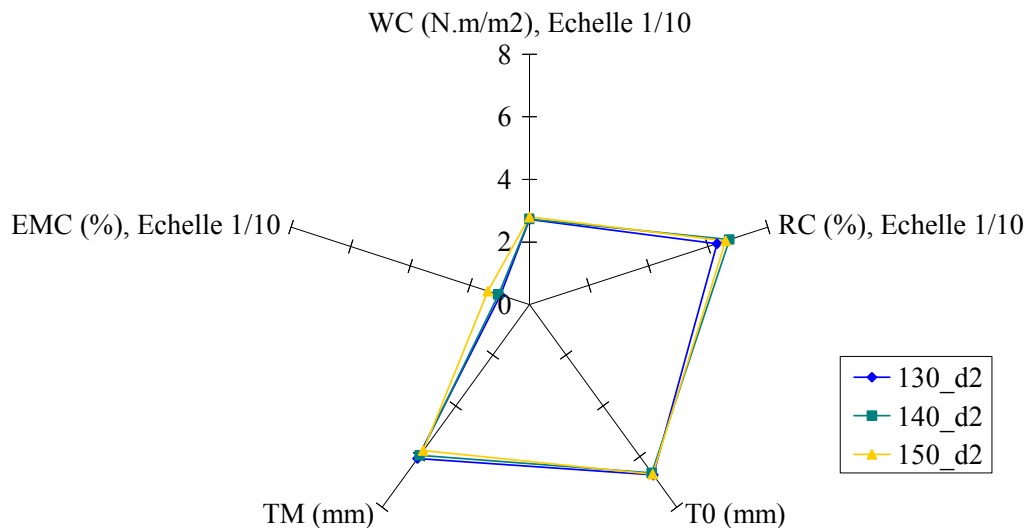


Figure 230. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type c dérivés de NT4

VI.C.3.2.2. Produits de type d**Figure 231. Diagramme radar des caractéristiques en compression des produits de type d dérivés de NT1****Figure 232. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type d dérivés de NT2**

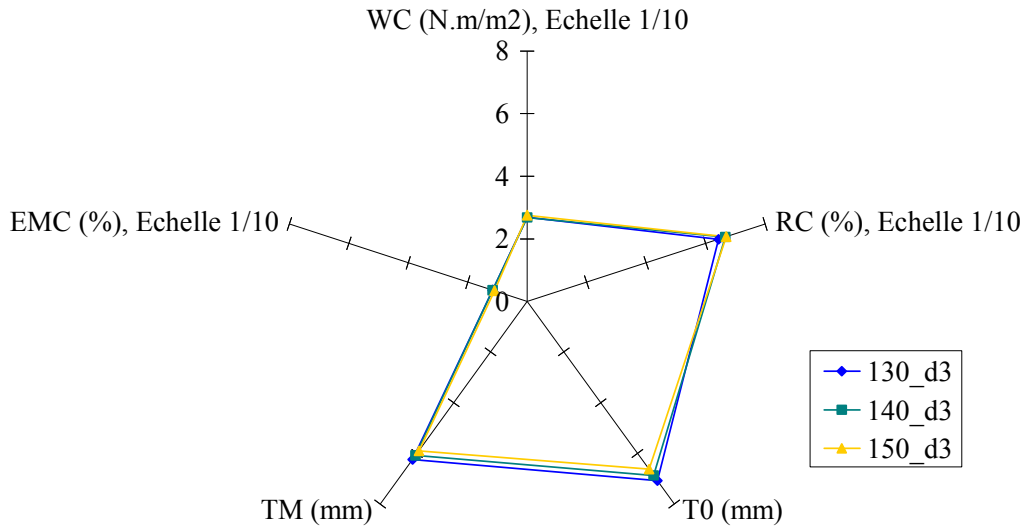


Figure 233. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type d dérivés de NT3

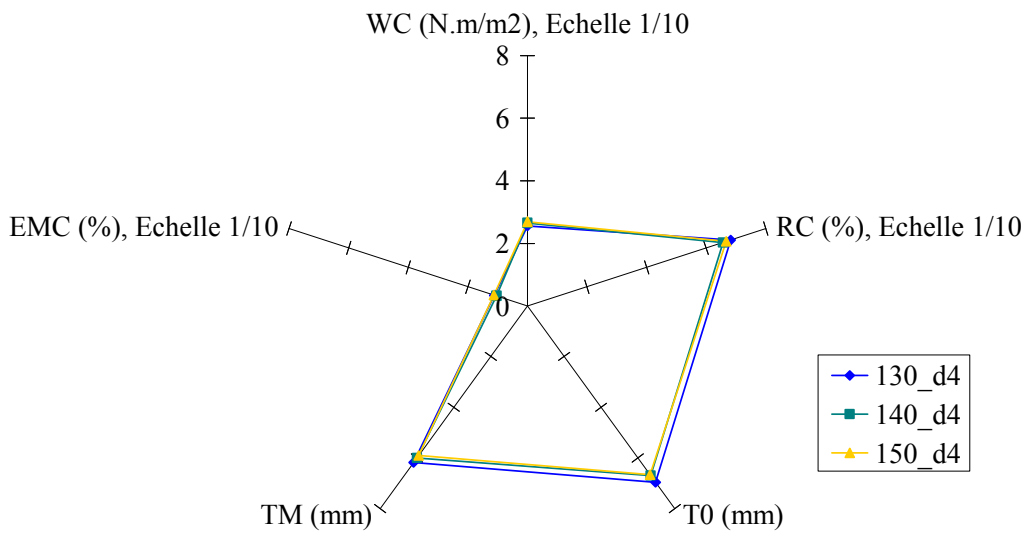
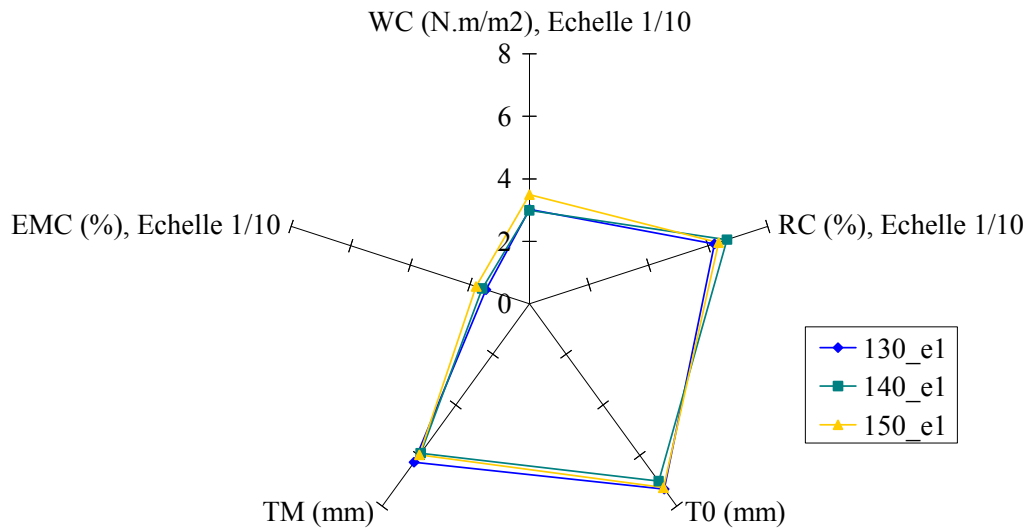
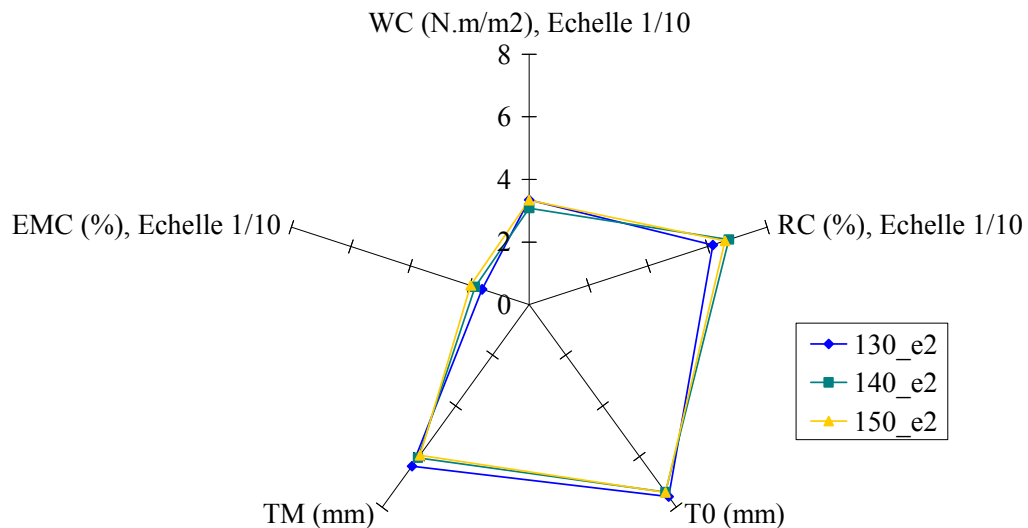


Figure 234. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type d dérivés de NT4

VI.C.3.2.3. Produits de type e**Figure 235. Diagrammes radar des caractéristiques en compression des produits de type e dérivés de NT1****Figure 236. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type e dérivés de NT2**

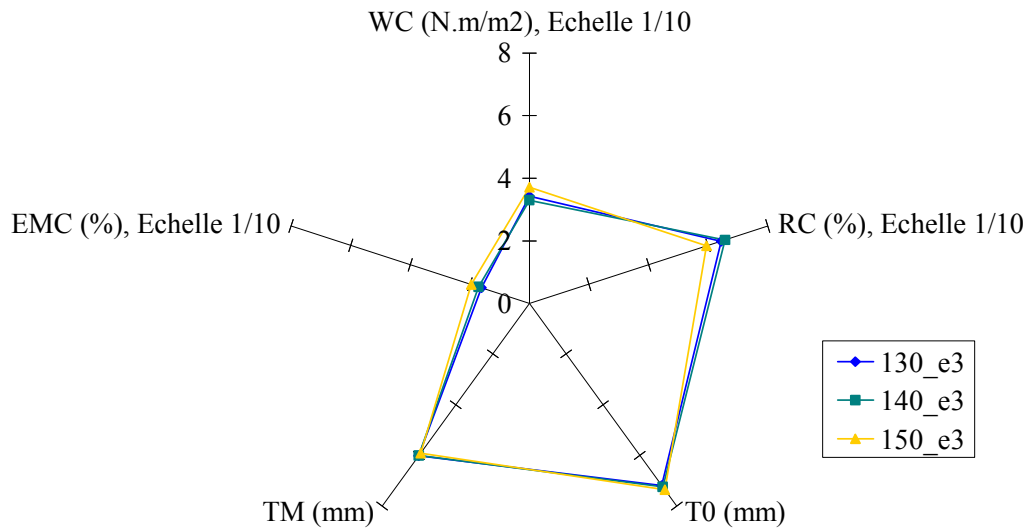


Figure 237. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type e dérivés de NT3

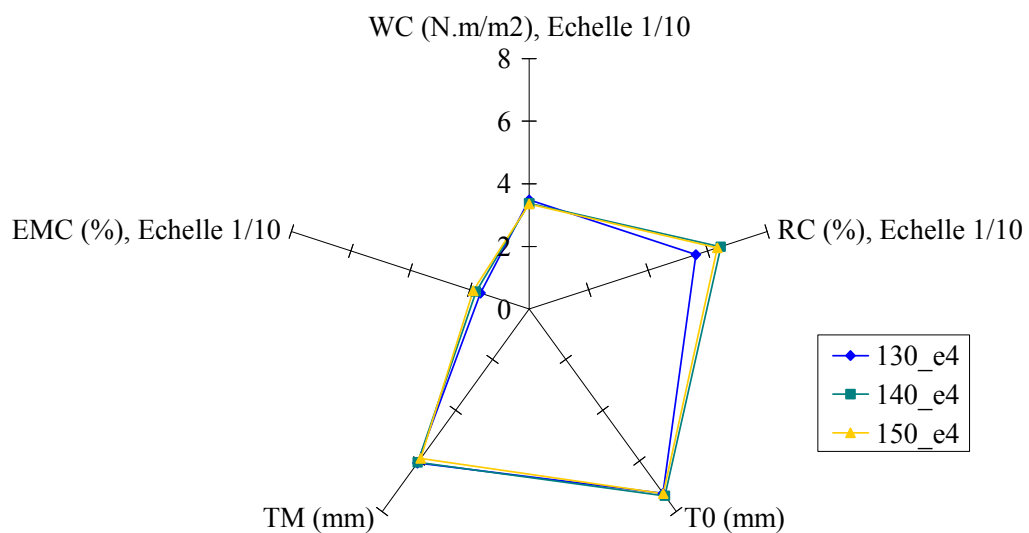


Figure 238. Caractéristiques mécaniques en compression des produits de type e dérivés de NT4

VI.C.3.3. Courbes de compression

VI.C.3.3.1. Produits de type c

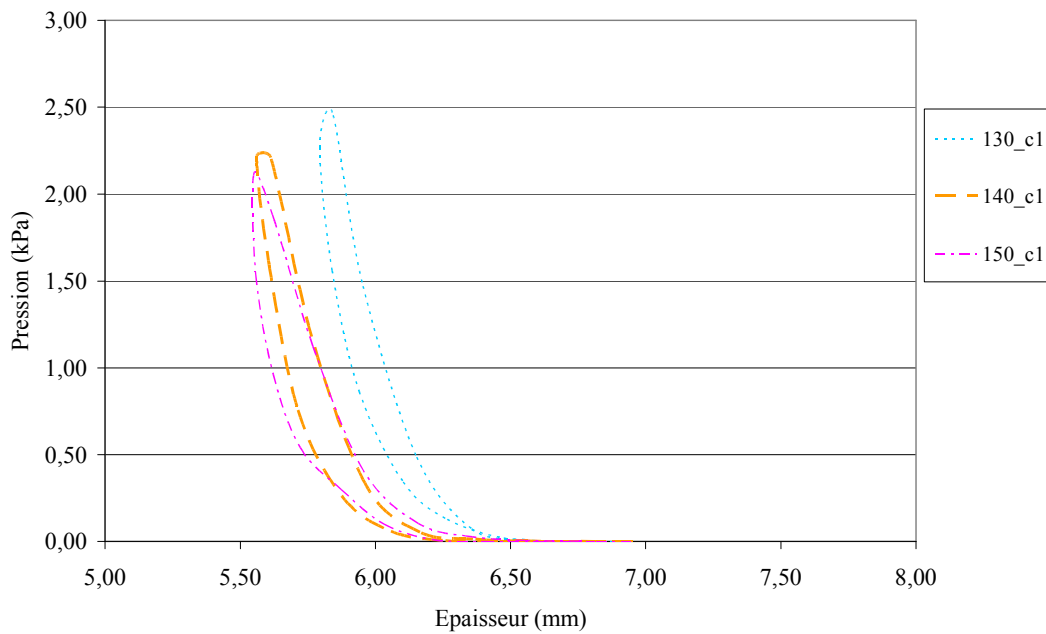


Figure 239. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT1

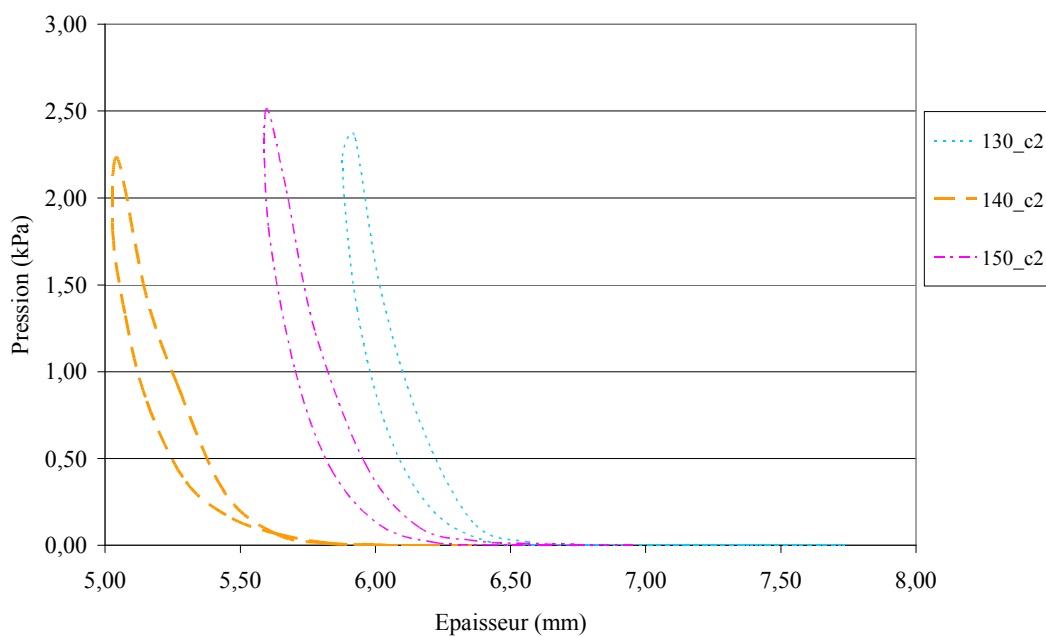


Figure 240. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT2

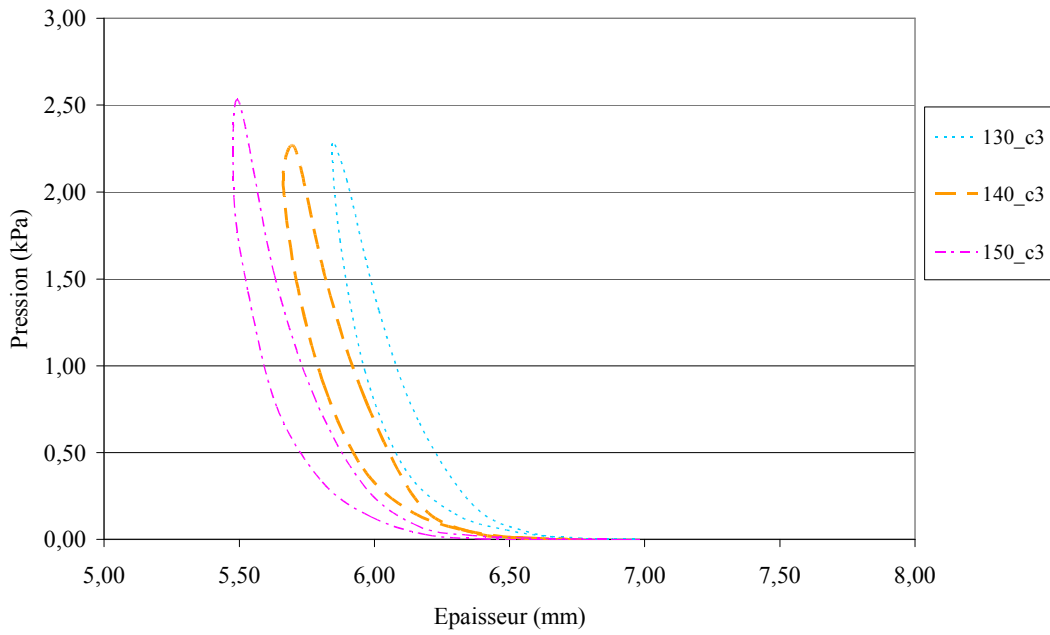


Figure 241. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT3

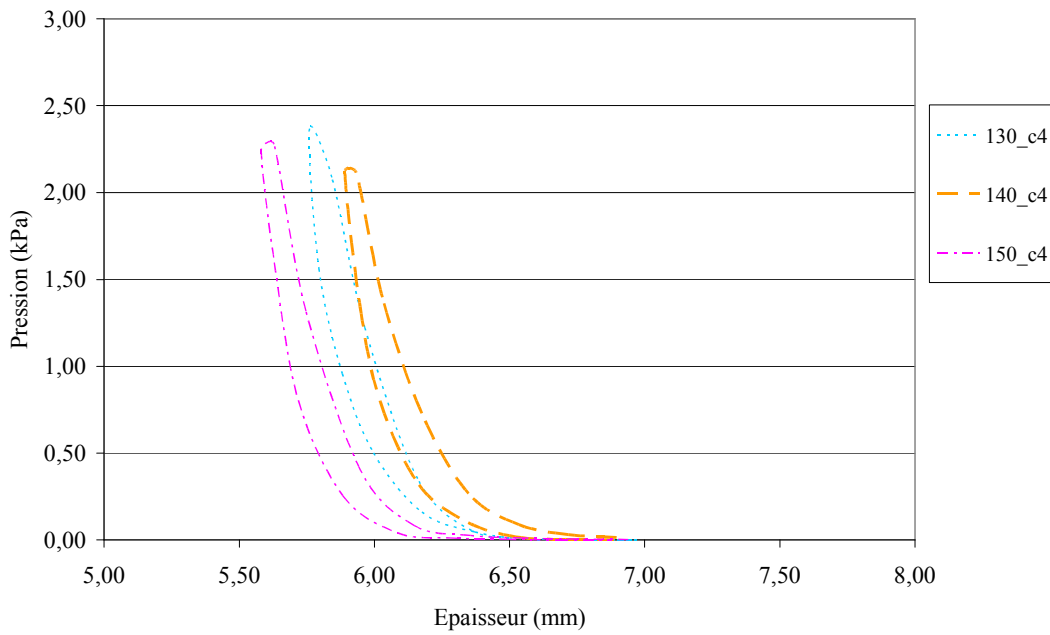


Figure 242. Courbes de compression des produits de type c dérivés de NT4

VI.C.3.3.2. Produits de type d

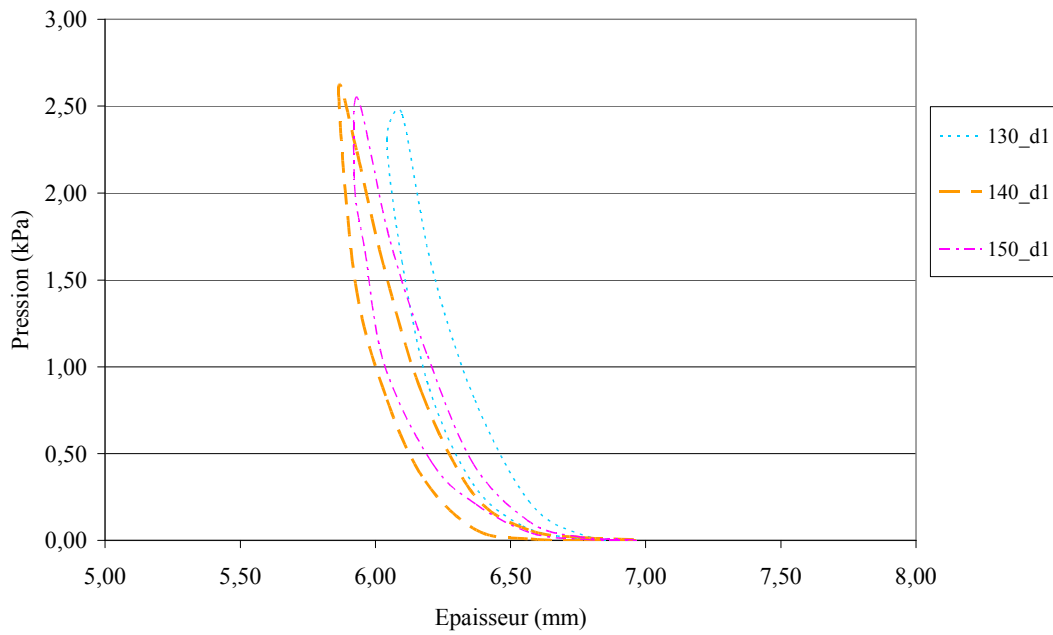


Figure 243. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT1

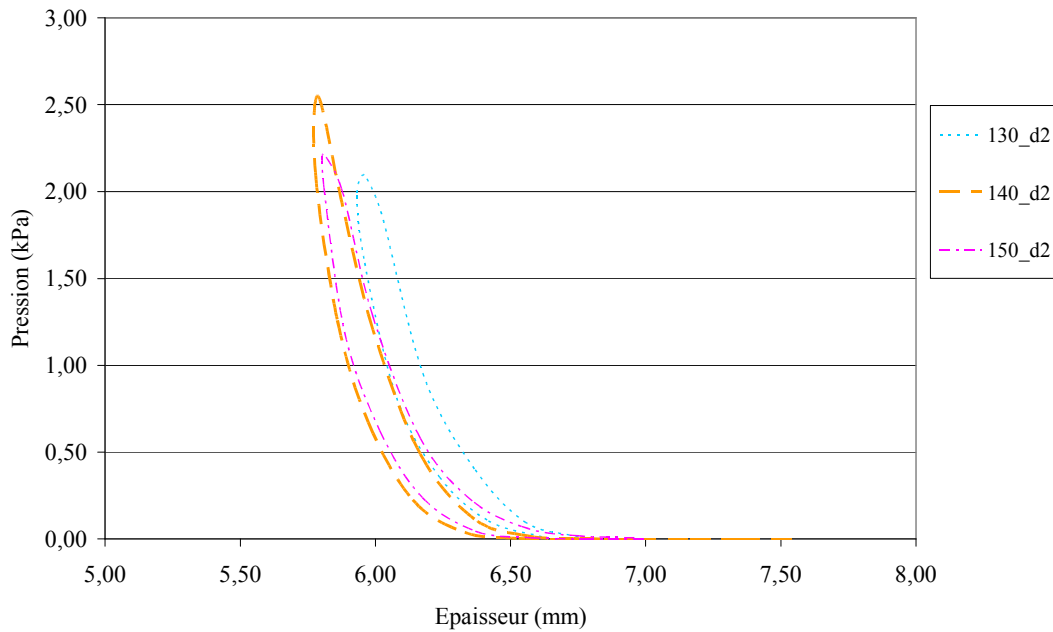


Figure 244. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT2

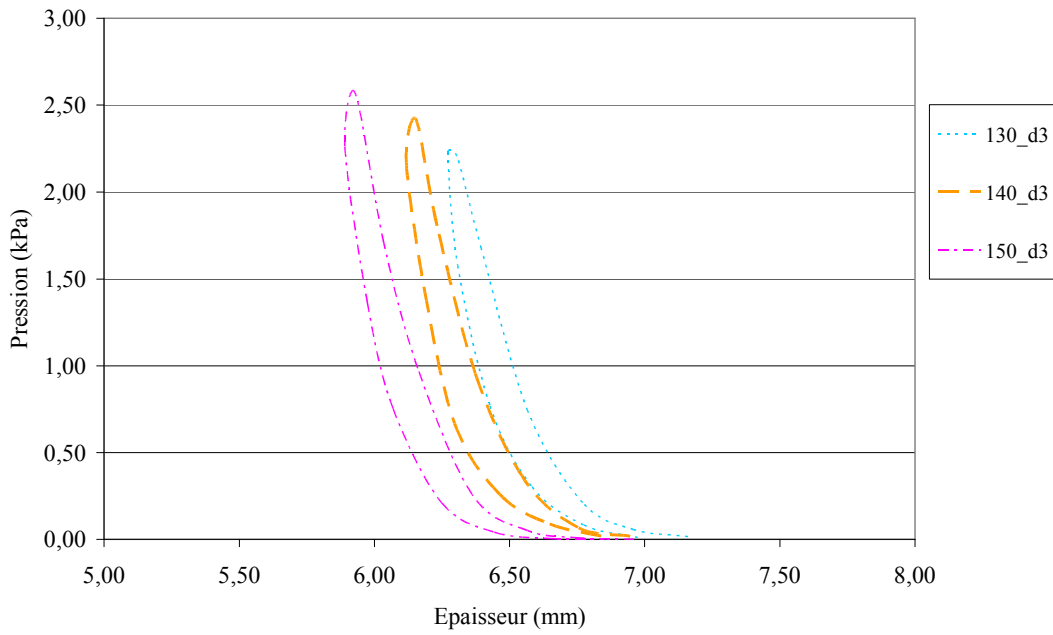


Figure 245. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT3

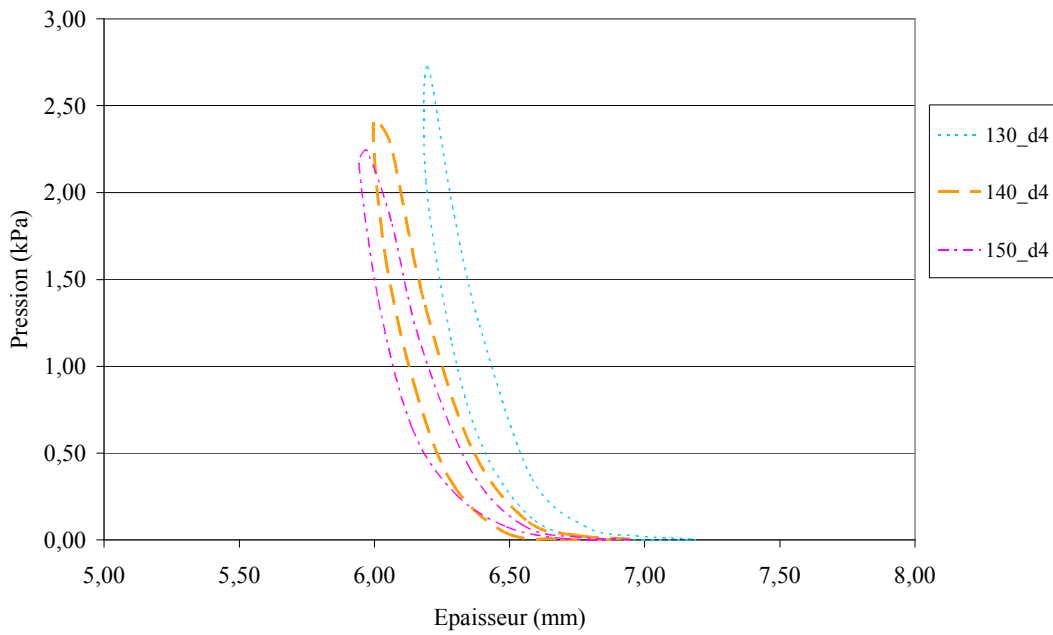


Figure 246. Courbes de compression des produits de type d dérivés de NT4

VI.C.3.3.3. Produits de type e

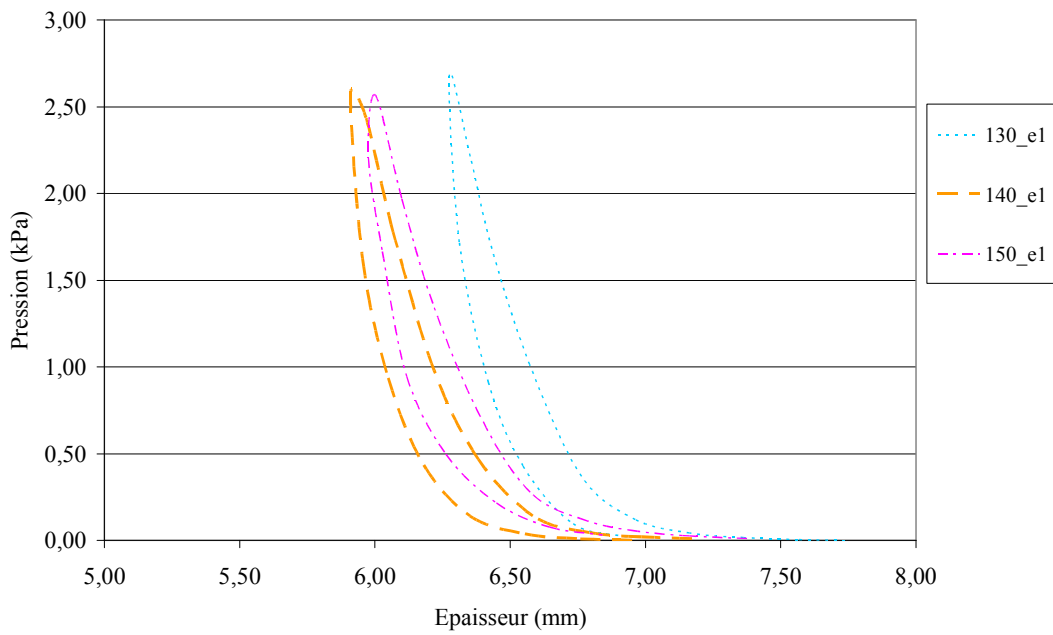


Figure 247. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT1

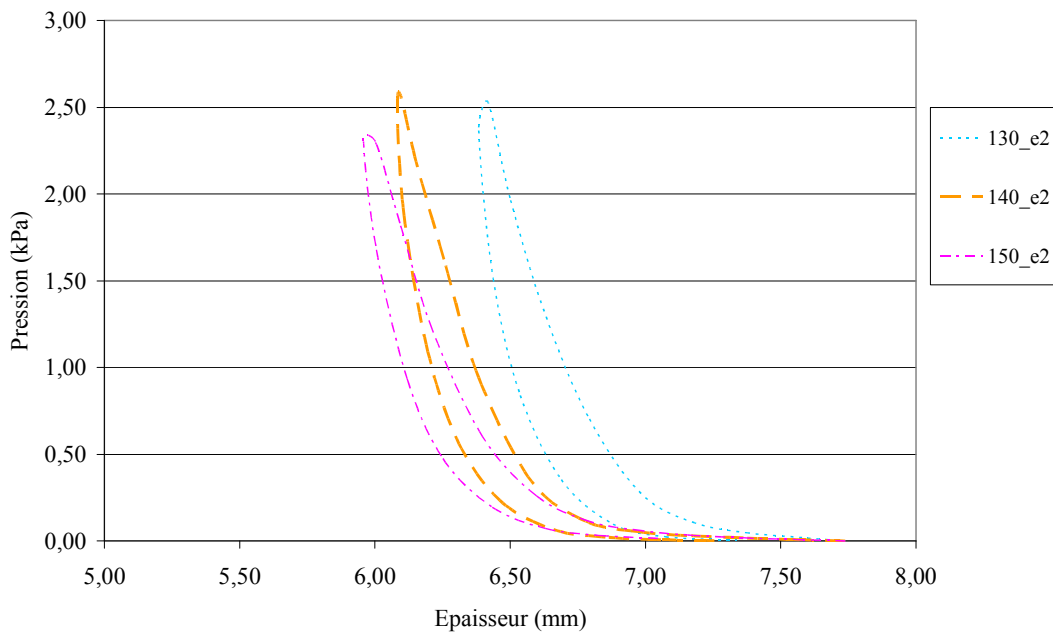


Figure 248. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT2

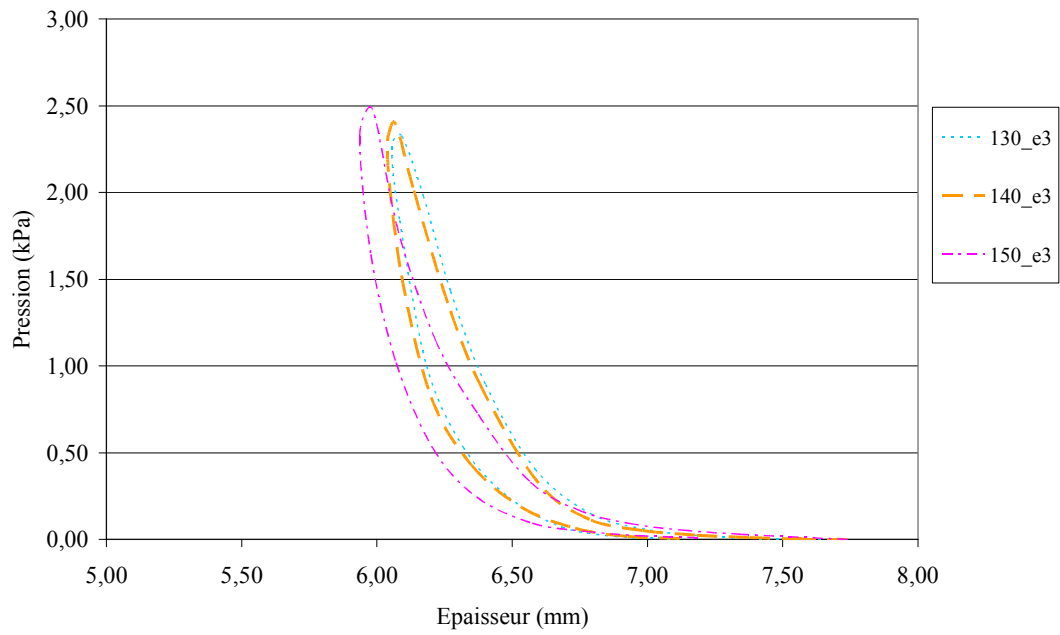


Figure 249. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT3

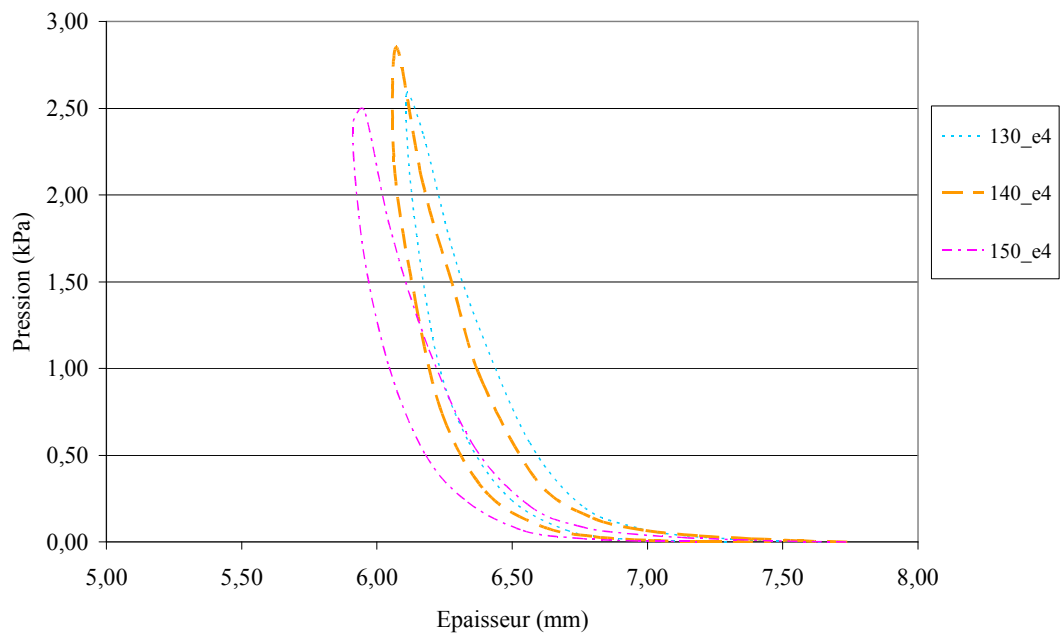


Figure 250. Courbes de compression des produits de type e dérivés de NT4

VI.C.4. Résultats des analyses statistiques

VI.C.4.1. Comparaison des variances et des moyennes

VI.C.4.1.1. Produits de type c

1. Masse surfacique

		140_c1	150_c1			M	140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	NS	F(var)	130_c2	NS	NS	
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS	
F(var)	140_c1		NS	F(var)	140_c2		NS	
t(moy)			NS	t(moy)		NS		
M		140_c3	150_c3	M		140_c4	150_c4	
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	NS	NS	
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS	
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		NS	
t(moy)			S	t(moy)		NS		

2. Epaisseur

T ₀		140_c1	150_c1	T ₀		140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	S	F(var)	130_c2	NS	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_c1		S	F(var)	140_c2		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	
T0		140_c3	150_c3	T0		140_c4	150_c4
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	NS
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	

3. Perméabilité à l'air

P _{air}		140_c1	150_c1	P _{air}		140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	NS	F(var)	130_c2	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_c1		S	F(var)	140_c2		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	NS

P _{air}		140_c3	150_c3	P _{air}		140_c4	150_c4
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	NS	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	NS

4. Conductivité thermique

K		140_c1	150_c1	K		140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	NS	F(var)	130_c2	NS	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_c1		NS	F(var)	140_c2		NS
t(moy)			S	t(moy)		S	S

K		140_c3	150_c3	K		140_c4	150_c4
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	NS	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		NS
t(moy)			S	t(moy)		S	S

5. Epaisseur après compression

T _M		140_c1	150_c1	T _M		140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	S	F(var)	130_c2	S	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_c1		S	F(var)	140_c2		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	NS

T _M		140_c3	150_c3	T _M		140_c4	150_c4
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	S
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	NS

6. Compressibilité

EMC		140_c1	150_c1	EMC		140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	NS	F(var)	130_c2	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_c1		NS	F(var)	140_c2		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	

EMC		140_c3	150_c3	EMC		140_c4	150_c4
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	S	S
t(moy)		NS	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		NS
t(moy)			S	t(moy)		S	

7. Energie dissipée

WC		140_c1	150_c1	WC		140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	S	NS	F(var)	130_c2	NS	NS
t(moy)		S	NS	t(moy)		S	S
F(var)	140_c1		S	F(var)	140_c2		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	

WC		140_c3	150_c3	WC		140_c4	150_c4
F(var)	130_c3	NS	NS	F(var)	130_c4	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	NS
F(var)	140_c3		NS	F(var)	140_c4		S
t(moy)			NS	t(moy)		S	

8. Résilience

RC				140_c1	150_c1	RC				140_c2	150_c2
F(var)	130_c1	NS	S	F(var)	130_c2	NS	NS	F(var)	140_c2	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_c1		S	F(var)	140_c2		NS	F(var)	140_c4		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	

VI.C.4.1.2. Produits de type d

1. Masse surfacique

M				140_d1	150_d1	M				140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	NS	F(var)	130_d2	NS	NS	F(var)	140_d2	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_d1		NS	F(var)	140_d2		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	

2. Epaisseur

T ₀				140_d1	150_d1	T ₀				140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	NS	F(var)	130_d2	NS	S	F(var)	140_d2	NS	S
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_d1		NS	F(var)	140_d2		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	

3. Perméabilité à l'air

P _{air}		140_d1	150_d1	P _{air}		140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	NS	F(var)	130_d2	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	S
F(var)	140_d1		NS	F(var)	140_d2		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	NS

P _{air}		140_d3	150_d3	P _{air}		140_d4	150_d4
F(var)	130_d3	NS	NS	F(var)	130_d4	NS	S
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	S
F(var)	140_d3		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	NS

4. Conductivité thermique

K		140_d1	150_d1	K		140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	NS	F(var)	130_d2	S	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_d1		NS	F(var)	140_d2		NS
t(moy)			S	t(moy)		S	S

K		140_d3	150_d3	K		140_d4	150_d4
F(var)	130_d3	NS	S	F(var)	130_d4	NS	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_d3		S	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			S	t(moy)		S	S

5. Epaisseur après compression

T _M		140_d1	150_d1	T _M		140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	NS	F(var)	130_d2	NS	NS
t(moy)		S	NS	t(moy)		NS	S
F(var)	140_d1		NS	F(var)	140_d2		NS
t(moy)			NS	t(moy)		S	S

T _M		140_d3	150_d3	T _M		140_d4	150_d4
F(var)	130_d3	NS	NS	F(var)	130_d4	S	S
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_d3		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	NS

6. Compressibilité

EMC		140_d1	150_d1	EMC		140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	NS	F(var)	130_d2	NS	NS
t(moy)		S	NS	t(moy)		NS	S
F(var)	140_d1		NS	F(var)	140_d2		S
t(moy)			NS	t(moy)		S	

EMC		140_d3	150_d3	EMC		140_d4	150_d4
F(var)	130_d3	NS	NS	F(var)	130_d4	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_d3		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	

7. Energie dissipée

WC		140_d1	150_d1	WC		140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	S	F(var)	130_d2	S	S
t(moy)		NS	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_d1		S	F(var)	140_d2		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	

WC		140_d3	150_d3	WC		140_d4	150_d4
F(var)	130_d3	S	NS	F(var)	130_d4	NS	NS
t(moy)		S	NS	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_d3		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	

8. Résilience

RC		140_d1	150_d1	RC		140_d2	150_d2
F(var)	130_d1	NS	S	F(var)	130_d2	S	S
t(moy)		NS	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_d1		S	F(var)	140_d2		NS
t(moy)			S	t(moy)		NS	

RC		140_d3	150_d3	RC		140_d4	150_d4
F(var)	130_d3	S	NS	F(var)	130_d4	S	S
t(moy)		S	NS	t(moy)		S	S
F(var)	140_d3		NS	F(var)	140_d4		NS
t(moy)			NS	t(moy)		NS	

VI.C.4.1.3. Produits de type e

1. Masse surfacique

M		140_e1	150_e1	M		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		S	NS	t(moy)		S	NS
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			S	t(moy)			NS
M		140_e3	150_e3	M		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	S
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS

2. Epaisseur

T ₀		140_e1	150_e1	T ₀		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	S
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS
T ₀		140_e3	150_e3	T ₀		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	S	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	NS
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		S
t(moy)			NS	t(moy)			S

3. Perméabilité à l'air

P _{air}		140_e1	150_e1	P _{air}		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	S
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			NS	t(moy)			S

P _{air}		140_e3	150_e3	P _{air}		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	S
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS

4. Conductivité thermique

K		140_e1	150_e1	K		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	S
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			NS	t(moy)			S

K		140_e3	150_e3	K		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		NS
t(moy)			S	t(moy)			S

5. Epaisseur après compression

T _M		140_e1	150_e1	T _M		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		S	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS

T _M		2	3	T _M		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	S
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		NS
t(moy)			NS	t(moy)			S

6. Compressibilité

EMC		140_e1	150_e1	EMC		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	S
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS
EMC		140_e3	150_e3	EMC		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		S
t(moy)			NS	t(moy)			S

7. Energie dissipée

WC		140_e1	150_e1	WC		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			S	t(moy)			NS
WC		140_e3	150_e3	WC		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	NS	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		NS	NS
F(var)	140_e3		NS	F(var)	140_e4		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS

8. Résilience

RC		140_e1	150_e1	RC		140_e2	150_e2
F(var)	130_e1	NS	NS	F(var)	130_e2	NS	NS
t(moy)		NS	NS	t(moy)		S	NS
F(var)	140_e1		NS	F(var)	140_e2		NS
t(moy)			NS	t(moy)			NS
RC		140_e3	150_e3	RC		140_e4	150_e4
F(var)	130_e3	NS	S	F(var)	130_e4	NS	NS
t(moy)		NS	S	t(moy)		S	S
F(var)	140_e3		S	F(var)	140_e4		NS
t(moy)			S	t(moy)			NS

VI.C.4.2. Analyse en Composantes Principales

VI.C.4.2.1. Produits de types c, d et e

Tableau 48. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de types c, d et e

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Energie dissipée	1,00						
Résilience	-0,53	1,00					
Epaisseur	0,86	-0,39	1,00				
Compressibilité	0,83	-0,36	0,75	1,00			
Masse surfacique	0,17	0,17	0,35	-0,09	1,00		
Perméabilité à l'air	-0,24	-0,15	-0,45	0,00	-0,56	1,00	
Conductivité thermique	-0,35	0,03	-0,41	-0,02	-0,32	0,57	1,00

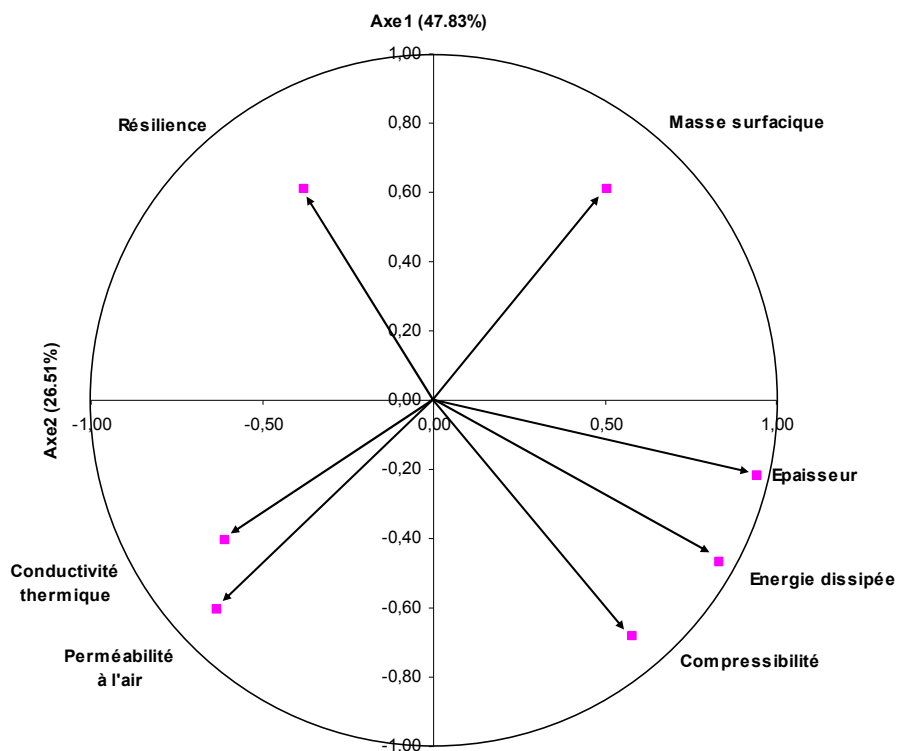


Figure 251. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de types c, d et e – Axes A1A2

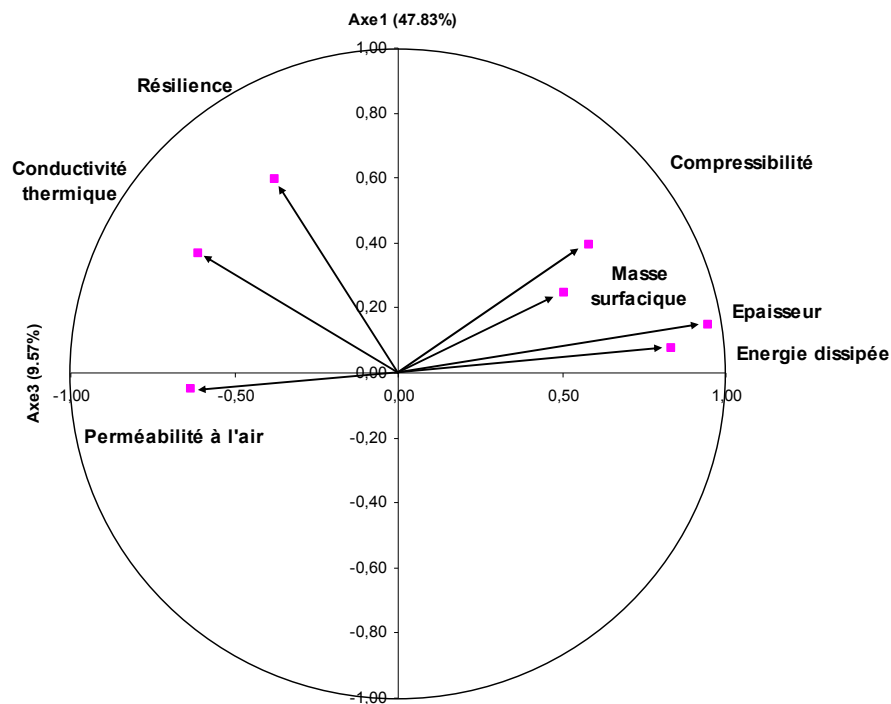


Figure 252. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de types c, d et e – Axes A1A3

VI.C.4.2.2. Produits de type c

Tableau 49. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type c

	Epaisseur	Compressibilité	Energie dissipée	Résilience	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Epaisseur	1,00						
Compressibilité	0,12	1,00					
Energie dissipée	0,36	0,54	1,00				
Résilience	-0,58	-0,17	-0,35	1,00			
Masse surfacique	0,57	0,06	0,26	-0,20	1,00		
Perméabilité à l'air	-0,21	0,25	0,29	0,28	0,30	1,00	
Conductivité thermique	-0,08	0,77	0,31	0,11	0,32	0,47	1,00

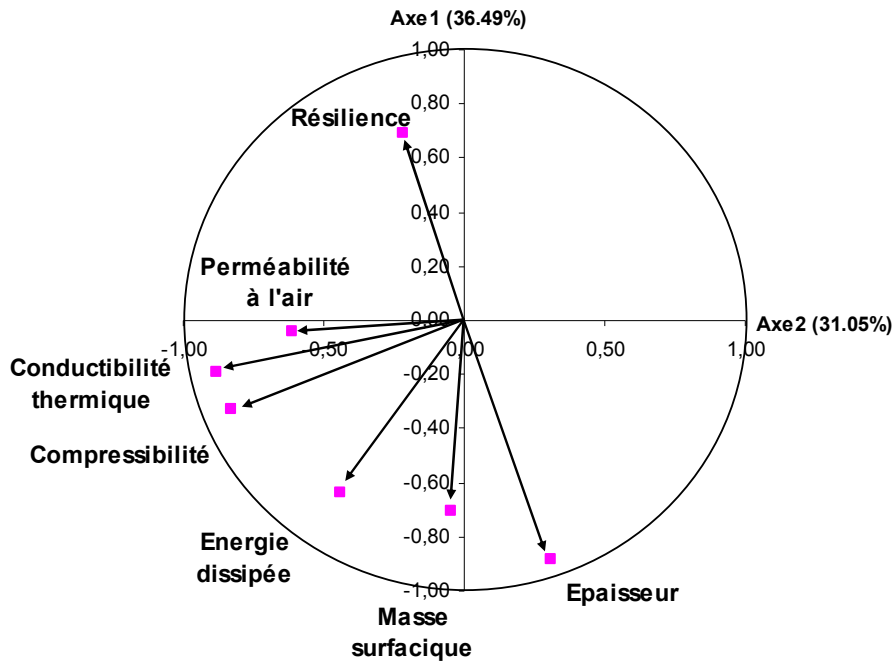


Figure 253. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type c – Axes A1A2

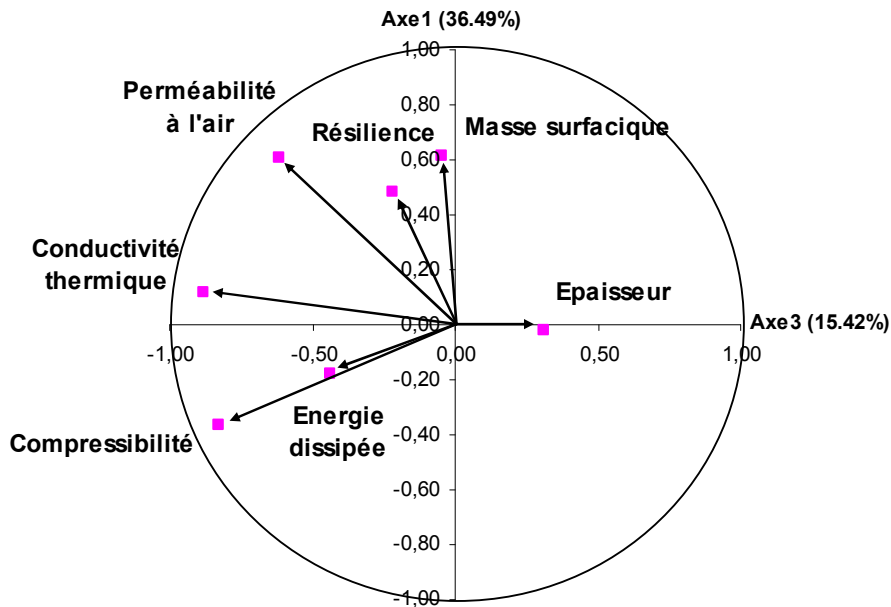


Figure 254. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type c – Axes A1A3

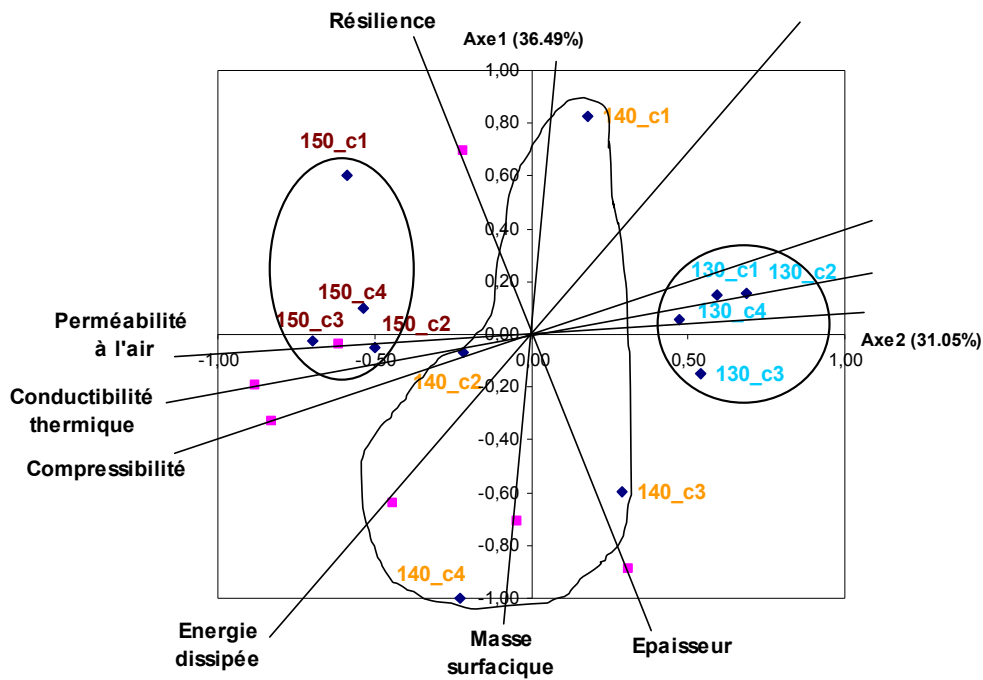


Figure 255. Carte des produits de type c – Axes A1A2

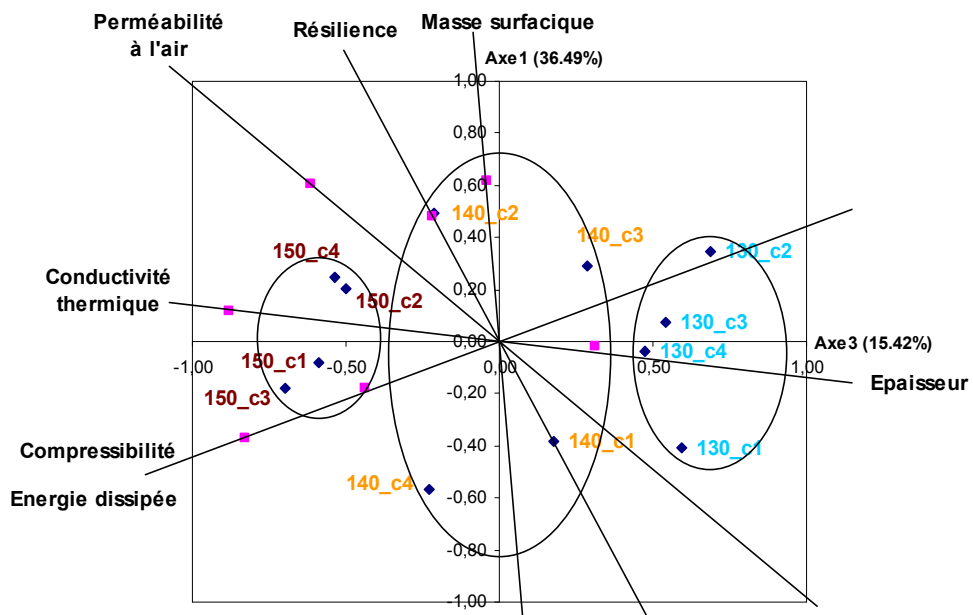


Figure 256. Carte des produits de type c – Axes A1A3

VI.C.4.2.3. Produits de type d

Tableau 50. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type d

	Epaisseur	Compressibilité	Energie dissipée	Résilience	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Epaisseur	1,00						
Compressibilité	0,04	1,00					
Energie dissipée	-0,40	0,31	1,00				
Résilience	-0,01	0,10	-0,57	1,00			
Masse surfacique	0,28	-0,29	-0,45	0,19	1,00		
Perméabilité à l'air	-0,56	0,15	0,07	0,33	-0,14	1,00	
Conductivité thermique	0,53	-0,38	-0,21	-0,40	0,14	-0,41	1,00

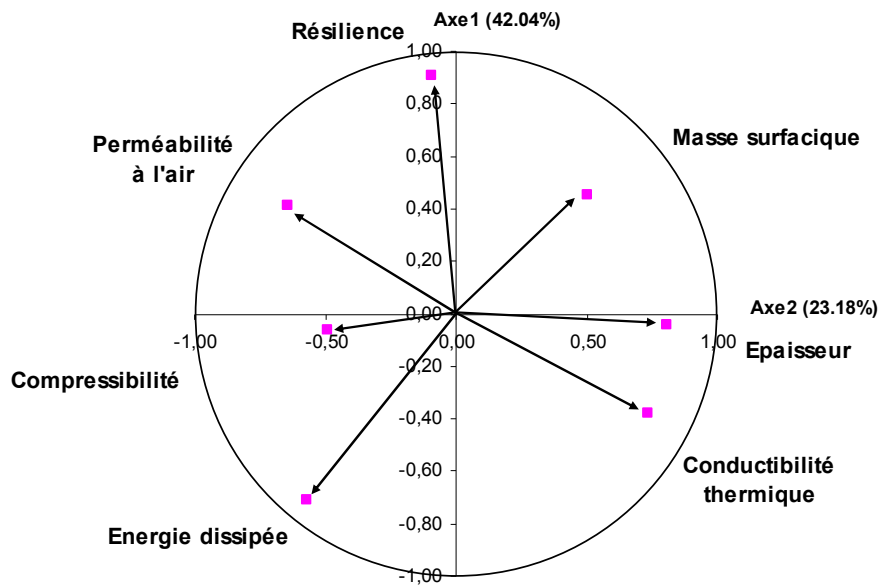
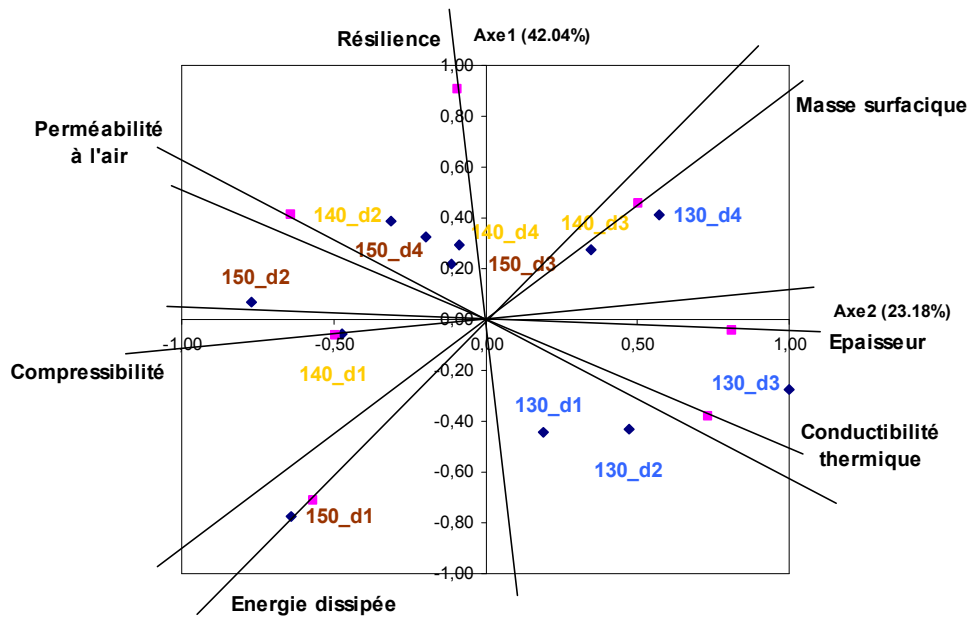
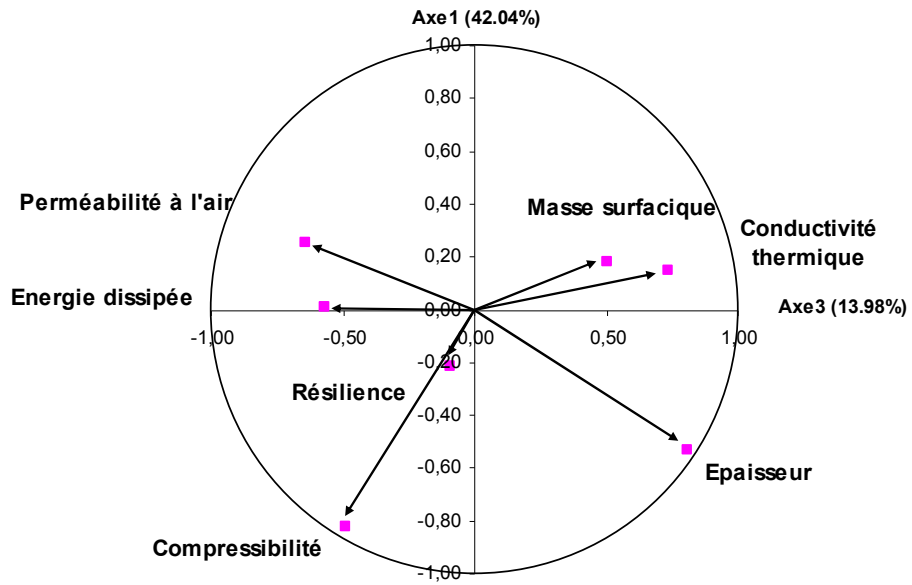


Figure 257. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type d – Axes A1A2



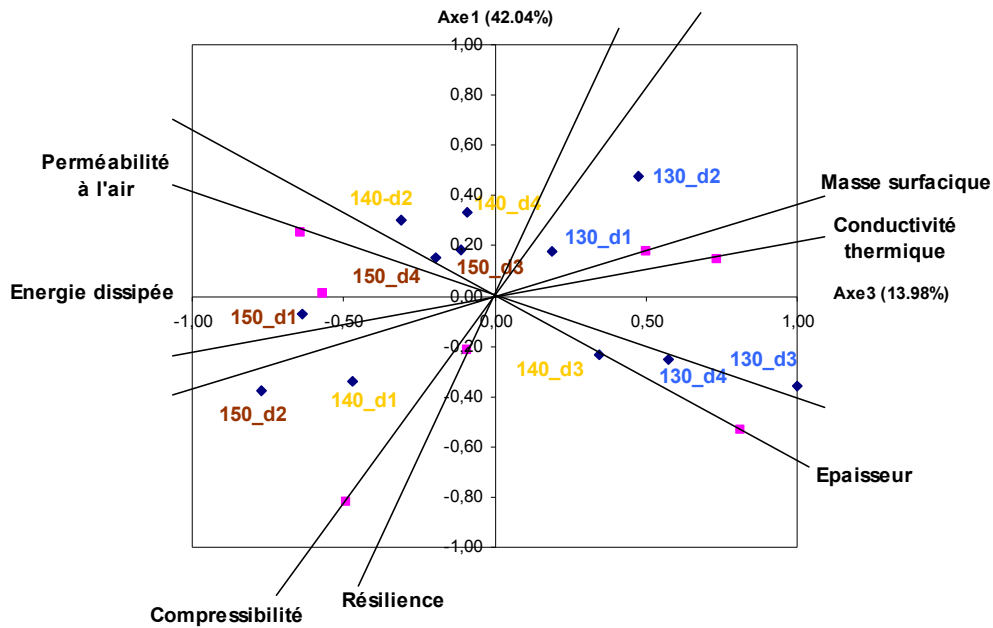


Figure 260. Carte des produits de type d – Axes A1A3

VI.C.4.2.4. Produits de type e

Tableau 51. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type e

	Epaisseur	Compressibilité	Energie dissipée	Résilience	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Epaisseur	1,00						
Compressibilité	0,23	1,00					
Energie dissipée	0,23	0,50	1,00				
Résilience	-0,18	0,14	-0,56	1,00			
Masse surfacique	0,80	0,33	0,14	0,24	1,00		
Perméabilité à l'air	0,29	0,48	0,66	-0,63	-0,03	1,00	
Conductivité thermique	0,32	0,93	0,41	0,14	0,47	0,37	1,00

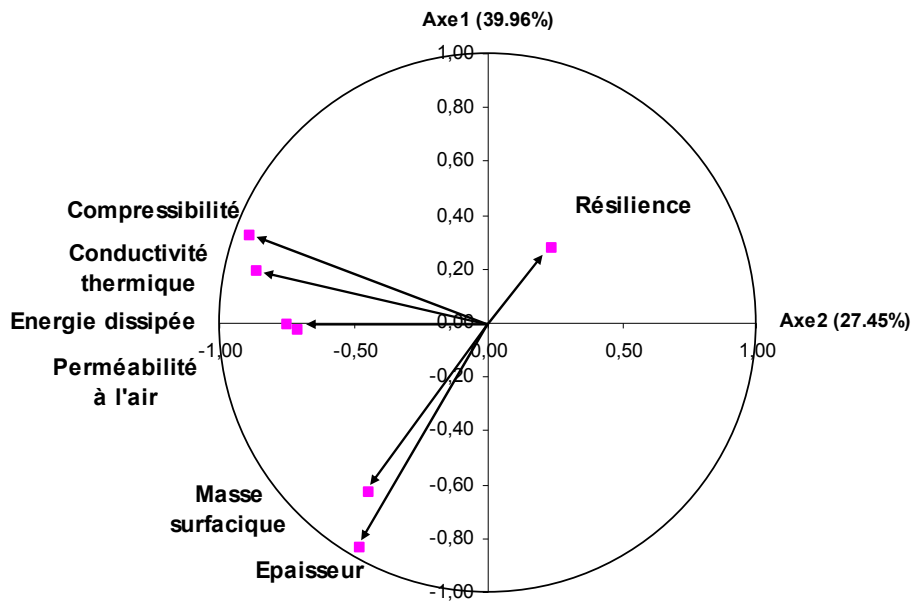


Figure 261. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type e – Axes A1A2

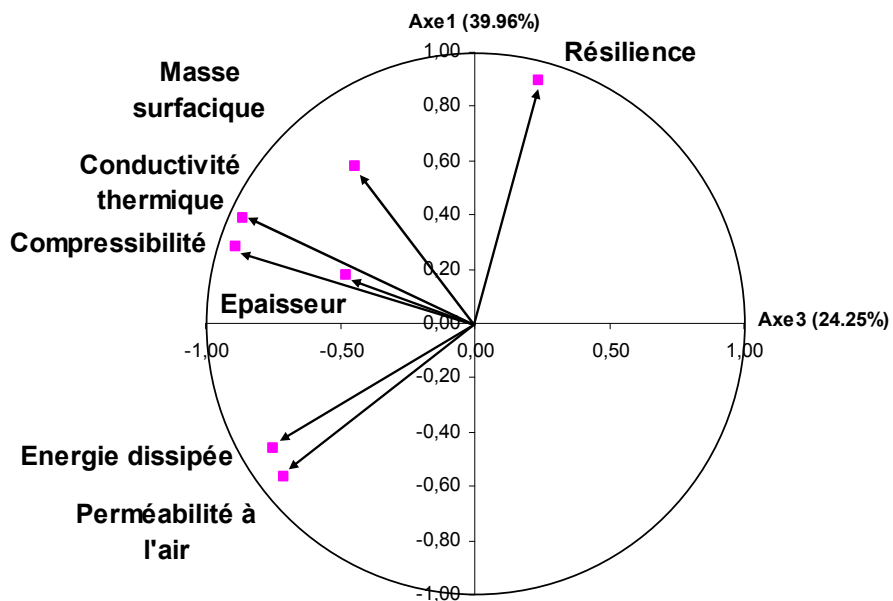


Figure 262. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression des produits de type e – Axes A1A3

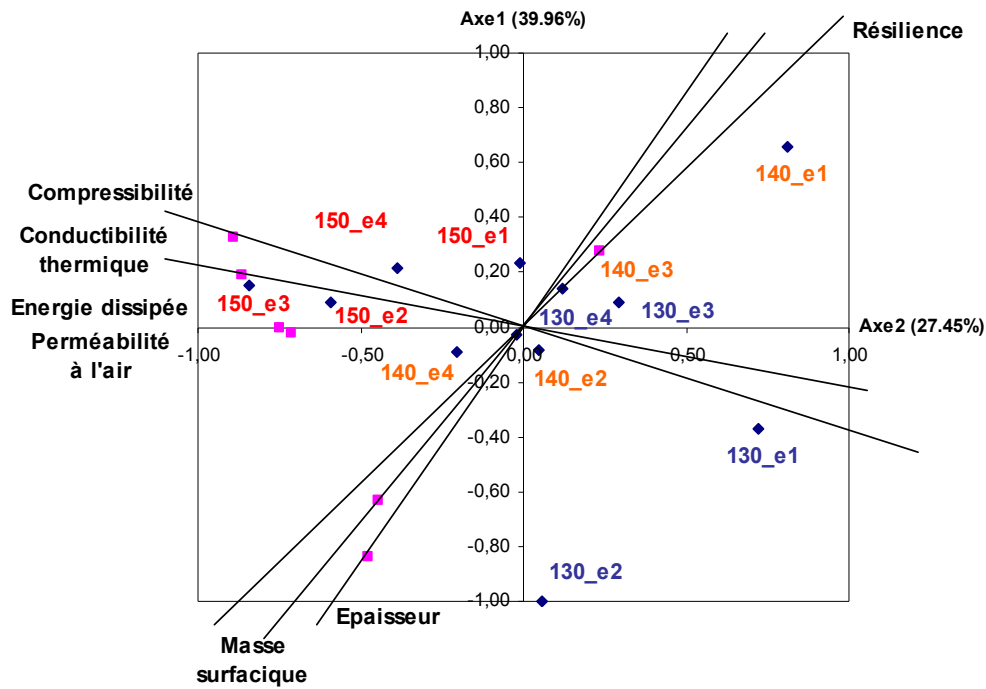


Figure 263. Carte des produits de type e – Axes A1A2

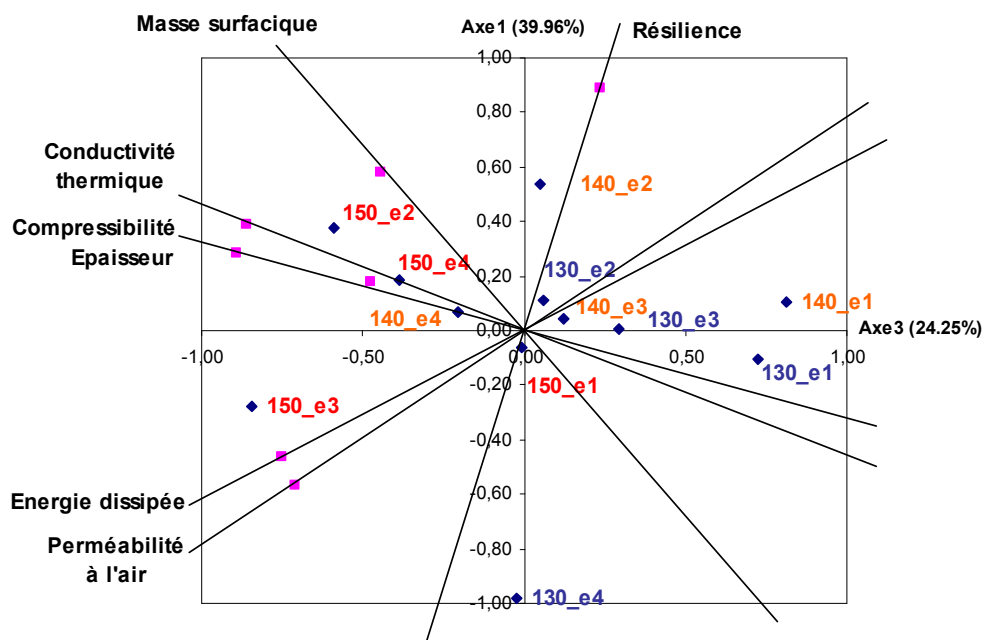


Figure 264. Carte des produits de type e – Axes A1A3

ANNEXE VII : ETUDE NON-TISSES 3D Vs. MOUSSES PU

VII.1. Caractéristiques mesurées

1. Masse surfacique

Echantillons testés	n	M (g/m²)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	386,13	5,73	1,48	2,10	0,54
m1	31	181,84	2,03	1,12	0,75	0,41
m2	31	179,71	1,68	0,93	0,62	0,34

2. Perméabilité à l'air

Echantillons testés	n	P_{air} (l/m²/s)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	27,59	10,75	38,97	3,94	14,29
m1	31	38,36	5,20	13,55	1,91	4,97
m2	31	295,61	7,82	2,64	2,87	0,97

3. Conductivité thermique

Echantillons testés	n	K (W/m.K)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	0,026	0,001	3,32	0,00	1,22
m1	31	0,028	0,001	5,07	0,00	1,86
m2	31	0,044	0,002	4,00	0,00	1,47

4. Taille de cellule horizontale

Echantillons testés	n	H (mm)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	0,297	0,05	16,74	0,02	6,14
m1	15	0,250	0,03	10,99	0,02	6,09
m2	15	0,310	0,05	15,89	0,03	8,80

5. Taille de cellule verticale

Echantillons testés	n	V (mm)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	0,246	0,05	20,91	0,02	7,67
m1	15	0,206	0,03	15,44	0,02	8,55
m2	15	0,245	0,03	10,81	0,01	5,99

6. Epaisseur

Echantillons testés	n	T₀ (mm)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	4,42	0,16	3,59	0,06	1,31
m1	31	4,99	0,40	8,02	0,15	2,94
m2	31	5,00	0,59	11,73	0,22	4,30

7. Epaisseur après compression

Echantillons testés	n	T_M (mm)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	2,91	0,12	4,12	0,04	1,51
m1	31	4,28	0,05	1,09	0,02	0,40
m2	31	4,00	0,04	1,06	0,02	0,39

8. Compressibilité

Echantillons testés	n	EMC (%)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	34,20	2,84	8,31	1,04	3,05
m1	31	13,75	6,69	48,64	2,45	17,84
m2	31	19,96	8,06	40,38	2,96	14,81

9. Energie dissipée

Echantillons testés	n	WC (N/m/m²)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	19,58	1,65	8,40	0,60	3,08
m1	31	15,82	0,92	5,84	0,34	2,14
m2	31	20,90	2,51	12,00	0,92	4,40

10. Résilience

Echantillons testés	n	RC (%)	écart-type	CV%	IC	LPE%
Cm	31	73,61	1,92	2,60	0,70	0,95
m1	31	87,51	4,54	5,18	1,66	1,90
m2	31	86,42	3,17	3,67	1,16	1,35

VII.2. Caractéristiques physiques

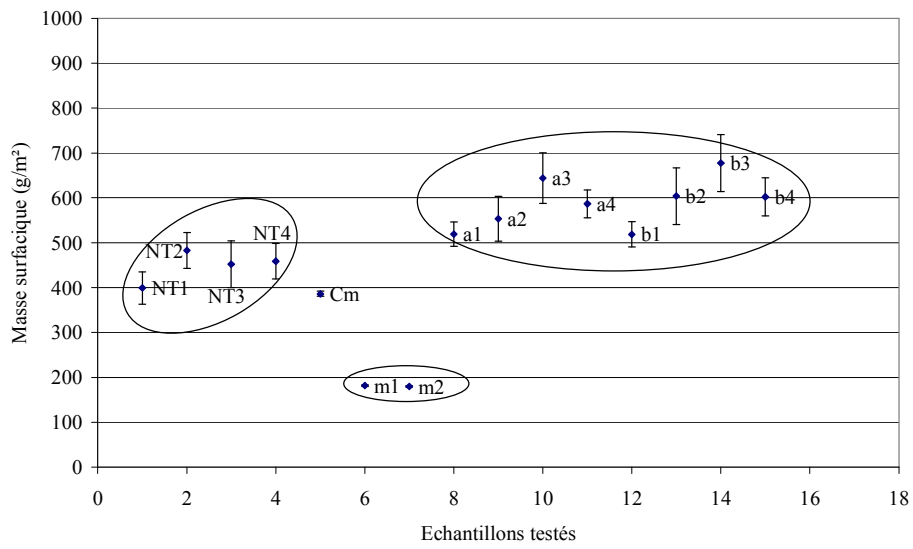


Figure 265. Masse surfacique des produits non-tissés 3D et des mousses PU

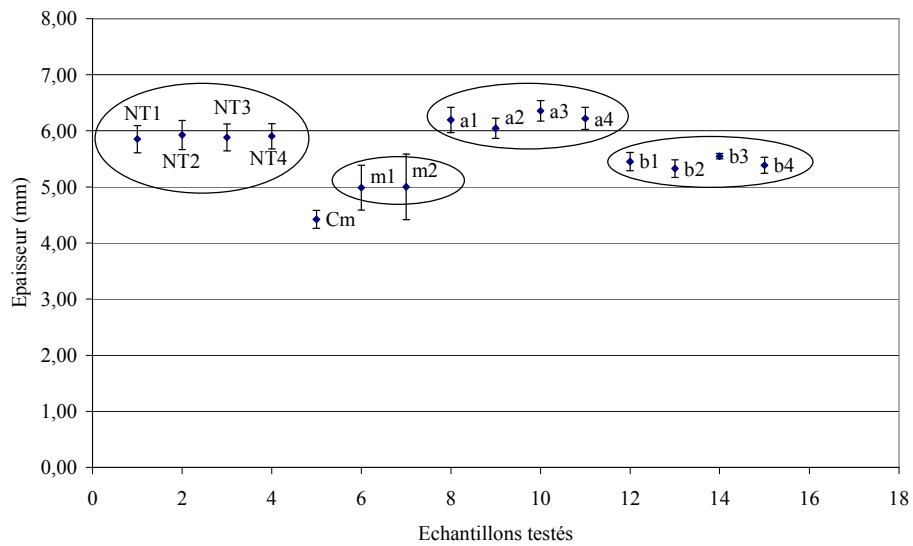


Figure 266. Epaisseur des produits testés

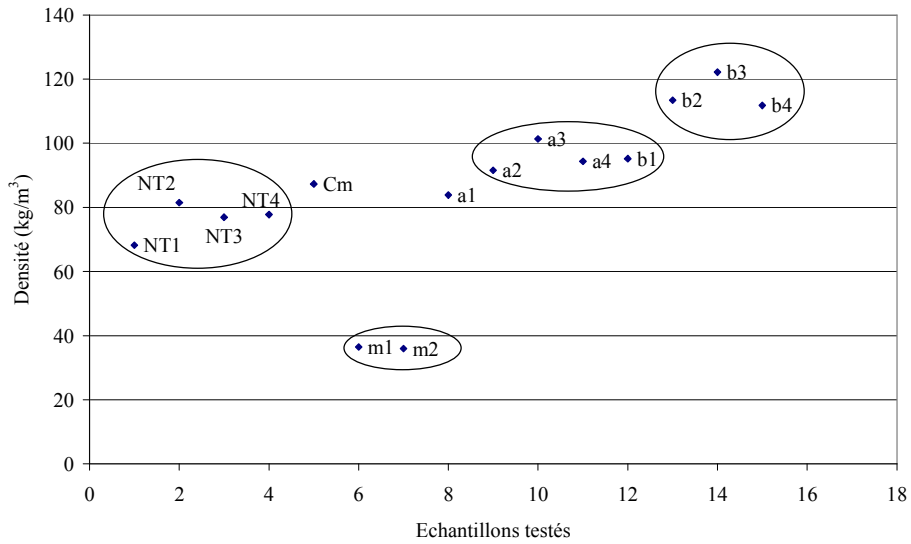


Figure 267. Densité des produits testés

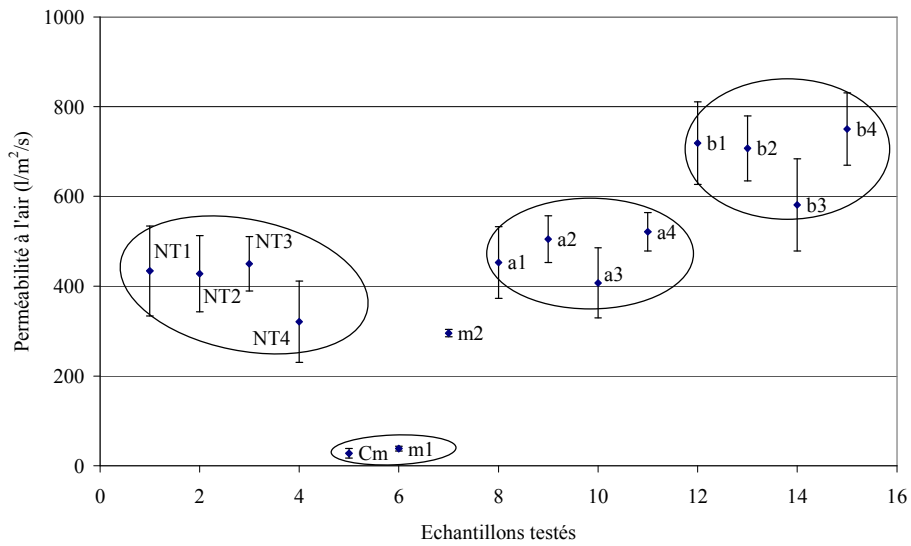


Figure 268. Perméabilité à l'air des produits testés

VII.3. Caractéristiques mécaniques en compression

VII.3.1. Compression sur un cycle

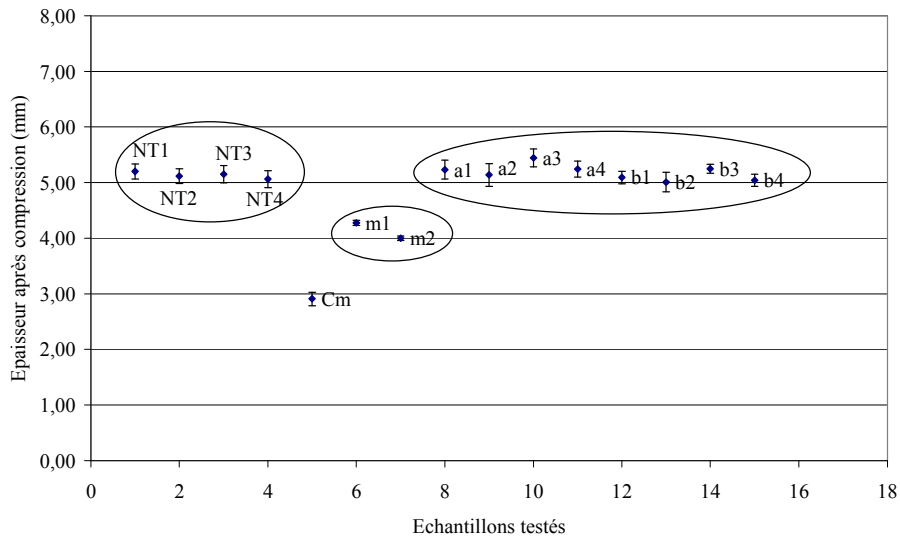


Figure 269. Epaisseur après compression des produits testés

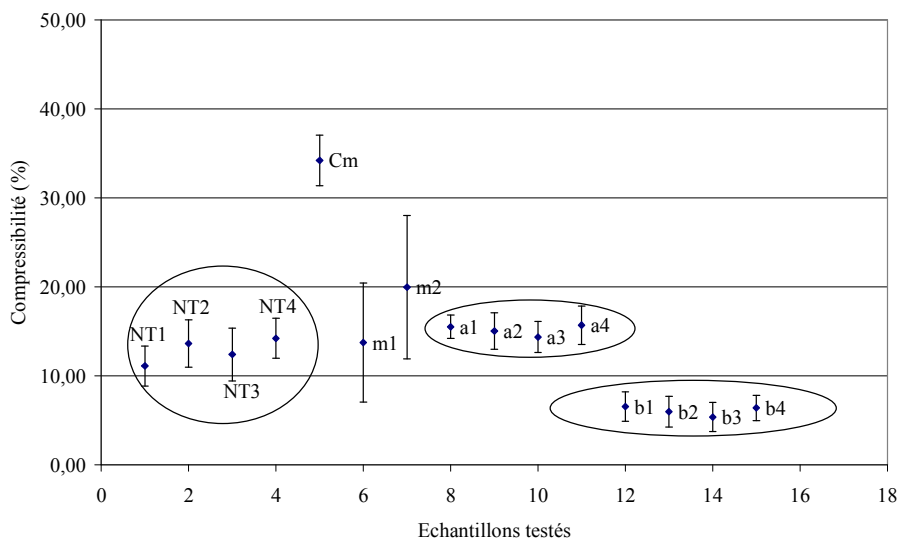


Figure 270. Compressibilité des produits testés

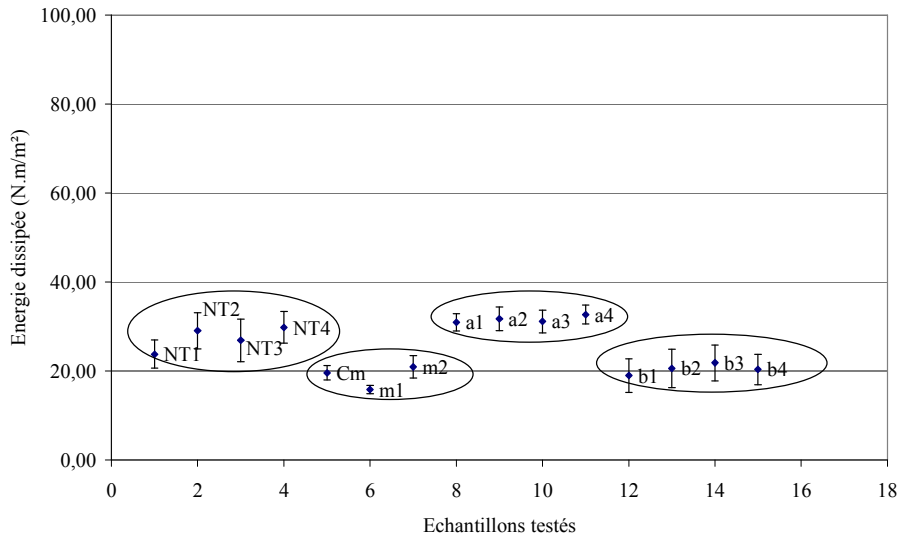


Figure 271. Energie dissipée lors de la compression

VII.3.2. Compression sur cinq cycles

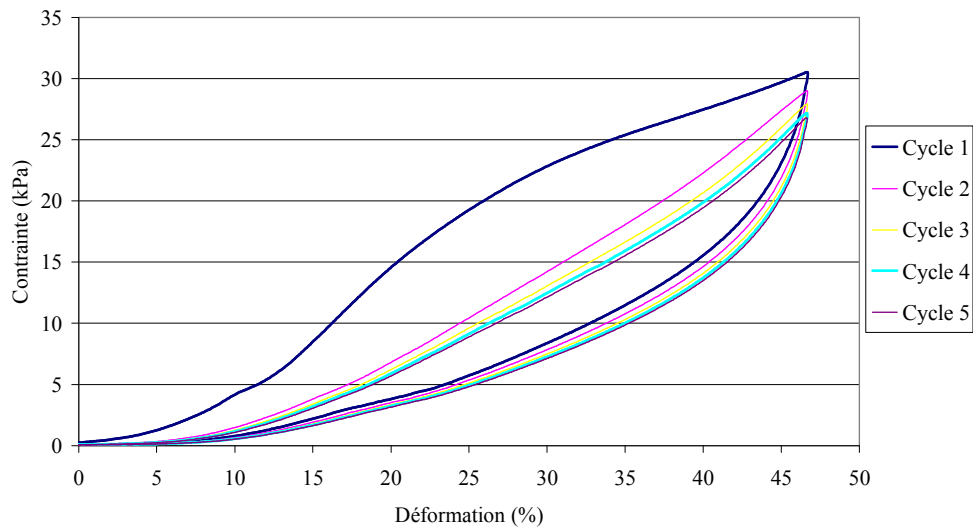


Figure 272. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT2

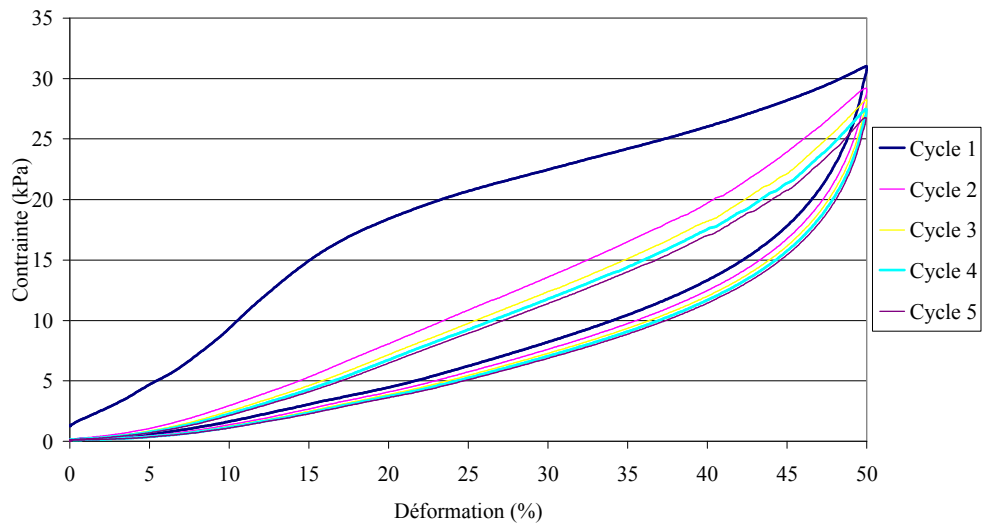


Figure 273. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT3

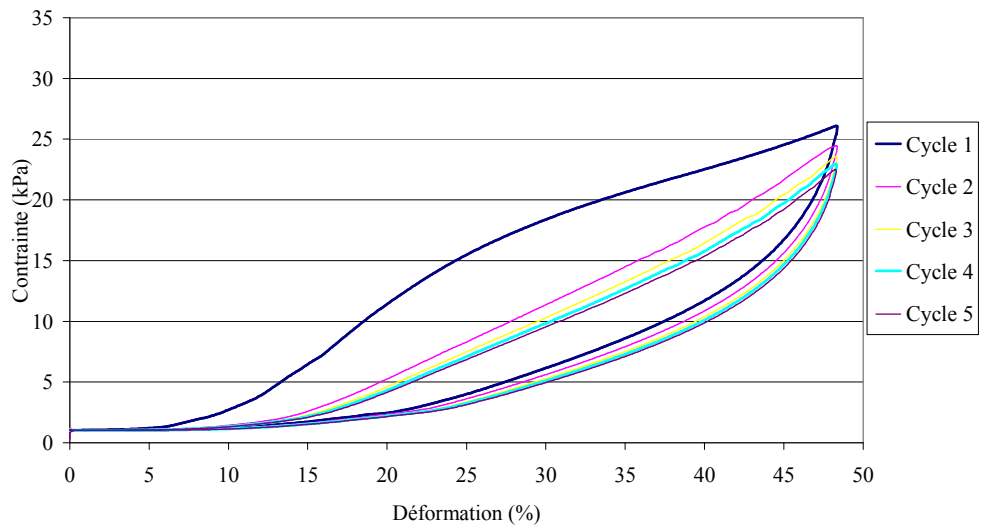


Figure 274. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D mono couche NT4

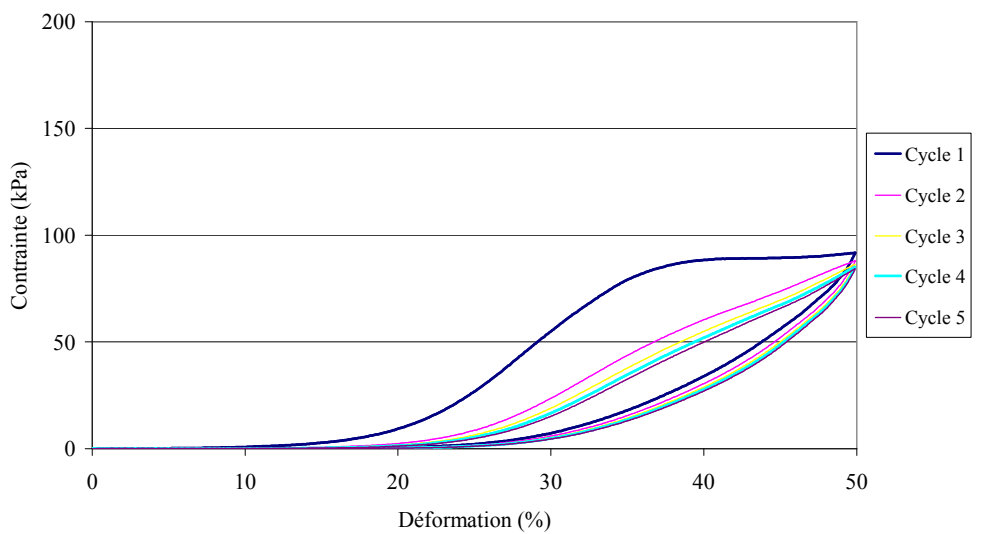


Figure 275. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a2

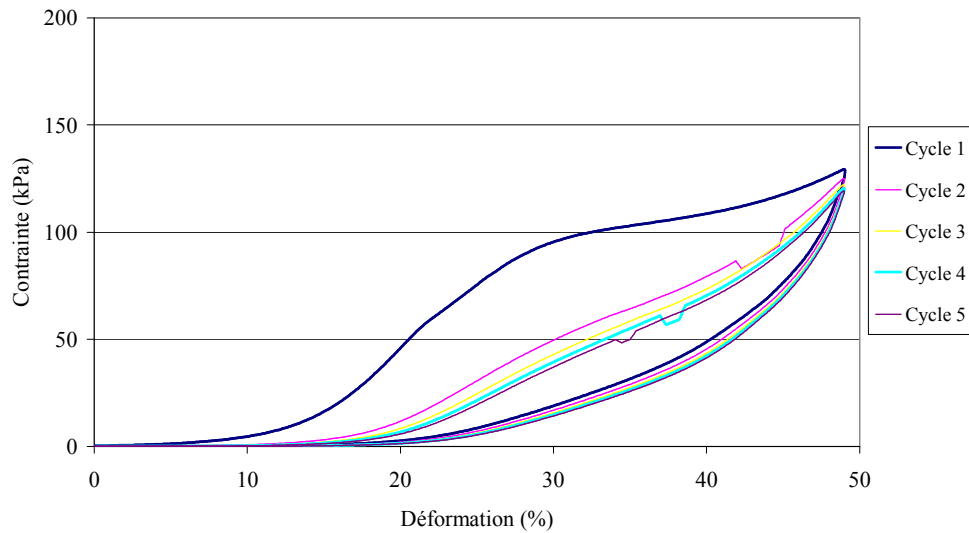


Figure 276. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a3

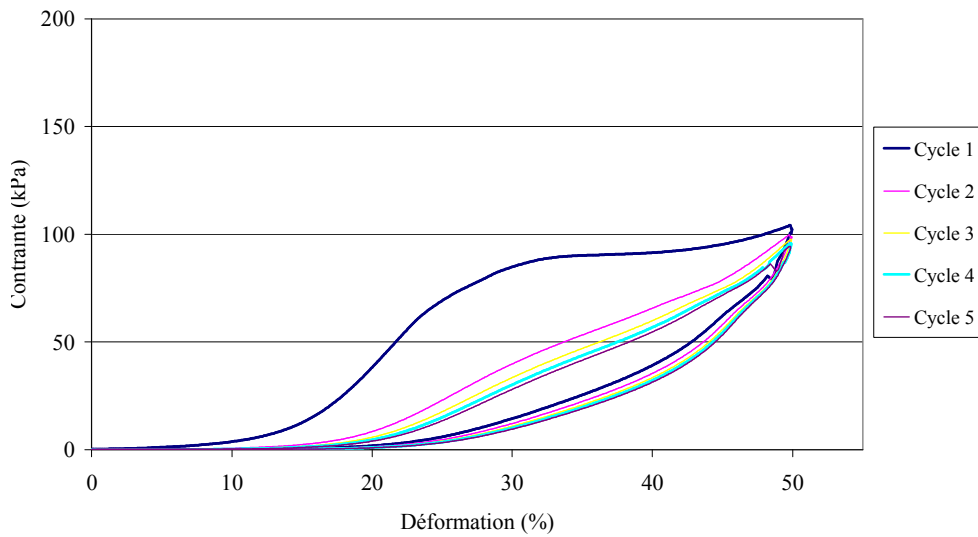


Figure 277. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche a4

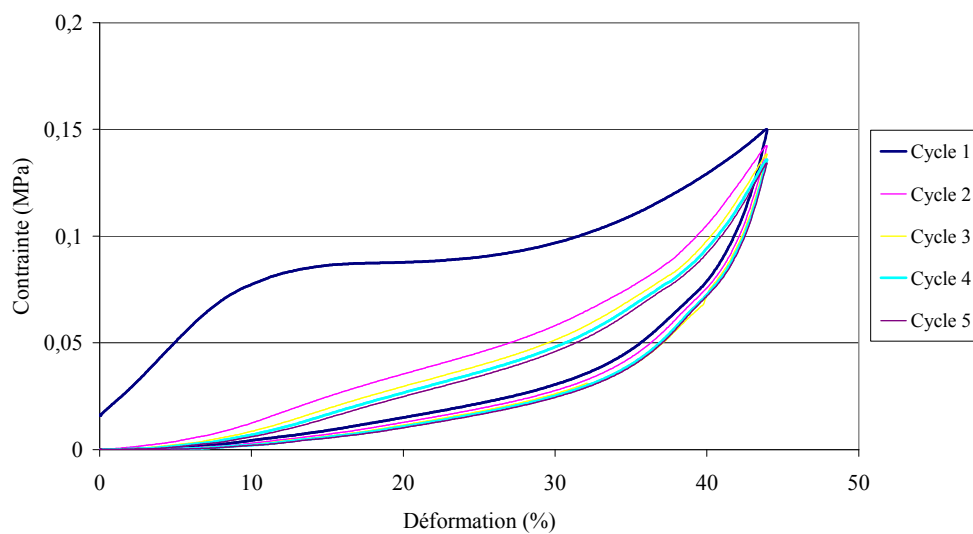


Figure 278. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b2

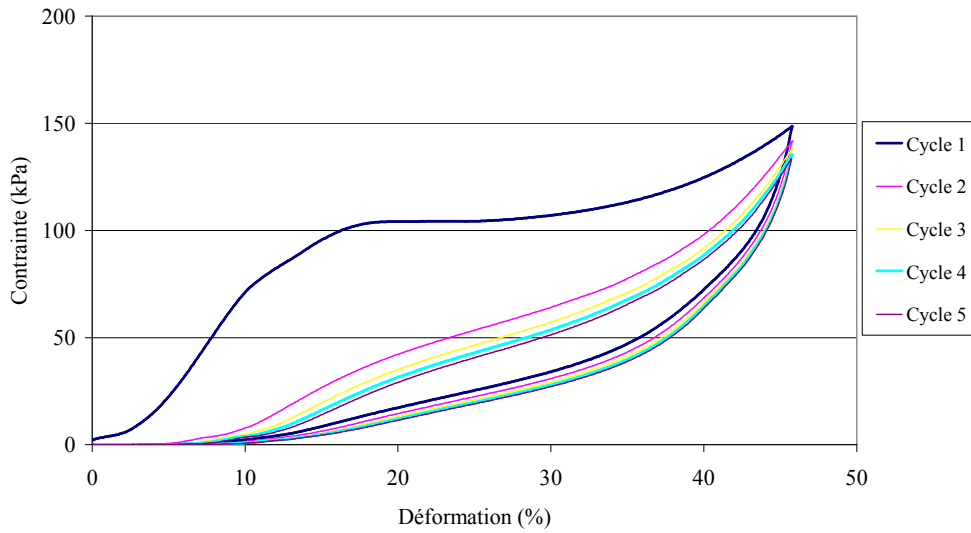


Figure 279. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b3

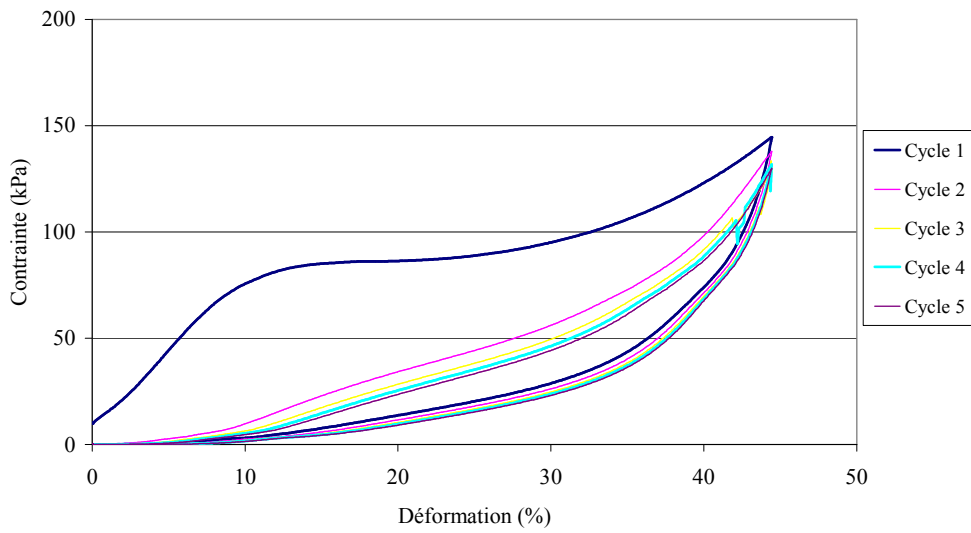


Figure 280. Courbes contrainte déformation du non-tissé 3D multicouche b4

VII.4. Résultats des analyses statistiques

VII.4.1. Analyse en Composantes Principales

Tableau 52. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Energie dissipée	1,00						
Résilience	-0,63	1,00					
Epaisseur	0,86	-0,40	1,00				
Compressibilité	0,08	-0,47	-0,38	1,00			
Masse surfacique	0,43	-0,32	0,54	-0,46	1,00		
Perméabilité à l'air	0,12	0,17	0,40	-0,78	0,72	1,00	
Conductivité thermique	-0,11	0,41	-0,19	0,28	-0,63	-0,52	1,00

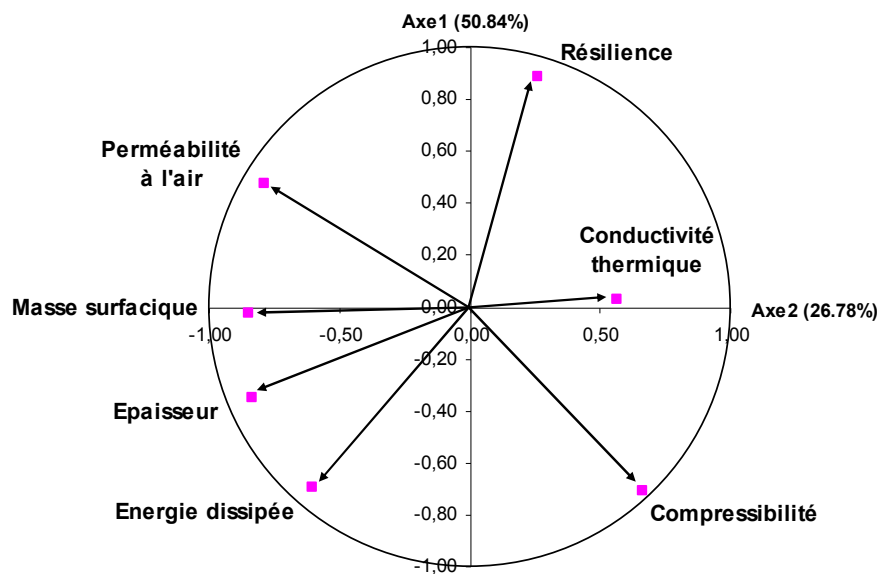


Figure 281. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A2

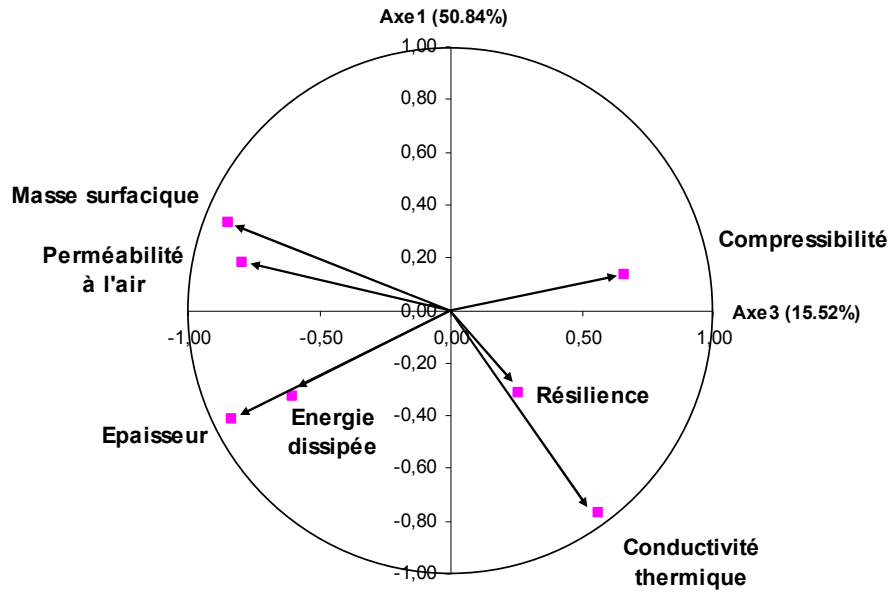


Figure 282. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A3

VII.4.2. Comparaison des variances et des moyennes

VII.4.2.1. Les produits mono couches

Contrainte maximale à un taux de déformation de 50%

NT1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
u(moy)	1	NS	S	S	S
u(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
u(moy)	2		NS	NS	NS
u(var)	Cycle 3			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle 4				NS
u(moy)	4				NS

NT2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
u(moy)	1	NS	S	S	S
u(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
u(moy)	2		NS	NS	NS
u(var)	Cycle 3			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle 4				NS
u(moy)	4				NS

NT3		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
u(moy)	1	NS	NS	NS	S
u(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
u(moy)	2		NS	NS	NS
u(var)	Cycle 3			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle 4				NS
u(moy)	4				NS

NT4		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
u(moy)	1	NS	S	NS	S
u(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
u(moy)	2		NS	NS	NS
u(var)	Cycle 3			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle 4				NS
u(moy)	4				NS

m1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle	NS	NS	NS	NS
u(moy)	1	NS	NS	S	S
u(var)	Cycle		NS	NS	NS
u(moy)	2		NS	NS	NS
u(var)	Cycle			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle				NS
u(moy)	4				NS

m2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle	NS	NS	NS	NS
u(moy)	1	NS	NS	NS	NS
u(var)	Cycle		NS	NS	NS
u(moy)	2		NS	NS	NS
u(var)	Cycle			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle				NS
u(moy)	4				NS

Energie dissipée à un taux de déformation de 50%

NT 1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle	S	S	S	S
u(moy)	1	S	S	S	S
u(var)	Cycle		S	S	S
u(moy)	2		S	S	S
u(var)	Cycle			NS	NS
u(moy)	3			NS	S
u(var)	Cycle				NS
u(moy)	4				NS

NT 2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle	S	S	S	S
u(moy)	1	S	S	S	S
u(var)	Cycle		S	S	S
u(moy)	2		S	S	S
u(var)	Cycle			S	S
u(moy)	3			S	S
u(var)	Cycle				S
u(moy)	4				S

NT 3		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle	S	S	S	S
u(moy)	1	S	S	S	S
u(var)	Cycle		S	S	S
u(moy)	2		S	S	S
u(var)	Cycle			S	S
u(moy)	3			S	S
u(var)	Cycle				NS
u(moy)	4				NS

NT 4		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle	S	S	S	S
u(moy)	1	S	S	S	S
u(var)	Cycle		S	S	S
u(moy)	2		S	S	S
u(var)	Cycle			NS	NS
u(moy)	3			NS	NS
u(var)	Cycle				NS
u(moy)	4				NS

m1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	S	S	S	S
u(moy)		S	S	S	S
u(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
u(moy)			S	S	S
u(var)	Cycle 3			NS	NS
u(moy)				S	S
u(var)	Cycle 4				NS
u(moy)					NS

m2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	S	S	S	S
u(moy)		S	S	S	S
u(var)	Cycle 2		NS	S	NS
u(moy)			S	S	S
u(var)	Cycle 3			S	NS
u(moy)				S	NS
u(var)	Cycle 4				S
u(moy)					S

VII.4.2.2. Les produits multicouches

Contrainte maximale à un taux de déformation de 50%

Cm		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
u(moy)		NS	NS	S	S
u(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
u(moy)			NS	NS	NS
u(var)	Cycle 3			NS	NS
u(moy)				NS	NS
u(var)	Cycle 4				NS
u(moy)					NS

a1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

a2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4			NS	NS
t(moy)				NS	NS

a3		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

a4		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4			NS	NS
t(moy)				NS	NS

b1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4			NS	NS
t(moy)				NS	NS

b2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

b3		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

b4		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	NS	NS
t(moy)		NS	NS	NS	NS
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			NS	NS	NS
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

Energie dissipée à un taux de déformation de 50%

Cm		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
u(var)	Cycle 1	S	S	S	S
u(moy)		S	S	S	S
u(var)	Cycle 2		S	S	S
u(moy)			S	S	S
u(var)	Cycle 3			NS	S
u(moy)				NS	S
u(var)	Cycle 4				S
u(moy)					S

a1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		NS	S	S
t(moy)			NS	S	S
F(var)	Cycle 3			NS	S
t(moy)				NS	S
F(var)	Cycle 4				S
t(moy)					S

a2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		S	S	S
t(moy)			S	S	S
F(var)	Cycle 3			S	S
t(moy)				S	S
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

a3		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	S	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		S	S	S
t(moy)			S	S	S
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	NS
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

a4		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	S	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		NS	S	S
t(moy)			S	S	S
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				S	S
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

b1		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	NS	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		NS	NS	S
t(moy)			NS	S	S
F(var)	Cycle 3			NS	S
t(moy)				NS	S
F(var)	Cycle 4				S
t(moy)					S

b2		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	NS	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		NS	S	S
t(moy)			NS	S	S
F(var)	Cycle 3			NS	S
t(moy)				NS	S
F(var)	Cycle 4				S
t(moy)					S

b3		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var)	Cycle 1	S	S	S	S
t(moy)		S	S	S	S
F(var)	Cycle 2		NS	NS	NS
t(moy)			S	S	S
F(var)	Cycle 3			NS	NS
t(moy)				NS	S
F(var)	Cycle 4				NS
t(moy)					NS

b4		Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5
F(var) t(moy)	Cycle 1	NS S	S S	S S	S S
F(var) t(moy)	Cycle 2		S S	S S	S S
F(var) t(moy)	Cycle 3			NS NS	S S
F(var) t(moy)	Cycle 4				S S

ANNEXE VIII : RESULTATS DE LA CAMPAGNE D'ESSAIS N° 4

VIII.1. Caractéristiques mesurées

1. Masse surfacique

Echantillons testés	n	M (g/m²)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	164,00	24,61	15,01	13,63	8,31
Multicouche	15	484,20	46,07	9,52	25,52	5,27

2. Epaisseur

Echantillons testés	n	T₀ (mm)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	6,16	0,22	3,65	0,12	2,02
Multicouche	15	7,46	0,28	3,75	0,15	2,08

3. Taux de compactage

Echantillons testés	n	T_xC (%)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	68,38	1,40	2,05	0,78	1,13
Multicouche	15	78,08	0,49	0,63	0,27	0,35

4. Angle de pli

Echantillons testés	n	θ (°)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	36,87	1,69	4,59	0,94	2,54
Multicouche	15	48,13	11,82	24,55	6,54	13,60

5. Irrégularité du non-tissé 3D monocouche

n	I (%)	écart-type	CV%	IC	LPE%
15	10,01	5,02	50,19	2,78	27,80

6. Perméabilité à l'air

Echantillons testés	n	P_{air} (l/m²/s)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	765,67	158,16	20,66	87,60	11,44
Multicouche	15	200,27	27,57	13,77	15,27	7,62

7. Conductivité thermique

Echantillons testés	n	K (W/m.K)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	0,033	0,002	4,35	0,00	2,41
Multicouche	15	0,035	0,003	8,36	0,00	4,63

8. Epaisseur après compression

Echantillons testés	n	T_M (mm)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	4,04	0,97	24,01	0,54	13,30
Multicouche	15	6,03	0,25	4,17	0,14	2,31

9. Compressibilité

Echantillons testés	n	EMC (%)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	35,72	13,63	38,17	7,55	21,14
Multicouche	15	19,20	1,53	7,95	0,85	4,40

10. Energie dissipée

Echantillons testés	n	WC (N.m/m²)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	61,78	11,27	18,24	6,24	10,10
Multicouche	15	50,31	4,68	9,30	2,59	5,15

11. Résilience

Echantillons testés	n	RC (%)	écart-type	CV (%)	IC	LPE%
Monocouche	15	78,91	5,77	7,31	3,19	4,05
Multicouche	15	63,34	2,22	3,50	1,23	1,94

VIII.2. Caractéristiques physiques

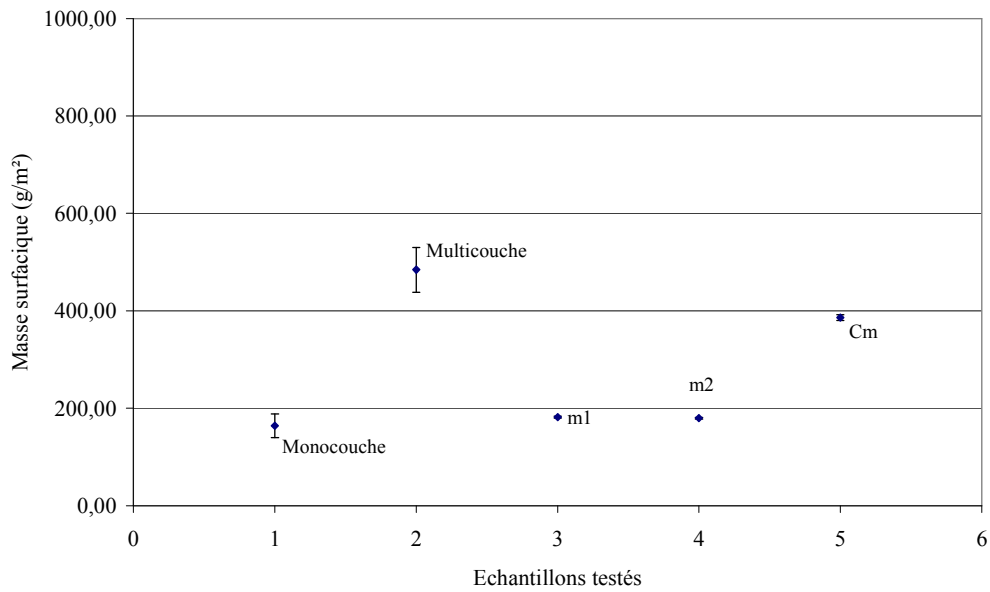


Figure 283. Masse surfacique des produits VERTILAP® et des mousses PU

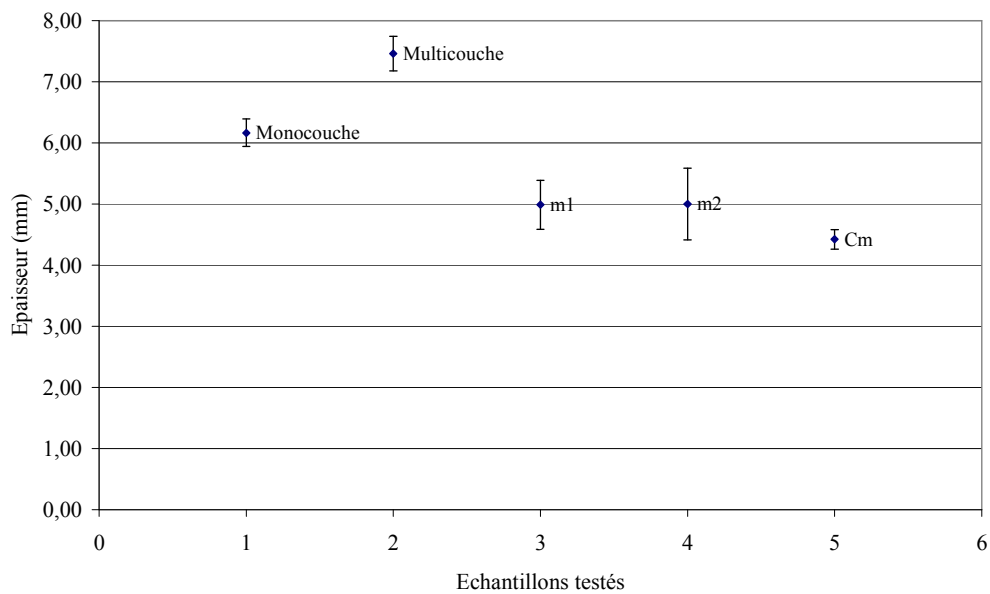


Figure 284. Epaisseur des produits VERTILAP® et des mousses PU

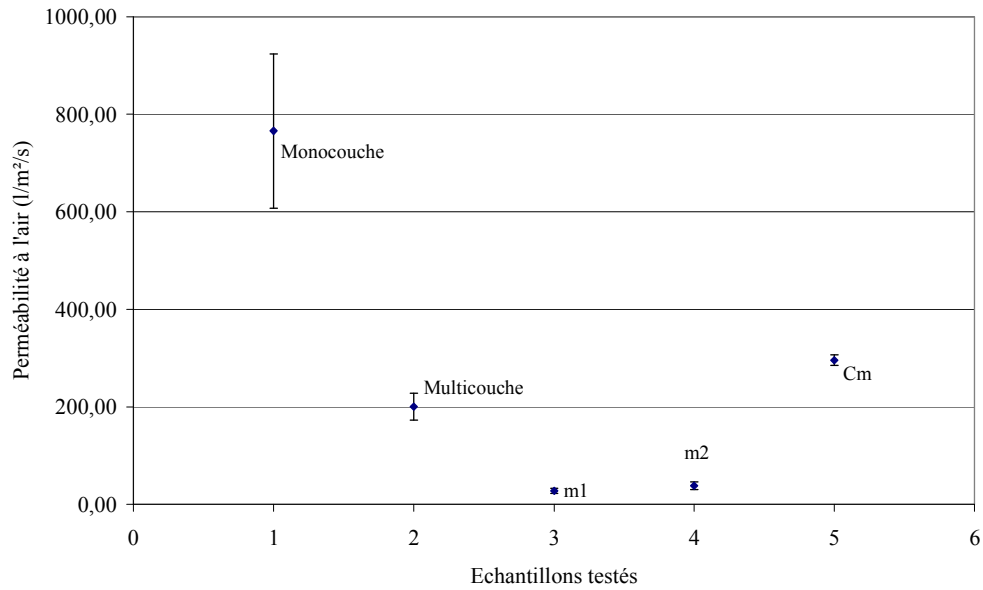


Figure 285. Perméabilité à l'air des produits VERTILAP® et des mousses PU

VIII.3. Caractéristiques mécaniques en compression

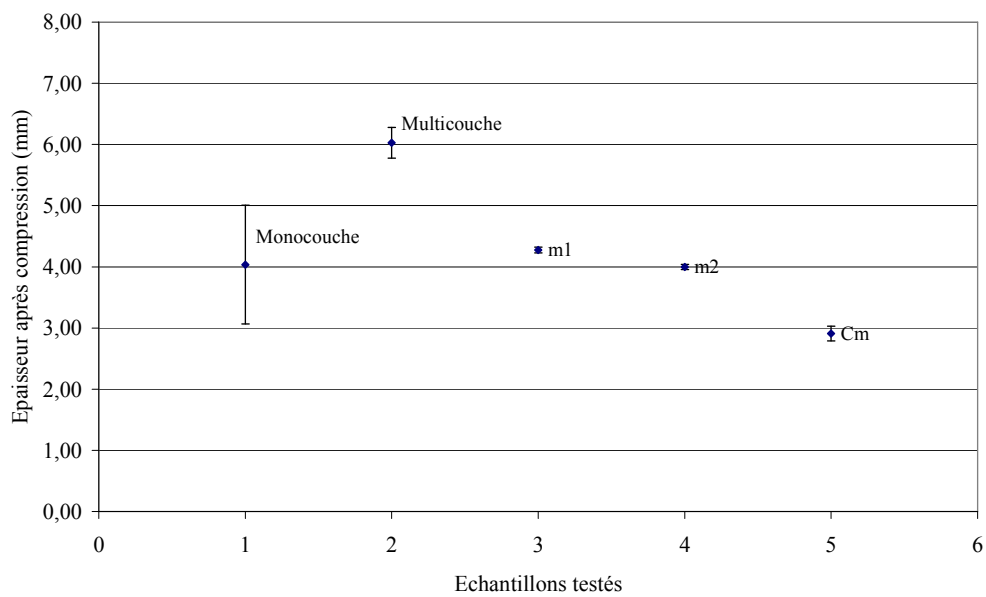


Figure 286. Epaisseur après compression des produits VERTILAP® et des mousses PU

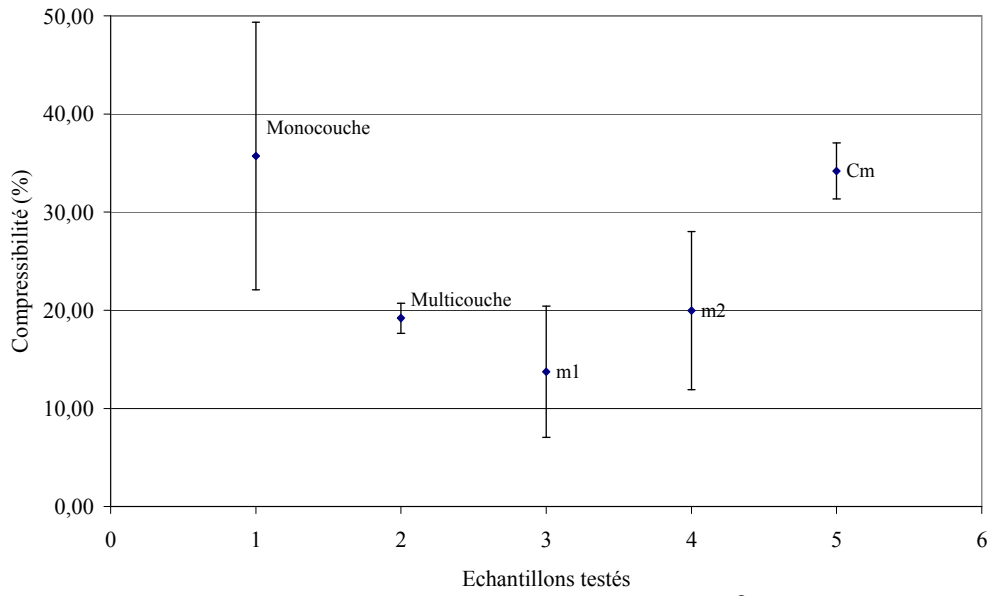


Figure 287. Compressibilité des produits VERTILAP® et des mousses PU

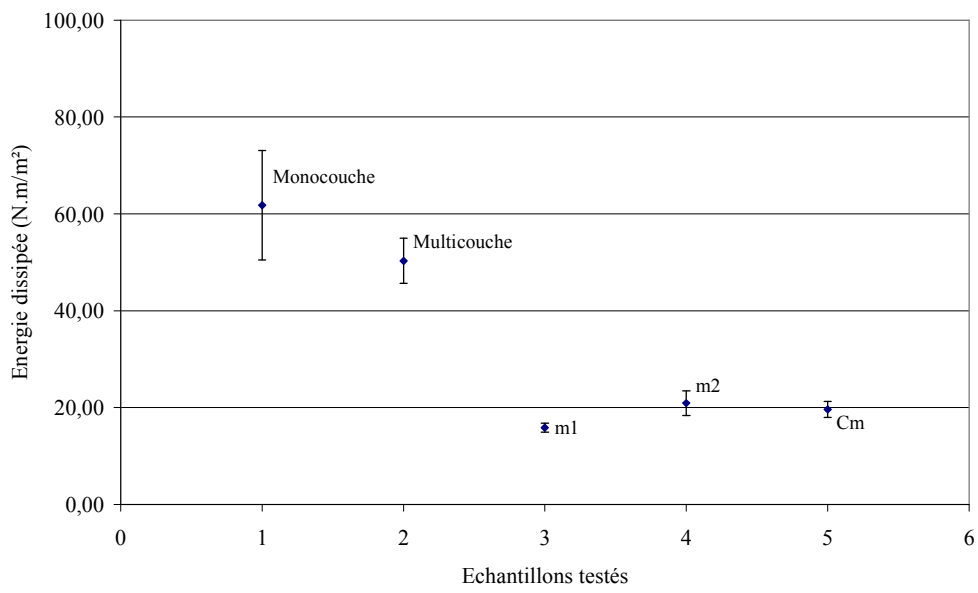


Figure 288. Energie dissipée des produits VERTILAP® et des mousses PU

VIII.4. Résultats des analyses statistiques

VIII.4.1. Comparaison des variances et des moyennes

<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">M</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						M		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	S	S	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		S	S	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">T₀</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>NS</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						T₀		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	NS	S	S	NS	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		NS	S	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S
M		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		S	S	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
T₀		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	NS	S	S	NS																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		NS	S	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">P_{air}</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						P_{air}		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	S	S	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		S	S	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">K</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>NS</td> <td>NS</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						K		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	S	NS	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		NS	NS	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S
P_{air}		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		S	S	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
K		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	S	NS	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		NS	NS	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">T_M</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						T_M		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	S	S	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		S	S	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">EMC</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						EMC		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	S	S	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		S	S	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S
T_M		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		S	S	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
EMC		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		S	S	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">WC</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						WC		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	S	S	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		S	S	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">RC</th> <th>Multi couche</th> <th>Cm</th> <th>m1</th> <th>m2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F (var)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Mono couche</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>F (var)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>NS</td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>t (moy)</td> <td>Multi couche</td> <td></td> <td>S</td> <td>S</td> <td>S</td> </tr> </tbody> </table>						RC		Multi couche	Cm	m1	m2	F (var)	Mono couche	S	NS	S	S	t (moy)	Mono couche	S	S	S	S	F (var)	Multi couche		S	NS	S	t (moy)	Multi couche		S	S	S
WC		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		S	S	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		
RC		Multi couche	Cm	m1	m2																																																																		
F (var)	Mono couche	S	NS	S	S																																																																		
t (moy)	Mono couche	S	S	S	S																																																																		
F (var)	Multi couche		S	NS	S																																																																		
t (moy)	Multi couche		S	S	S																																																																		

VIII.4.2. Analyse en Composantes Principales

Tableau 53. Coefficients de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression

	Energie dissipée	Résilience	Epaisseur	Compressibilité	Masse surfacique	Perméabilité à l'air	Conductivité thermique
Energie dissipée	1,00						
Résilience	-0,44	1,00					
Epaisseur	0,80	-0,38	1,00				
Compressibilité	0,26	-0,27	-0,36	1,00			
Masse surfacique	0,03	-0,91	0,08	0,13	1,00		
Perméabilité à l'air	0,82	0,09	0,53	0,31	-0,50	1,00	
Conductivité thermique	-0,26	0,46	-0,07	-0,32	-0,41	0,12	1,00

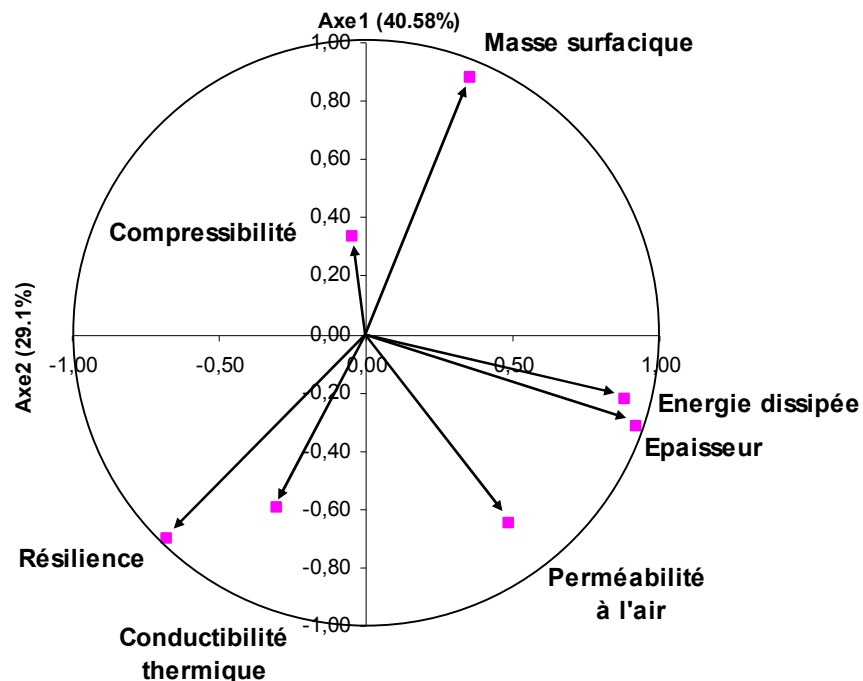


Figure 289. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A2

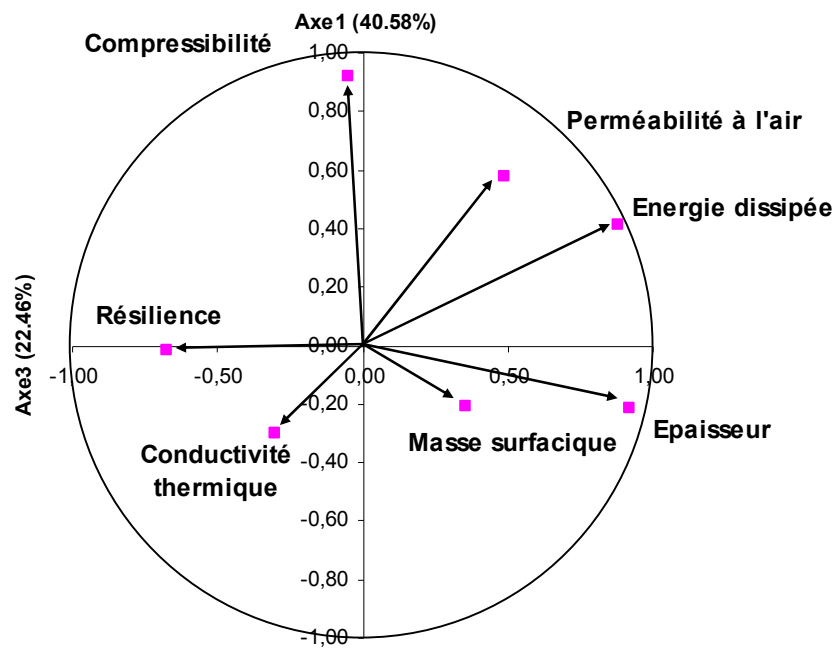


Figure 290. Cercle de corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques en compression suivant les axes A1A3