

Formage Sous Vide de Renforts Textiles de Carbone et de Verre pour Fabrication de Pièces Composites pour l'Aérospatiale

par

Sébastien Gagné

Thèse soumise dans le cadre
des exigences du programme de
Maîtrise en Sciences Appliquées en
Matériaux Avancés et Fabrication

Département de Génie Mécanique
Faculté de Génie
Université d'Ottawa

© Sébastien Gagné, Ottawa, Canada, 2017

Résumé

Ce travail porte sur les processus de conception et de mise en forme des préformes textiles pour procédés de moulage en phase liquide (LCM), appliqués à la fabrication de pièces non structurales complexes. Les moules pour la fabrication de ces pièces composites ont une géométrie complexe et leur drapage est problématique. Fondamentalement, ce travail vise à prédire et à optimiser le processus de conception et de drapage des préformes. En outre, le travail vise à documenter et à améliorer 1) la sélection du tissu et de son orientation la plus appropriée pour le drapage d'une géométrie donnée et 2) la prédiction des temps de drapage.

Les propriétés des renforts associées au drapage telles que le cisaillement, la flexion, la friction et la stabilité des tissus secs dépendent de la construction des tissus et de la géométrie complexe à draper. Le développement de patrons de découpe inclut la sélection de l'orientation des tissus et le positionnement des coupes et des joints. Malgré toute l'expérience industrielle liée au drapage des préformes, les processus existants pour le développement des patrons de découpe comportent une faible reproductibilité et demeurent basés sur l'expérience de techniciens expérimentés. Avec la compétition en aérospatiale, le partenaire industriel Hutchinson doit développer des méthodes pour formaliser et quantifier la conception de patrons de découpe.

Afin de décrire, formaliser et évaluer le drapage de différents tissus sur des géométries complexes, ce travail propose un premier outil prédictif du drapage permettant d'évaluer le temps de drapage, de permettre la sélection du tissu le plus approprié pour le drapage d'une géométrie, de déterminer l'orientation des fibres

préférable ainsi que la position des coupes et des joints dans le patron de découpe. Ce travail inclut une caractérisation de 4 tissus secs utilisés en production chez Hutchinson. Des outils de caractérisation portatifs ont été développés afin de permettre l'évaluation rapide du cisaillement dans le plan, du retour élastique en cisaillement, du retour élastique en flexion dans un coin et sur les bords, de la friction entre les plis et avec le moule, de l'effilochement, ainsi que de la résistance des goupilles de localisation. Les essais de caractérisation ont été effectués sur ces équipements portatifs et certains ont été validés par comparaison avec des essais.

À partir de ces caractéristiques de drapage, une méthode d'évaluation du comportement en drapage a été développée permettant de déterminer la façon dont un tissu donné se comporte lorsqu'il est drapé sur des géométries spécifiques. Plusieurs géométries de base ont été repérées sur les moules réels de Hutchinson, permettant la reconstruction d'autres moules par une combinaison de ces géométries de base. Le comportement en drapage pour chaque géométrie de base a été analysé et validé avec des essais expérimentaux directement sur les moules. Le travail de caractérisation et la méthode d'évaluation des géométries de base ont été combinés dans un algorithme empirique permettant d'évaluer la difficulté de drapage d'une géométrie complexe selon le tissu utilisé et son orientation. Des exemples montrent que l'algorithme réussit à atteindre les objectifs liés à l'évaluation des temps de drapage, de la sélection du tissu et de son orientation les plus appropriés en plus de guider le positionnement des coupes et des joints pour le développement des patrons de découpe. Les objectifs d'abaissement, de prédiction des temps de drapage et de détermination de l'emplacement des coupes et des joints dans les patrons ont été atteints.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Professeur François Robitaille, qui m'a soutenu moralement et financièrement tout au long du projet. Dr Robitaille était toujours disponible pour m'aider avec les décisions importantes du projet et a toujours partagé sa grande expertise du domaine. Je tiens aussi à le remercier pour toute la confiance dont il m'a fait part.

Je tiens aussi à remercier Martin Levesque, Directeur R&D chez Hutchinson, sans qui le projet n'aurait jamais eu lieu. Martin m'a donné plusieurs opportunités avec l'entreprise et a toujours cru en mes idées. Il a partagé avec moi sa vision du projet du point de vue industriel, qui a eu un impact majeur sur la direction du projet. Martin m'a fait confiance dès le début du projet et malgré son horaire très chargé, il a su prendre du temps pour discuter avec moi des avenues de développement du projet.

Il est important pour moi de remercier Corentin Rannou, Ingénieur calcul chez Hutchinson, avec qui j'ai développé une complicité incroyable. Corentin était responsable du projet au point de vue de Hutchinson et cette complicité a permis de faciliter nos échanges, ce qui a permis au projet de grandir davantage. La vision analytique de Corentin a permis d'orienter le projet sur des faits scientifiques en plus d'assurer la fonctionnalité du produit final. Corentin possède des capacités très élevées avec Excel, ce qui a facilité le développement de l'outil prédictif.

Dans les derniers mois du projet, j'ai eu la chance de côtoyer Fabien Salles, Spécialiste calcul qui a travaillé sur ce projet et y a apporté une touche unique. Fabien a su prendre en charge plusieurs aspects importants du projet tout en apportant

un point de vue externe favorisant la réussite du projet.

Lors de mon arrivé chez Hutchinson, j'ai fait la connaissance de Bruno Payette, Ingénieur R&D, et Alex Bertrand, Chargé de projets R&D, qui m'ont accueilli à bras ouverts. Bruno m'a tout de suite fait part des problématiques de drapage dans la production chez Hutchinson et il a facilité mon intégration dans l'équipe R&D. Bruno a partagé sa vision du projet et a su apporter des éléments très pertinents pour son amélioration. Bruno est une personne ayant une grande capacité de leadership, et il m'a permis de valider les résultats de ce projet avec des cas réels de production.

Alex Bertrand a travaillé sur les étapes de préformage et de drapage avec les gens de production. Ses connaissances pratiques m'ont été très utiles afin de bien comprendre les problématiques réelles de la production. Alex n'a pas hésité à m'intégrer sur d'autres projets afin d'exploiter les connaissances que j'avais développées sur le drapage de tissus secs. Ayant des loisirs très similaires, Alex a su m'apporter une excellente motivation tout au long du projet.

Je tiens aussi à remercier Jean-Philippe Larose et Antonin Leclair-Maréchal, deux Chargés de projets R&D chez Hutchinson, que j'ai eu la chance de côtoyer. Dès mon arrivée chez Hutchinson, Jean-Philippe m'a présenté son système de gestion pour ces projets, et a intégré mon projet à son plan de gestion. Chaque semaine, Jean-Philippe, Antonin et moi-même faisons le suivi des livrables et des jalons pour tous les projets en lien avec les préformes. Jean-Philippe a su apporter un point vu positif, peu importe la situation. Malgré son horaire très chargé, il a su trouver du temps pour discuter de certains aspects du projet.

Durant mon séjour chez Hutchinson, Antonin m’a intégré à un de ses projets afin que je puisse partager les connaissances que j’avais acquises quant au drapage des préformes. Antonin m’a toujours fait confiance lorsque j’avais quelque chose à proposer. Mon travail avec Antonin m’a permis d’approfondir mes connaissances au niveau des composites en plus de me permettre de valider les théories de drapage que j’avais étudiées.

Je tiens aussi à remercier Franck Guillemard, Youcef Terbouche et Maxime Joanis de m’avoir fait part de leur expertise pratique tout au long du projet. Franck m’a beaucoup aidé grâce à sa très grande expertise de la mise en forme des composites. Il a partagé toutes ses techniques et ses façons de faire pour le drapage des préformes. Youcef m’a aidé avec la partie de la fabrication des outils de caractérisation. Youcef a partagé avec moi sa grande expertise au niveau de l’automatisation, ce qui m’a permis de réaliser des outils de caractérisation conviviaux. Maxime est une personne très analytique et j’ai toujours écouté ses conseils en ce qui concerne le drapage des préformes.

Finalement, je tiens à remercier ma conjointe et ma famille pour leur soutien moral tout au long de mes études, sans lequel je ne serais pas où je suis présentement.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte	1
1.2	Processus de soumission	5
1.3	Processus de développement des patrons	6
1.4	Résumé des chapitres	7
2	Procédé de Hutchinson	10
2.1	Objectifs et restrictions	10
2.1.1	Pièces	12
2.1.2	Préformes	15
2.1.3	Découpe	17
2.1.4	Drapage	18
2.1.5	Fabrication	19
2.1.6	Améliorations	20
3	Revue de Littérature	22
3.1	Renforts	22
3.1.1	Fibre de verre	22
3.1.2	Fibre de carbone	24
3.1.3	Caractérisation d'un renfort	27
3.1.4	Architecture des renforts	31
3.2	Comportement mécanique d'un textile	36
3.2.1	Traction et compression dans le plan	37
3.2.2	Flexion	38
3.2.3	Cisaillement	44
3.2.4	Compaction	55
3.3	Défauts liés au drapage	57
3.3.1	Glissement relatif des plis superposés	57
3.3.2	Défauts résultant d'une tension	58
3.3.3	Distance entre les mèches	60
3.3.4	Petit rayons	61
3.4	Conclusion	62
4	Matériaux et Méthodes	63
4.1	Tissus utilisés	64
4.1.1	Tissu toile de verre style 7500	64
4.1.2	Tissu satin 8 de verre style 7781	64
4.1.3	Tissu sergé de carbone style 1040	65

4.1.4	Tissu satin 5 de carbone style 4540	66
4.2	Étude de comportement du drapage	67
4.2.1	Cisaillement dans le plan	69
4.2.2	Flexion	71
4.2.3	Friction	72
4.2.4	Stabilité	73
4.2.5	Compaction	74
4.3	Outils de caractérisation portatifs	75
4.3.1	Outil de caractérisation axiale	76
4.3.2	Outil de flexion	84
4.3.3	Outil d'effilochement	85
4.4	Procédure des essais de caractérisation	86
4.4.1	Essais avec un cadre articulé	86
4.4.2	Essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale .	90
4.4.3	Retour en cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale .	93
4.4.4	Essais de flexion	95
4.4.5	Essais de friction	97
4.4.6	Stabilité	99
5	Résultats des Essais de Caractérisation des Tissus	106
5.1	Cisaillement	107
5.1.1	Essais avec un cadre articulé	107
5.1.2	Essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale .	111
5.1.3	Retour en cisaillement, essais conduits avec l'outil de caractérisation axiale	115
5.2	Flexion	116
5.3	Friction	118
5.4	Stabilité	124
5.4.1	Effilochement	124
5.4.2	Résistance aux goupilles	125
5.5	Analyse comparative	130
6	Évaluation des Géométries de Base	135
6.1	Géométries de base	136
6.2	Décomposition	140
6.3	Caractérisation	142
6.3.1	Évaluation du cisaillement des géométries de base	143
6.3.2	Évaluation de la flexion sur les géométries de base	145
6.3.3	Procédures	146
6.4	Résultats	151
7	Outil Prédictif du Drapage	156
7.1	Contexte	156
7.1.1	Logiciels de dépliage 2D actuels	156
7.1.2	Outil de prédiction du drapage	157
7.2	Algorithme général	165
7.3	Formules mathématiques et hypothèses	168
7.3.1	Difficultés locales	168
7.3.2	Difficultés des liens géométriques	171

7.3.3	Difficultés globales	174
7.4	Construction du chiffier	177
7.4.1	Vue d'ensemble	177
7.4.2	Données d'entrée	181
7.4.3	Calculs des difficultés	184
7.4.4	Section résultats	187
7.5	Processus d'itération des coefficients	190
7.6	Résultats	198
8	Conclusion et Travaux Futurs	201
8.1	Travaux Futurs	202
	Appendices	205
A	Fiches Techniques	206
A.1	Tissu toile de verre style 7500	207
A.2	Tissu satin 8 de verre style 7781	208
A.3	Tissu sergé de carbone style 1040	209
A.4	Tissu satin 5 carbone style 4540 poudré époxy	213
B	Essais préliminaires	214
B.1	Essais préliminaires, friction	214
C	Détails des moules chez Hutchinson	217
D	Décomposition des moules chez Hutchinson	228
E	Programmation Macro	240
E.1	Bouton pour réinitialisation	241
E.2	Calcul des difficultés	242
E.3	Bouton pour les liens	243
E.4	Bouton pour supprimer	244
E.5	Bouton pour cocher la liaison	245
E.6	Illustration du graphique des difficultés	246
E.7	Longueur des coupes	247
E.8	Clique pour la longueur des coupes	248
E.9	Tailles des points pour graphique	249

Liste des figures

1.1	Exemple d'une pièce complexe pour la fabrication d'un cockpit . . .	2
1.2	Exemple du processus de développement d'un patron pour une pièce complexe	6
2.1	Zone de surépaisseur	13
2.2	Types de joints entre patrons	17
3.1	Procédé de fabrication de la fibre de verre [2]	24
3.2	Procédé de fabrication de la fibre de carbone [2]	25
3.3	Types de mèches pour renfort	26
3.4	Mesure du facteur de couverture	28
3.5	Illustration des chaines et des trames dans un tissu	32
3.6	Configuration d'un tissu unidirectionnel	33
3.7	Configuration d'un tissu toile	34
3.8	Configuration d'un tissu sergé 2 x 1	35
3.9	Configuration d'un tissu satin 4 x 1	36
3.10	Force de traction dans un tissu	38
3.11	Essai de flexion en porte-à-faux [16]	39
3.12	Principe du fonctionnement pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]	39
3.13	Exemples de longueurs différentes de tissu libres durant l'essai de flexion en porte-à-faux [17]	41
3.14	Exemples de courbes résultant de l'essai de flexion en porte-à-faux [17]	41
3.15	Calcul du moment de flexion et de courbure pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]	42
3.16	Courbes de l'évolution du moment de flexion en fonction de la courbure pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]	43
3.17	Rigidité en flexion en fonction de la longueur pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]	43
3.18	Force de cisaillement appliquée à un tissu	45
3.19	Détails du cadre articulé [12]	46
3.20	Élongation du cadre articulé [12, 13]	47
3.21	Montage amplificateur pour l'essai de cisaillement avec cadre articulé [17]	48
3.22	Surface cisailée lors d'un essai de cisaillement [14]	49
3.23	Exemples de résultats d'essais effectués avec un cadre articulé [14] .	50
3.24	Concept de l'essai de traction en biais pour l'évaluation du cisaillement [16]	51

3.25	Exemples de résultats des essais de cisaillement avec l'essai de traction en biais [14]	53
3.26	Comparaison pour les deux méthodes disponibles pour l'évaluation du cisaillement [15]	54
3.27	Force de compaction sur un tissu	55
3.28	Fraction volumique de fibre en fonction des cycles de compaction [6]	56
3.29	Glissement relatif des plis de tissus dans les coins d'une préforme	58
3.30	Défauts dus à une force de tension appliquée sur une préforme	59
3.31	Flambement dans les tissus d'une préforme	60
3.32	Ouverture dans un tissu dû au cisaillement	61
3.33	Déplacement d'une mèche	61
4.1	Tissu toile de verre style 7500	64
4.2	Tissu satin 8 de verre 7781	65
4.3	Tissu sergé de carbone style 1040	66
4.4	Tissu satin 5 carbone 4540	67
4.5	Pièces choisies pour l'analyse du drapage	69
4.6	Cisaillement localisé sur 2 pièces analysées	70
4.7	Flexion de différentes courbures sur le moule M04603	72
4.8	Présence d'effilochement et de glissement sur les pièces analysées	74
4.9	Outil portatif de caractérisation axiale	77
4.10	Concept général	78
4.11	Mécanismes pour l'outil de caractérisation axiale	79
4.12	Configuration 1 : Pinces de serrage de chaque côté	80
4.13	Configuration 2 : Pinces de serrage du côté fixe et goupille du côté mobile	80
4.14	Configuration 3 : Ajout du bloc de friction au centre et pince de serrage du côté mobile	81
4.15	Assemblage, configuration 1	82
4.16	Assemblage, configuration 2	82
4.17	Assemblage, configuration 3	83
4.18	Concept de l'outil de flexion	85
4.19	Conception de l'outil d'effilochement	86
4.20	Fonctionnement du cadre articulé	87
4.21	Dimension des échantillons pour le cadre articulé	88
4.22	Représentation géométrique du cadre articulé [9]	89
4.23	Dimensions des échantillons de cisaillement	91
4.24	Montage du tissu pour l'essai en cisaillement	92
4.25	Mesure de la distance pour une force de cisaillement donnée	93
4.26	Montage du tissu pour le retour en cisaillement	94
4.27	Partie femelle de l'outil de flexion	95
4.28	Partie femelle de l'outil de flexion, avec tissu	96
4.29	Fermeture de l'outil de flexion	96
4.30	Mesure du retour élastique dans le coin inférieur	97
4.31	Mesure du retour élastique sur le bord opposé à la fixation	97
4.32	Dimensions des échantillons de friction	98
4.33	Dimensions des échantillons pour les essais d'effilochement	100
4.34	Initialisation pour les essais d'effilochement	101

4.35	Mesure de l'aire initiale sans effilochement	101
4.36	Mesure de la surface finale avec effilochement	102
4.37	Dimensions des échantillons pour essais de résistance aux goupilles .	103
4.38	Installation du tissu pour les essais de résistance aux goupilles . . .	104
4.39	Résultat d'un essai de résistance aux goupilles	105
5.1	Essais de cisaillement avec cadre articulé, 1 pli et 4 plis, tissu toile de verre style 7500	108
5.2	Essais de cisaillement avec cadre articulé, 1 pli et 4 plis, satin 8 de verre style 7781	108
5.3	Essais de cisaillement avec cadre articulé, 1 pli et 4 plis, sergé de carbone style 1040	109
5.4	Essais de cisaillement avec cadre articulé, tissu toile de verre style 7500, satin 8 de verre style 7781, sergé de carbone style 1040, 1 pli .	110
5.5	Essais de cisaillement avec cadre articulé, tissu toile de verre style 7500, satin 8 de verre style 7781, sergé de carbone style 1040, 4 plis	111
5.6	Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu toile de verre style 7500 . . .	113
5.7	Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu satin 8 de verre style 7781 . .	114
5.8	Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu sergé de carbone style 1040 .	114
5.9	Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu satin 5 de carbone poudré époxy style 4540	115
5.10	Essai de flexion avec le tissu satin 5 carbone style 4540	117
5.11	Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu toile de verre style 7500	119
5.12	Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu satin 8 de verre style 7781	119
5.13	Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu sergé de carbone style 1040	120
5.14	Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu satin 5 de carbone poudré époxy style 4540	120
5.15	Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu toile de verre style 7500	121
5.16	Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu satin 8 de verre style 7781	121
5.17	Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu sergé de carbone style 1040	122
5.18	Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu satin 5 de carbone poudré époxy style 4540	122
5.19	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7500 orienté à 0/90°	126
5.20	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7781 orienté à 0/90°	126
5.21	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu sergé de carbone style 1040 orienté à 0/90°	127

5.22	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu satin 5 carbone style 4540 orienté à $0/90^\circ$	127
5.23	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7500 orienté à $+/-45^\circ$	128
5.24	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7781 orienté à $+/-45^\circ$	128
5.25	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu sergé de carbone style 1040 orienté à $+/-45^\circ$	129
5.26	Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu satin 5 carbone style 4540 orienté à $+/-45^\circ$	129
5.27	Résumé des caractérisations des tissus	131
6.1	Première série des géométries des moules étudiés chez Hutchinson (dimensions en mm)	136
6.2	Deuxième série des géométries des moules étudiés chez Hutchinson (dimensions en mm)	137
6.3	Énumération des géométries de base et paramètres définissant chacune	138
6.4	Décomposition du moule M04603	141
6.5	Décomposition sur le fichier CAO pour le moule M04603	142
6.6	Tissu quadrillé	144
6.7	Outil de mesure pour la flexion des géométries de base	145
6.8	Zones de caractérisation pour chaque géométrie de base	149
6.9	Mesure du cisaillement dans les moules	150
6.10	Caractérisation d'une géométrie de base en flexion	150
7.1	Utilité de l'outil de prédiction du drapage	158
7.2	Étapes pour l'utilisation de l'outil de prédiction du drapage	161
7.3	Fonctionnement de l'outil prédictif	164
7.4	Décomposition du moule M02772 en géométries de base	165
7.5	Identification des géométries de base du moule M02772	166
7.6	Quantification des géométries de base sur le moule M02772	167
7.7	Détermination de l'angle pour l'équation des liens	173
7.8	Vue d'ensemble de la section des données d'entrées de l'outil prédictif	180
7.9	Vue d'ensemble de la section résultats de l'outil prédictif	181
7.10	Exemple de l'entrée des géométries de base dans l'outil pour le moule M02772	183
7.11	Exemple simplifié du calcul pour une géométrie de base	185
7.12	Exemple de la section calcul des géométries de base pour le moule moule M02772	186
7.13	Exemple de résultats pour les géométries de base du moule M02772	187
7.14	Exemple du résultats graphique provenant de l'outil prédictif pour le moule M02772	189
7.15	Simplification des paramètres pour l'optimisation	192
7.16	Courbes pour la détermination des paramètres g_2 et g_4	194
7.17	Courbes des résultats de g_4 en fonction de g_2 avec interpolations linéaires	195
7.18	Représentation du parcours de la programmation macro Excel . . .	197

8.1	Vision long terme de l'outil prédictif	204
B.1	Essais pour le réglage des paramètres pour la friction	216

Liste des tableaux

3.1	Propriétés mécaniques de mèches de fibres de carbone	27
3.2	Comparaison entre les tissus Toile, Serge et Satin	36
4.1	Paramètres de la machine Instron 4482	89
5.1	Résultats des essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation axiale	113
5.2	Résultats des essais de retour en cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation axiale	116
5.3	Résultats des essais de flexion conduits avec l'outil de flexion	118
5.4	Résultats des essais de friction conduits avec l'outil de caractérisation axiale	123
5.5	Résultats des essais d'effilochement	125
5.6	Résultat Goupilles	130
5.7	Tableau résumé de la drapabilité avec valeurs quantifiés	132
5.8	Tableau résumé de la drapabilité sur une échelle de 1 à 10	134
6.1	Tableau pour la caractérisation des géométries de base	148
6.2	Résultats de caractérisation des géométries de base pour les coins extérieurs et coins intérieurs doubles	153
6.3	Résultats de caractérisation des géométries de base pour les coins extérieurs et coins intérieurs simples	154
6.4	Résultats de caractérisation des géométries de base pour les cylindre intérieurs et les coins extérieurs & intérieurs double	155
7.1	Sélection des données d'entrées pour le moule M02772	182
7.2	Cas simplifié	191
7.3	Résultats partiels de la programmation macro Excel pour le moule M04630	193
7.4	Résultats partiels de la macro pour recherche de solution	196
7.5	Sélection du couple g_2 et g_4	198
7.6	Résultats des temps de drapage estimé	198

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte

Les aspects du processus de soumission pour contrats liés au préformage et au drapage des tissus secs pour la fabrication de pièces composites comportent beaucoup d'incertitude et requierent beaucoup de temps. Le développement de méthodes et d'outils permettant de comprendre et de prédire le comportement des tissus secs lors du drapage, qui est entrepris dans cette thèse, vise à faciliter une sélection appropriée des matériaux ainsi qu'une diminution de l'incertitude et du temps requis lors du processus de soumission. La Figure 1.1 montre un exemple d'une pièce complexe servant de support pour des instruments dans le cockpit.



FIGURE 1.1 – Exemple d’une pièce complexe pour la fabrication d’un cockpit

Le projet vise à développer un outil numérique permettant de prédire le comportement du drapage des tissus secs, et de prédire les coûts associés à une demande de soumission (RFQ/RFI -Request For Quote/Information). Cet outil numérique doit faciliter le développement des patrons constituant une préforme en sélectionnant automatiquement le meilleur tissu et son orientation de fibres préférable, la localisation des coupes, des joints et des goupilles, le tout selon la géométrie complexe à draper.

Le fonctionnement de l’outil numérique implique une décomposition de la géométrie complexe à draper en géométries de base, ainsi que la consultation de bases de données de comportement des tissus et de drapage des géométries de base. Un inventaires de géométries de base a été identifié directement sur les moules et pièces de Hutchinson Aerospace & Industry Inc, afin d’assurer que n’importe quelle pièce puisse être reconstituée à partir de ces géométries. Chaque géométrie

complexe à draper peut être décomposée en une série de ces géométries de base. La base de données tissus documente une caractérisation complète pour le drapage afin d'évaluer la capacité des tissus selon leur comportement en cisaillement dans le plan, flexion, friction et stabilité. La base de données de drapage des géométries de base documente une caractérisation complète des résultats du drapage sur ces géométries, afin d'évaluer la difficulté de draper ces géométries de base pour plusieurs cas. Un chiffrier qui interroge ces bases de données à partir de la décomposition manuelle d'une géométrie complexe en géométries de base, associe le comportement de chaque tissu à la difficulté à draper de chaque géométrie de base, permettant de maximiser le drapage de la géométrie complexe.

L'utilisateur du chiffrier doit tout d'abord décomposer la géométrie complexe en géométries de base, en indiquant l'épaisseur nécessaire pour le composite final. Le nombre de plis à utiliser est déterminé selon l'épaisseur nécessaire pour le composite résultant ainsi que les propriétés mécaniques. Ensuite, l'utilisateur doit quantifier chaque géométrie de base selon certains paramètres géométriques prédéterminés qui influencent le drapage. Les positions en x, y et z ainsi que l'orientation de chaque géométrie de base dans la géométrie complexe doivent aussi être quantifiés. Une fois la quantification des géométries de base effectuée, le chiffrier va interagir avec les deux bases de données. Le chiffrier compare la difficulté de drapage de chaque géométrie de base avec les capacités de chaque tissu. L'influence progressive du drapage entre les géométries de base est aussi quantifiée selon le drapage de chaque géométrie et la position relative de ces géométries. Le chiffrier permet donc de dire, pour chaque tissu, s'il est possible de draper les géométries de base en fonction des caractéristiques et du point de départ du drapage.

Le chiffrier doit permettre donc de déterminer la position des coupes en fonction du tissu utilisé, en comparant le cisaillement induit dans les géométries de base ainsi que la capacité en cisaillement de chaque tissu. De même, les joints entre les patrons doivent être positionnés en fonction de l'interaction entre les géométries. La continuité de la préforme doit être interrompue lorsque le cisaillement devient trop élevé afin de faciliter le drapage. Le positionnement des goupilles qui localise les patrons du moule à draper est effectué manuellement, selon les résultats provenant du chiffrier, basés sur le comportement des tissus sur les géométries de base ainsi que sur l'orientation des fibres ; deux goupilles ne peuvent pas se retrouver aux extrémités d'une même mèche. La friction ainsi que la stabilité du drapage sont deux caractéristiques détaillées dans la thèse et évaluées en termes de facteurs globaux influençant la difficulté du drapage. L'influence de ces facteurs globaux dépendent du nombre de géométries de base ainsi que de la difficulté associée à ceux-ci. Pour chacune des géométries de base, une orientation des fibres préférable pour le drapage est déterminée. Une moyenne des difficultés de drapage selon l'orientation est calculée sur la géométrie complexe et l'orientation ayant la plus petite difficulté est choisie. Les temps de préformage et de drapage sont calculés selon la difficulté de chaque géométrie de base.

Le chiffrier est un outil de support pour les soumissions pour le préformage et le drapage. Une note est attribuée à chaque tissu pour la difficulté liée au drapage. La sélection du tissu à utiliser pour une pièce donnée est effectuée selon les qualifications et les restrictions mécaniques requises de la pièce, et ensuite selon la facilité de drapage. Le tissu ayant la meilleure note sera le tissu le plus facile à draper pour la géométrie donnée.

1.2 Processus de soumission

Lors du processus de soumission pour la fabrication de pièces composite, deux situations peuvent se produire. Dans la première situation, le client fournit un rendu de l'apparence de la pièce à produire. Dans la deuxième situation, un fichier géométrique de conception assistée par ordinateur (CAO) de la pièce est reçu directement du client. Dans les deux situations, le processus de soumission doit être rapide et le plus exact possible. La soumission a un grand impact sur l'obtention de nouveaux contrats. Le travail entrepris dans le cadre de cette thèse doit avoir un impact positif sur certaines étapes du processus de soumission, soit la réduction des frais d'ingénierie pour le développement des patrons, des frais concernant les temps de préformage et drapage, ainsi que des coûts des matériaux. Plus spécifiquement, ceci inclus les temps pour la découpe des tissus, pour le transport des tissus de la salle de découpe à la salle d'infusion, le drapage des préformes, le positionnement du tissu d'arrachage, du medium d'infusion et de la membrane, en plus de l'infusion. Hormis le travail effectué pour la soumission, aucun autre travail n'est entrepris avant la confirmation de la réception du contrat.

Le processus de soumission actuel considère d'abord les requis mécaniques et est fortement basé sur l'expérience des pièces actuellement produites chez Hutchinson, par comparaison. L'ingénieur analyse le rendu ou le fichier CAO selon la surface de la pièce, tout en considérant les zones qui lui semblent complexe. Généralement, l'ingénieur demande l'avis d'un technicien expérimenté en fabrication de composites afin d'établir une estimation des temps plus juste. Le processus de soumission nécessite donc une solide expertise des processus de préformage et drapage. Dans

le cas où le temps de soumission est légèrement supérieur au temps de fabrication réel, l'ingénieur va effectuer une microanalyse sur chaque tâche du processus de fabrication pour des pièces similaires afin de comprendre d'où vient cet écart. Cette microanalyse inclut le prix des matériaux, des moules et des consommables.

1.3 Processus de développement des patrons

Aucun développement de patrons n'est effectué lors du processus de soumission. Une fois le contrat signé, le processus d'ingénierie peut commencer. Les premières itérations de patrons sont développées à partir des fichiers CAO décrivant les moules. Présentement, les patrons sont développés dans Wrapstyler, un logiciel conçu pour le drapage du cuir et permettant de mettre à plat efficacement une géométrie 3D pour la découpe des patrons. Ce logiciel permet de localiser les zones où on peut attendre des déformations importantes, et où il serait potentiellement utile de positionner une coupe. Les coupes sont donc positionnées dans ces zones, avec des longueurs de coupe basées sur l'expérience de l'ingénieur. La Figure 1.2 montre un exemple de dépliage d'une géométrie 3D en 2D sur Wrapstyler.

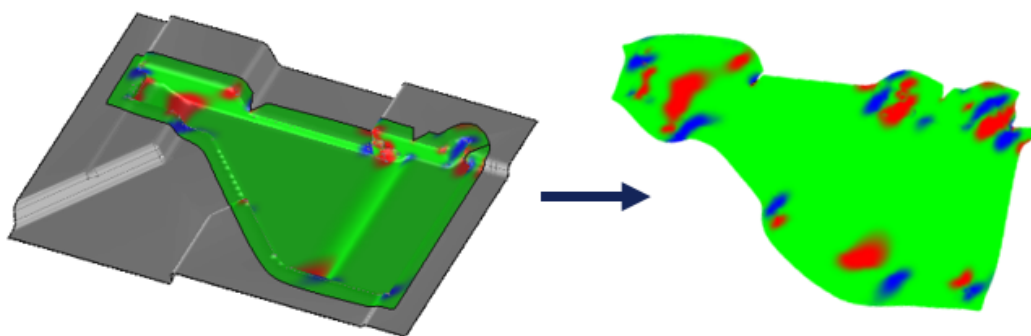


FIGURE 1.2 – Exemple du processus de développement d'un patron pour une pièce complexe

Les joints entre les patrons sont positionnés uniquement selon l'expérience de l'ingénieur et du technicien, le logiciel n'étant pas conçu pour déterminer le nombre de patrons à utiliser ni pour localiser les joints entre eux. De la même façon, les goupilles d'ancrage des patrons aux moules sont localisées uniquement à partir de l'expérience de l'ingénieur assisté par un technicien. Par la suite, lors de la réception du moule physique, les patrons sont testés directement sur le moule par un technicien expérimenté. Dans la plupart des cas, le technicien remarque des défauts sur pratiquement chaque patron et reporte les problèmes à l'ingénieur, qui doit par la suite incorporer ces commentaires et effectuer des changements. Ce processus requiert jusqu'à 5 itérations avant d'obtenir une série de patrons fonctionnels. Présentement, les trous de goupilles ne sont pas percés dans le moule avant que le design des patrons ne soit final. Le technicien utilise du ruban adhésif pour simuler les goupilles lors des itérations. Les problèmes reliés à l'utilisation de Wrapstyler sont causés par le positionnement des coupes, la longueur et la direction des coupes, le positionnement des joints et le positionnement des goupilles. De plus, aucun moyen actuel ne permet de sélectionner les tissus et leurs orientations de fibre favorables pour une géométrie complexe donnée. Le chiffrier développé dans le cadre de cette thèse vise à combler ces limitations.

1.4 Résumé des chapitres

Le chapitre 2 détaille chacune des étapes du procédé utilisé chez Hutchinson pour la fabrication de pièces composites. Tout d'abord, toutes les contraintes de design reliées aux pièces produites chez Hutchinson sont mises en évidence. Ensuite,

le processus pour la fabrication des patrons de découpe, pour l'assemblage des préformes et pour la découpe sont expliqués en détail. Toutes les étapes et complications reliées au drapage sont aussi mis en évidence. Tout au long du procédé de fabrication, les défauts potentiels ont été repérés et les améliorations possibles ont été énumérées. Finalement, les objectifs techniques du projet sont énumérés.

Le chapitre 3 est une revue de littérature concernant majoritairement le comportement des tissus secs en drapage. Tout d'abord, une description des principaux renforts utilisés en aéronautique est écrite. Ceci inclut les procédés de fabrication pour les brins de ces renforts, une liste des fabricants de brins de carbonés et une description des termes standards pour les tissus. Les comportements mécaniques en traction, compression, flexion, cisaillement et compaction des tissus secs sont expliqués incluant une description des méthodes de caractérisation actuelles. Finalement, les défauts possibles lors d'un drapage sont mis en évidence.

Le chapitre 4 explique en détails tous les matériaux, les méthodes et les procédures utilisées dans cette thèse. Tout d'abord, les 4 tissus analysés dans cette thèse sont détaillés. Ensuite, une étude du comportement du drapage sur des moules réelles chez Hutchinson est expliquée et les caractéristiques influençant le drapage ont été mises en évidence. Suivant cette étude, des outils de caractérisation adaptées pour les procédés de drapage chez Hutchinson ont été développées. Les procédures pour chacune des caractérisations effectuées dans cette thèse sont ensuite expliquées.

Le chapitre 5 montre les résultats de la caractérisation des tissus secs avec des méthodes standards et avec les méthodes développées dans cette thèse. Un tableau résumé incluant les résultats pour toutes les caractérisations des quatre tissus

est expliqué. Ce tableau est rapporté sur une base 10 afin de pouvoir comparer facilement les tissus.

Le chapitre 6 explique la décomposition d'une géométrie complexe en géométries de base. Les géométries de base sont identifiées avec des paramètres (exemple : rayon et angle) identifiés selon les variations des moules chez Hutchinson. Les géométries de base ont été caractérisées en fonction des mêmes caractéristiques que les tissus.

Le chapitre 7 explique la construction et le fonctionnement de l'outil prédictif de drapage. Tout d'abord, le contexte d'utilisation de l'outil est expliqué. Ensuite, les formules mathématiques reliant les bases de données des tissus et des géométries de base sont mises en évidences avec les différentes hypothèses. Suivant les équations, la construction du chiffrier Excel est expliquée. Finalement, le processus d'itération pour la détermination des paramètres des équations est expliqué et les résultats de l'utilisation de l'outil prédictif sur 10 moules de Hutchinson sont montrés.

Chapitre 2

Procédé de Hutchinson

Ce chapitre explique le procédé de fabrication analysé dans cette thèse ainsi que les enjeux qui en sont reliés. Les objectifs et restrictions du travail sont mis en évidence et chacune des étapes du procédé est expliquée en détail. Finalement, les améliorations possibles observées au procédé sont énumérées.

2.1 Objectifs et restrictions

Les objectifs de cette recherche sont de développer un outil numérique d'aide à la conception de patrons pour des préformes qui permettra l'atteinte des buts suivants :

- Réduire les temps de manipulation liés au procédé de préformage sous vide mis en place chez Hutchinson ;
- Établir une méthode de conception et de production de patrons (plybook) sans l'utilisation du moule réel incluant la sélection du tissu, le positionne-

ment des coupes dans les patrons et des joints entre les patrons, l'orientation préférable de fibres dans les patrons et le positionnement des goupilles de localisation.

Le contexte est comme suit. Le client potentiel de Hutchinson soumet un rendu de l'apparence que doivent prendre les pièces à produire, et Hutchinson doit établir un coût pour soumission avant de procéder au design de raffinement des patrons et du procédé de fabrication. Un temps de production typique de 20 minutes pour la préforme doit être atteint afin d'assurer un retour sur investissement pour Hutchinson. Hutchinson souhaite développer et utiliser des méthodes et outils qui vont diminuer l'incertitude lors du processus de soumission. Hutchinson souhaite également établir une méthode standardisées pour le design des préformes.

Les préformes analysées dans le cadre de cette thèse sont généralement constituées d'une superposition de 3 à 4 plis d'un même tissu parmi les suivants : un tissu toile de verre (plain weave) R1 (annexe B : 7500 Fiber Glass Fabric), un satin 8 de verre R2 (annexe B : 7781 Fiber Glass Fabric), un sergé de carbone R3 (annexe B : JB Martin 1040) ainsi qu'un tissu satin 5 de carbone poudré époxy R4 (annexe B : satin 5 4540). Hutchinson souhaite pouvoir utiliser l'outil numérique avec n'importe quel de ces tissus dans le cadre de cette thèse. Lors du processus de préformage, un certain nombre de plis de tissus sont empilés et découpés selon des formes spécifiques pré-déterminées appelées patrons. L'ensemble des patrons constitue une préforme.

2.1.1 Pièces

Outre la géométrie de chaque pièce à produire qui lui est spécifique, l'ensemble des pièces à produire sont caractérisables par un certain nombre de contraintes générales qui ont une influence sur leur design, et donc sur le design des préformes et du procédé de fabrication. Toutes les pièces doivent inclure des angles de démoulage compris entre 3 et 5°. Les rayons peuvent être aussi faibles que 2.286 mm (0.090") en surface concave ou convexe (rayon intérieur ou extérieur). Les géométries doivent pouvoir être démoulées sans avoir besoin de modifier ou d'articuler le moule, ni de plier la pièce, donc la géométrie doit être dépourvue de contre-dépouilles (undercut).

Il est possible que les pièces ne soient pas d'épaisseur constante ; par exemple, une surépaisseur peut être requise pour l'assemblage des instruments ou autres à la pièce (Figure 2.1). De plus, des éléments tels des pièces de nid d'abeille peuvent être requis. Dans le premier cas, la surépaisseur requiert l'ajout local de patrons de tissus plus petits, qui ne couvrent pas l'ensemble de la pièce. Dans le second cas, 2 options sont possibles au niveau de la fabrication. Soit on moule une première coque composite sur laquelle le nid d'abeille est positionné après réticulation, puis une seconde coque est surmoulée sur la première. Il n'y a généralement pas de problèmes d'infiltration de résine dans le nid d'abeille lors de cette seconde opération de moulage. Alternativement, il peut être possible de positionner la pièce de nid d'abeille à l'intérieur de la préforme sèche, entre les plis, et de mouler le tout en une seule opération. La seconde option est préférable en termes de réduction des temps de fabrication et du nombre d'opérations de moulage, mais

rend la préparation de la préforme plus complexes. L'utilisation de noyaux de mousse rigide ayant des perforations et/ou conduits pourrait diminuer le temps de fabrication de ces pièces. Dans la pratique actuelle, la première option est utilisée la plupart du temps.

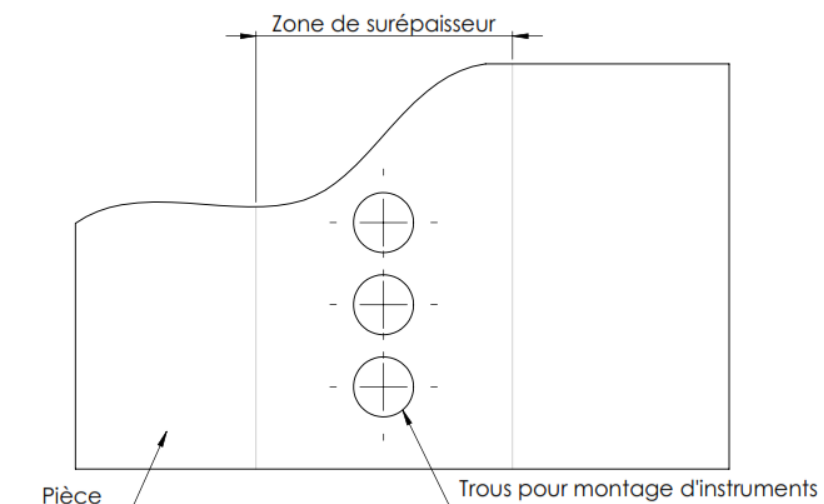


FIGURE 2.1 – Zone de surépaisseur

L'aspect esthétique des pièces et l'effet structural de l'orientation des fibres dans la pièce n'ont pas à être pris en compte dans la première phase de travail couvert par cette thèse, qui concerne des panneaux recouverts de cuir ou autre une fois installés dans l'aéronef. Toutefois, ces considérations seront importantes dans le cas de panneaux où la fibre demeure exposée et pourront être considérées lors d'une phase de travail ultérieure. Dans cette première phase de travail, l'orientation des fibres dans les pièces est donc déterminée strictement selon les besoins des procédés de découpe, préparation et drapage de la préforme, qui sont discutés plus bas. L'effet de l'orientation des fibres sur l'infusion de la résine n'est pas considéré de manière formelle. La majeure partie des coûts liés à ces opérations sont associés à la main d'oeuvre. Le coût relié aux pertes de fibres est mineur ; il est préférable d'augmenter les pertes de fibre si ceci résulte en une diminution significative des

temps de drapage.

L'épaisseur finale d'une pièce composite typique est de 1.5 mm (0.060"), atteinte par l'utilisation de 4 plis de $325 \frac{g}{m^2}$ ($9.6 \frac{oz}{yd^2}$). Les pièces doivent subir une déflexion maximale de 1.5 mm (0.060") sous une force équivalente au poids d'une personne moyenne, appliquée entre les points d'appui de la pièce. Les fibres dans la pièce ne sont pas orientées de façon à optimiser la performance structurale.

On vise généralement à ne pas mélanger différents tissus dans la construction d'une pièce ; l'objectif est de faciliter la gestion des stocks de renforts. Si nécessaire, deux tissus de même architecture mais de densités surfaciques (grammage) différentes seront combinés. Enfin, certains ajouts seront faits aux préformes avant moulage, tel que l'ajout d'insertions métalliques et/ou de petites pièces de tissus (patches) localisées précisément afin d'augmenter localement les propriétés mécaniques.

La fabrication de pièces par infusion sous vide peut être effectuée sur des moules mâles ou femelles. Les moules sont fabriqués en aluminium et sont chauffés à une température entre 40°C et 85°C afin de réduire la viscosité et promouvoir l'écoulement de la résine, ainsi que d'optimiser sa cure. Des trous sont percés stratégiquement sur les bords du moule afin de positionner des goupilles exclusives à Hutchinson, qui permettront de positionner et tenir les patrons de la préforme et d'induire une certaine tension dans celle-ci. Ces goupilles passent à travers la préforme et demeurent en place durant tout le procédé. Au départ des travaux présentés dans cette thèse, le positionnement des goupilles était déterminé par essais et erreurs. L'un des objectifs de ce travail est d'établir des lignes directrices et une procédure pour le positionnement des goupilles. Présentement, le positionnement

des goupilles ne prend pas en compte l'orientation des fibres, et des tensions dans les patrons peuvent donc être présentes lors du drapage.

2.1.2 Préformes

Les préformes sont constituées d'un ou plusieurs patrons, eux-mêmes constitués de plusieurs plis superposés et découpés simultanément à partir d'épaisseurs de tissus étendues à plat et dans la même orientation, une à une, manuellement à partir du rouleau. L'étape lors de laquelle le tissu est étendu manuellement peut amener une certaine variation aux orientations des fibres, qui peuvent déjà être imparfaites dans le rouleau même. Les plis dans un patron ont tous la même orientation et ne sont pas initialement cisailés; les orientations des mèches de chaîne et de trame sont donc à 90° l'une de l'autre sauf dans certains cas exceptionnels. Les plis superposés dans un patron ont la même forme et sont découpés simultanément. La réduction du nombre de patrons est favorable pour réduire le temps de drapage. Le cas idéal est d'utiliser un seul patron pour couvrir la pièce en entier, mais ceci peut être rendu impossible par les dimensions ou la complexité de la pièce. Dans les régions complexes où la déformation du tissu est largement exploitée, des coupes peuvent être présentes dans le tissu afin d'assurer que celui-ci épouse bien la géométrie. Les coupes sont à éviter étant donné que celles-ci diminuent les propriétés mécaniques du composite et nécessitent un contrôle plus attentif au niveau de la superposition des plis. Pour certaines géométries, il est inévitable d'insérer une coupe. L'ajout de coutures dans la préforme pourrait potentiellement permettre d'augmenter la stabilité de celle-ci et ainsi permettre un meilleur contrôle locale

du drapage. La couture ne fait pas partie des pratiques actuelles chez Hutchinson.

En cas de jonction de patrons, la superposition doit être entre 12 mm ($\frac{1}{2}$ "") et 25 mm (1"") afin d'éviter que toutes les discontinuités entre les plis ne soient superposées dans l'épaisseur de la pièce ; idéalement, les plis doivent être superposés en alternance pli par pli. Les patrons à superposer sont localisés près du joint à l'aide de goupilles de positionnement, tel que discuté plus loin.

Dans le cas où les joints superposés ne sont utilisés qu'en raison de la grandeur des pièces, et non de leur complexité géométrique, on peut raisonnablement s'attendre à ce que le joint ne soit pas modifié ou altéré lors du drapage. Par contre, si le joint est introduit parce que la préforme ne peut être drapée autrement à cause de la complexité de la pièce, deux situations peuvent se produire : 1) il est possible que ceci permette simplement de passer par exemple d'une orientation du tissu de $0^\circ/90^\circ$ à $\pm 45^\circ$ de façon localisée sans besoin de capacité de déformation locale au niveau du joint, ou encore 2) il est possible que le joint soit utilisé en raison du glissement relatif des plis qu'il permet. Dans ce dernier cas, le comportement de la préforme lors du drapage au niveau du joint devra être analysé. Les joints peuvent être fabriqués avec une alternance pli par pli (Figure 2.2a) ou bien avec seulement une alternance des deux patrons, donc plusieurs plis positionnés sur plusieurs autres plis (Figure 2.2b). L'alternance des joints pli par pli permet d'augmenter les propriétés mécaniques au niveau du joint en diminuant le moment créé entre les deux parties de la préforme, comme illustré à la Figure 2.2.

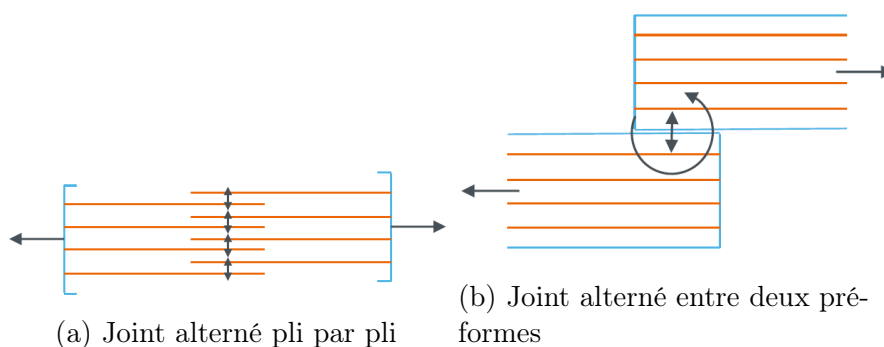


FIGURE 2.2 – Types de joints entre patrons

Le besoin de déterminer la position des joints dans la préforme, en tenant compte des limitations imposées par le client en termes de dimensions et finis de surface de la pièce. On note enfin que les patrons sont découpés de façon à laisser 50 mm (2") supplémentaires autour de la pièce composite finale, mais pas au niveau des joints.

2.1.3 Découpe

Le processus de découpe mécanique des tissus se fait à l'aide d'une table de découpe Eastman 2mx3m (7'x10') utilisant des rouleaux, des lames et des poinçons. L'alignement des chaines et trames du tissu est vérifié visuellement par un technicien. La machine exerce une pression maximale de 690 kPa (100 psi) pour maintenir le tissu en place lors de la découpe et du poinçonnage des trous de goupilles. La trajectoire de la machine est déterminée par logiciel qui minimise les pertes de matériel. Un technicien assemble ensuite les patrons et préformes en insérant les goupilles dans ceux-ci avant de les déposer dans le moule.

La préparation des patrons implique aussi le poinçonnage de trous pour les gou-

pilles de positionnement discutées plus loin. Les trous ont un diamètre de 6.3 mm ($\frac{1}{4}$ ") et sont percés dans les 50 mm (2") de matériel en périphérie de la pièce. La distance entre le bord de la pièce et le bord du trou est de 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ") donc 15.9 mm ($\frac{5}{8}$ ") au centre du trou. Aucun agent liant ("binder") n'est ajouté aux préformes dans le procédé tel que défini présentement.

2.1.4 Drapage

La préforme préalablement assemblée est transportée à plat par un opérateur à partir de la table de découpe jusqu'au moule. L'opérateur s'assure ensuite de positionner la préforme à l'endroit voulu avec les goupilles de positionnement. Il arrive que seuls certains trous soient localisés sur les goupilles avant que le drapage manuel n'ait lieu, ou encore il est possible que tous les trous soient positionnés sur les goupilles avant le drapage manuel. Une procédure pour séquencer l'insertion des goupilles dans les trous et le drapage de la préforme sur les différentes zones doit être déterminée. La préforme est ensuite manipulée adéquatement pour bien suivre les courbes du moule. L'opération manuelle pour conformer la préforme au moule est appelée drapage. L'opérateur dépose ensuite les plis de séparation ainsi que les médiums de haute perméabilité si nécessaire. Enfin, la membrane flexible est mise en place et le vide est créé. L'opération par laquelle la préforme est conformée au moule dans sa configuration finale, sous l'effet du vide, est appelée formage. Le formage est donc exécuté avec les goupilles de positionnement en place dans les trous, et en présence des membranes et autres auxiliaires de moulage, sous l'effet du vide seulement.

Il peut arriver que la préforme soit fixée à la surface du moule par du ruban adhésif. En général, on évite que des mèches de tissus ne soient retenues par du ruban à leurs 2 extrémités, de façon à ne pas charger ses mèches en tension. Par contre, les goupilles sont conçues de façon à permettre un certain déplacement du tissu au point d’ancrage lorsqu’une certaine force est appliquée dans le plan. Enfin, il faut noter les questions liées à la présence du pli de séparation (“peel ply”) inextensible lors du formage ; celui-ci ne doit donc pas être tendu.

2.1.5 Fabrication

Le sac à vide normalement utilisé dans un processus d’infusion est remplacé par une membrane de silicone ayant initialement la forme du moule. L’installation de la membrane permet de diminuer largement le temps de production associé à l’application du vide. Le positionnement des ports d’entrées et de sorties de la résine est fait de façon à avoir un écoulement relativement lent, permettant d’éviter les bulles d’air possible. Les stratégies d’infusion généralement utilisées avec la membrane sont radiales divergent ; l’infusion est donc plus lente. Des tubes spiraux sont installés en contour des moules et une buse d’injection est installée au centre. Afin de s’assurer que les pièces sont imprégnées au complet, un médium de perméabilité est installé stratégiquement dépendamment de la pièce à infuser. Un tissu d’arrachage est ensuite utilisé sur tout le moule afin de faciliter le démoulage de la pièce composite. Finalement, le tuyau d’entrée de résine est connecté à une machine d’injection, permettant de contrôler la quantité et le débit de résine.

2.1.6 Améliorations

Plusieurs pistes d'amélioration du processus pourront éventuellement être analysées pour diminuer le temps de production. Tout d'abord, le temps pour l'application du pli de séparation est très élevé dû à sa très faible drapabilité. Aussi, plusieurs pièces sont construites ayant des noyaux de mousse à certains endroits. Présentement, ces pièces sont assemblées en trois différentes parties.

Les objectifs de développement de Hutchinson consistent à réduire le temps de manipulation en lien avec le procédé de préformage (découpe, assemblage, transport, positionnement et drapage formage) ; prédire, guider et baliser le processus de conception et de fabrication des préformes ; et fournir un support pour le processus de soumission. De façons plus spécifique, on souhaite :

1. Déterminer la forme des patrons, et leur orientation.
2. Réduire le nombre de patrons.
3. Déterminer le positionnement des joints entre les patrons, en tenant compte des limitations liées au design de la pièce.
4. Analyser le comportement des joints lors du drapage et du formage.
5. Tenir compte des contraintes liées au design de la pièce.
6. Mesurer et minimiser le nombre de défauts dans la préforme, et identifier l'origine de ces défauts.
7. Prendre en compte des éventuelles surépaisseurs, insertions de noyau (nid d'abeille) et insertions métalliques.
8. Guider le positionnement des goupilles et minimiser leur nombre.

9. Séquencer l'insertion des goupilles dans les trous et les opérations de drapage manuelles.
10. Analyser et prévoir le comportement des plis inextensibles ("peel plys", "HPM", etc.) lors du formage, ainsi que l'effet des entrées et sorties de résine, tubes spiraux, etc.
11. Considérer d'autres améliorations possibles, telles que l'utilisation de coutures locales, l'orientation des plis dans la préforme, etc.
12. Caractériser différents tissus selon leur drapabilité et leur fraction volumique.
Développer une méthode d'évaluation pour quantifier le cisaillement de préformes sur des rayons de courbure.

Chapitre 3

Revue de Littérature

Ce chapitre décrit la revue de littérature qui est concentrée sur les tissus secs de fibres de verre et de carbone. Les différents renforts utilisés sont expliqués avec leurs avantages et désavantages généraux mis en évidences. Le comportement mécanique en traction, compression, flexion, cisaillement plan et compaction sont expliquée. Finalement, les défauts possibles résultant d'un drapage sont expliqués

3.1 Renforts

3.1.1 Fibre de verre

Le verre est un matériau fragile. Par contre, lorsque le verre est manipulé pour produire des fibres de petit diamètre (5 à 15 μm), ces fibres peuvent être pliées sur de petits rayons. Le verre est un mélange composé majoritairement de silice, d'alumine, de chaux, de carbonate de magnésium et de plusieurs autres consti-

tuants. Les principaux types de verre utilisés pour la fabrication de fibres sont le verre E, le verre D, le verre A, le verre C ainsi que les verres R et S. Le verre E est le type de verre le plus utilisé à titre de renfort et offre de bonnes propriétés électriques (faible conductivité et bon isolant). Le type de verre D est généralement utilisé pour ses hautes propriétés diélectriques ; il est donc généralement utilisé dans l'électronique. Le verre de type A comporte une haute teneur en alcali. Le verre de type C est utilisé pour sa bonne résistance chimique. Finalement, les verres de type R et S sont utilisés pour leurs bonnes caractéristiques mécaniques et donc pour la production de structures nécessitant de hautes résistances et hauts modules de traction [2, 5].

La fabrication des fibres de verre débute par une fusion des matériaux constitutifs, qui sont insérés dans un four et chauffés jusqu'à fusion. Le verre passe ensuite dans une filière chauffée à environ 1250°C et s'écoule par gravité. Les filaments sont étirés à haute vitesse et refroidis. Un ensimage est appliqué aux monofilaments afin de les protéger lors des manipulations subséquentes et de promouvoir l'adhésion à diverses résines dans les composites. Une torsion est appliquée à l'ensemble des monofilaments afin de produire un seul fil de base. Les fils de base sont ensuite combinés en mèches de différentes densités linéaires, et enroulés sur des bobines [2]. La Figure 3.1 illustre le procédé de fabrication pour la fibre de verre.

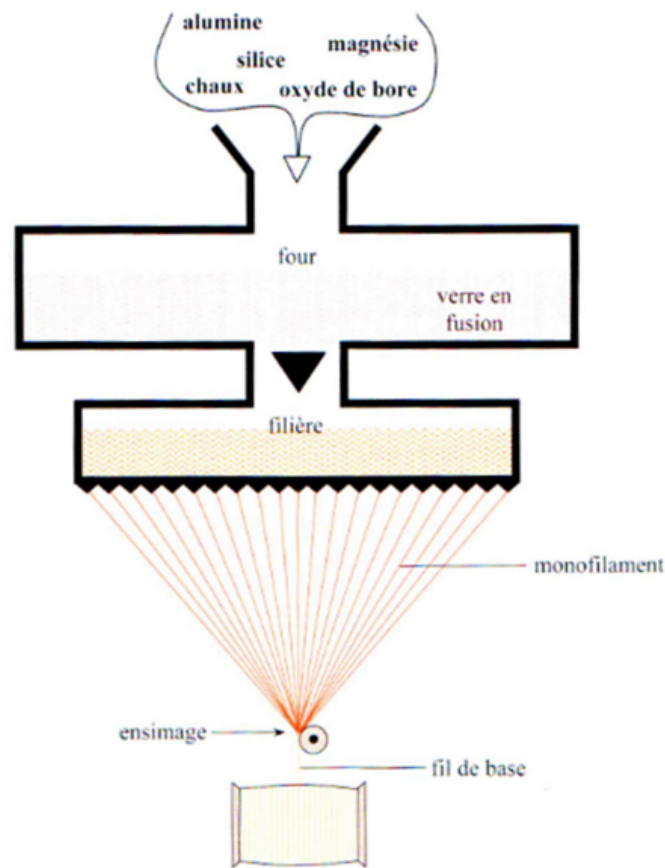


FIGURE 3.1 – Procédé de fabrication de la fibre de verre [2]

3.1.2 Fibre de carbone

Les renforts de fibre de carbone influent fortement sur les propriétés mécaniques du composite résultant. Non seulement les propriétés d'un renfort dépendent de la façon dont la fibre est tissée, mais aussi de la façon avec laquelle la fibre a été manipulée sous forme brute. Certaines fibres de carbone sont fabriquées à partir de polyacrylonitrile (PAN). Une tension est appliquée sur les fibres PAN et celles-ci sont oxydées, carbonisées et subissent un traitement de graphitisation pour finalement obtenir la fibre de carbone, Figure 3.2. Une autre méthode pour obtenir les fibres de carbone utilise un précurseur brai ("pitch"), qui consiste à porter le brai sous forme intermédiaire entre liquide et cristal pour ensuite être

filé ; les étapes suivantes sont très similaires à celles utilisées avec les fibres PAN [2].

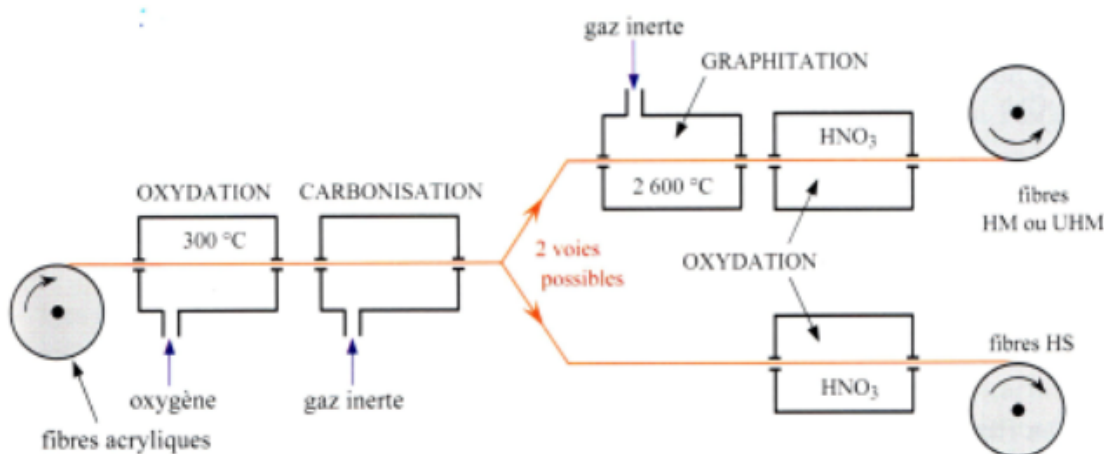


FIGURE 3.2 – Procédé de fabrication de la fibre de carbone [2]

Toutes ces étapes peuvent être modifiées et ajustées afin d'obtenir des fibres de carbone ayant différents modules et différentes résistances en traction, en plus de différents niveaux de tolérances. La qualité de la fibre de carbone dépend fortement de sa variabilité et des tolérances de celle-ci. La fibre de carbone utilisée en aéronautique nécessite de très faibles variabilités pour favoriser l'homogénéité du composite et assurer une traçabilité. Les fibres de carbone peuvent être continues ou coupées, Figure 3.3. Les fibres de carbone utilisées en aéronautique sont continues [3, 4].



FIGURE 3.3 – Types de mèches pour renfort

Fournisseurs

Les trois principales entreprises oeuvrant dans la fabrication de fibres de carbone sont Toho Tenax, Hexcel et Toray. Le Tableau 3.1 présente différentes propriétés mécaniques des fibres de carbones produites par ces trois entreprises. Ce tableau compare des mèches de fibres avec un nombre équivalent de filaments de carbone pour les différentes entreprises. Les prix varient largement en fonction des cadences de production et sont donc très difficiles à comparer et obtenir.

Tableau 3.1 – Propriétés mécaniques de mèches de fibres de carbone

Fournis- seur	Type	Nombre de filaments [-]	Densité linéaire [g/m]	Résistance en traction [MPa]	Module de traction [GPa]	Élongation à rupture [%]	Densité des fibres [g/cm ³]
Toho Tenax	HMA35	12000	0.760	3300	355	0.9	1.78
	UMS40	12000	0.390	4700	390	1.2	1.79
	UMS45	12000	0.390	4600	425	1.1	1.83
	UMS55	12000	0.360	4000	550	0.7	1.91
Hexcel	IM7	12000	0.446	5654	276	1.9	1.78
	IM8	12000	0.446	6067	310	1.8	1.78
	IM9	12000	0.335	6136	303	1.9	1.80
	IM10	12000	0.324	6964	310	2.0	1.79
	HM63	12000	0.418	4688	441	1.0	1.83
Toray	M35J	12000	0.450	4700	343	1.4	1.75
	M46J	12000	0.445	4210	436	1.0	1.84
	T700G	12000	0.800	4900	240	2.0	1.80
	T700S	12000	0.800	4900	230	2.1	1.80
	T800H	12000	0.445	5490	294	1.9	1.81

3.1.3 Caractérisation d'un renfort

Fibres

Les renforts de carbone comportent des mèches qui sont composées de milliers de fibres. Les fibres ont un diamètre entre 5 et 10 μm et plusieurs sont regroupées et torsadés ("twist") afin d'assurer une bonne stabilité [2, 5].

Mèches

D'abord, la mèche de fibres est caractérisée par le nombre de fibres qu'elle contient. Cette mesure est exprimée par mille (K) fibres dans la mèche ; les mesures classiques sont 1K, 3K, 6K, 12K, 24K et même 50K. La mèche est aussi caractérisée par sa densité linéaire. La densité linéaire d'une mèche de fibres représente le rapport de sa masse à sa longueur, généralement exprimé en Tex ($\frac{g}{km}$). La mèche

est aussi caractérisée par son torsadage quantifié en nombre de tours par mètre de longueur. Celle-ci est aussi caractérisée par la présence, le type et la quantité d'agents liants ("binder") dans les mèches (par opposition aux tissus), ou par son absence [2, 5].

Tissus

La distance entre les mèches dans un tissu dépend de la largeur des mèches et de l'espace entre celles-ci. Cette mesure est généralement exprimée par le nombre de mèches pour une certaine distance ($\frac{pick}{cm}$ ou $\frac{pick}{in}$) [4, 5].

Le facteur de couverture exprime l'aire projetée des mèches présentes dans un tissu relativement à l'aire totale. Le facteur de couverture dépend principalement de la distance entre les mèches. Pour un même tissu, plus le facteur de couverture est élevé, plus la fraction de volume occupé par les fibres est élevée. La Figure 3.4 indique les dimensions nécessaires à la mesure du facteur de couverture [5].

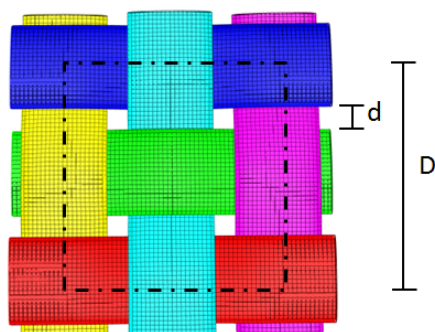


FIGURE 3.4 – Mesure du facteur de couverture

L'équation 3.1 montre le calcul du facteur de couverture suivant les mesures de la Figure 3.4 [5].

$$\begin{aligned}
C_f &= \frac{\text{Aire projetee des meches}}{\text{Aire Totale}} \cdot 100 \\
&= \frac{D^2 - 4 \cdot d^2}{D^2} \cdot 100
\end{aligned} \tag{3.1}$$

La densité surfacique dépend de la densité linéaire des mèches, de la distance entre les mèches et aussi du facteur de couverture. Elle s'exprime par le rapport de la masse à la surface d'un tissu ($\frac{g}{m^2}$ ou $\frac{oz}{yd^2}$). De façon générale, la fraction volumique de fibre augmente lorsque la densité surfacique augmente [5].

L'ondulation ("crimp") des mèches qui résulte du tissage affecte la fraction volumique ainsi que la résistance et le module de traction du composite final. Des ondulations peuvent être présentes dans le plan et dans l'épaisseur du tissu. Ces deux différentes ondulations peuvent être caractérisées par analyse d'images et approximées par des fonctions sinusoïdales. Plus les ondulations sont faibles, plus la fraction volumique et les modules et résistances en traction sont élevés [2, 4, 5].

Fraction volumique de fibres

La fraction volumique de fibre dans un composite représente le rapport entre le volume des fibres et le volume total du composite. Une fraction volumique de fibre élevée permet de bénéficier davantage des propriétés mécaniques de la fibre et ainsi d'obtenir un composite ayant des propriétés mécaniques supérieures. Il faut donc viser une haute fraction volumique de fibres tout en ayant suffisamment de résine pour tenir les fibres ensemble. Théoriquement, la fraction volumique de fibre maximale pouvant être atteinte dans un composite est de 78.50% lorsque les

fibres parallèles sont alignées en carré et de 90.69% en configuration triangulaire/-hexagonale. En pratique, de telles fractions volumiques sont inatteignables car les fibres ne sont ni parfaitement droites ni parfaitement alignées, et le regroupement de fibres en mèches puis en structure textiles crée des volumes dans lesquels on ne retrouve pas de fibres. Cependant, plusieurs solutions existent pour s'en approcher [5]. Pratiquement, la fraction volumique d'une pièce composite se situe généralement entre 35% et 65%, dépendamment du procédé utilisé.

L'équation 3.2 représente la fraction volumique de fibre V_f en fonction de la fraction volumique de résine V_r , du volume de fibre v_f , du volume de résine v_r ainsi que du volume du composite final v_c en supposant qu'il n'y a aucun vide dans le composite. Dans le cas de tissus secs on peut remplacer v_c par v_t , le volume occupé par le tissu [5].

$$\begin{aligned} V_f &= 1 - V_r \\ &= \frac{v_f}{v_c} \\ &= \frac{v_f}{v_r + v_f} \end{aligned} \tag{3.2}$$

Il est possible de déterminer plusieurs relations entre la fraction volumique de fibres et la fraction massique, la masse et la densité des fibres (P_f , m_f et ρ_f), de la résine (P_r , m_r et ρ_r), et la masse et la densité du composite (m_c et ρ_c). L'équation 3.3 exprime la densité du composite en fonction de la fraction volumique de fibre, des densités et de la masse de fibre et de résine [2, 5].

$$\begin{aligned}
\rho_c &= \rho_f \cdot V_f + \rho_r \cdot (1 - V_f) \\
&= \frac{1}{\frac{P_f}{\rho_f} + \frac{P_r}{\rho_r}} \\
&= \frac{v_f}{v_r + v_f}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Il est possible de calculer la fraction volumique de fibre pouvant être atteinte avec un textile sachant la densité surfacique du textile s_f , l'épaisseur du textile t , le nombre de plis de tissu déposés n ainsi que la densité du composite final ρ_c ; l'équation 3.4 exprime la fraction volumique de fibre en fonction de ces données [2, 5].

$$V_f = n \cdot \frac{s_f}{\rho_c \cdot t} \tag{3.4}$$

3.1.4 Architecture des renforts

La direction des fibres influence l'écoulement de la résine dans la préforme ainsi que les propriétés mécaniques finales du composite résultant. Les structures composites peuvent être isotropes, orthotropes ou anisotropes selon la distribution de ces orientations dans le plan. Un composite supporte généralement bien les chargements en traction, mais offre souvent de moins bonnes propriétés mécaniques en compression et en cisaillement. La configuration du textile permet de varier le niveau d'orthotropie ainsi que les propriétés mécaniques en compression et en cisaillement. De façon générale, un composite offre une réponse linéaire élastique

jusqu'à endommagement et/ou rupture, lorsque soumis à des charges en tension, compression et cisaillement dans le plan ou hors plan. Il n'en est pas du tout ainsi pour les tissus, tel que discuté à la section 3.2. [5]

Dans un renfort textile tissé, les mèches qui sont dans la direction du rouleau sont nommées chaînes et les mèches qui sont perpendiculaire à l'axe du rouleau sont nommées trames.

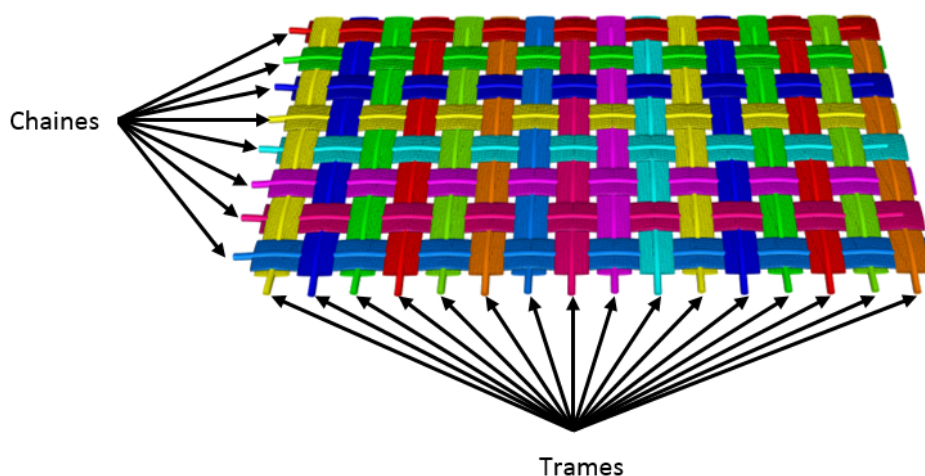


FIGURE 3.5 – Illustration des chaînes et des trames dans un tissu

Unidirectionnels

Les tissus unidirectionnels consistent en un ensemble de mèches parallèles assemblées à l'aide de très légères trames, souvent perpendiculaire aux chaînes. Cet assemblage procure de très hautes propriétés mécaniques au composite dans une seule direction et permet généralement de hautes fractions volumiques de fibre. Par contre, les tissus unidirectionnels démontrent une très grande instabilité lors des manipulations tel que discuté à la prochaine sous-section. La Figure 3.6 illustre la configuration d'un tissu unidirectionnel [5].

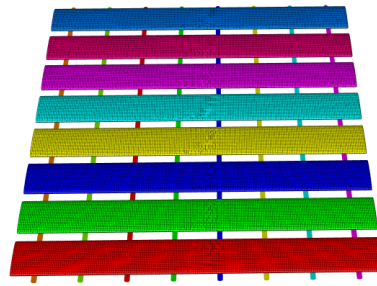


FIGURE 3.6 – Configuration d'un tissu unidirectionnel

Textiles Bidirectionnels

Plusieurs types de tissus bidirectionnels existent sur le marché. On peut les séparer en 3 groupes principaux : les tissés, les tissus non-entrelacés ("non-crimp"), et les tissus obtenus par d'autres procédés tels que le tressage 2D ("2D braiding"). Les principaux tissés sont les toiles (taffetas, "plain weave"), les sergés ainsi que les satins ; les 2 derniers sont disponibles en plusieurs variantes.

Dans le cas d'un tissu toile, chaque fil de chaîne passe au dessus d'un fil de trame pour ensuite passer en-dessous du fil de trame suivant, et ainsi de suite comme illustré à la Figure 3.7. Ce type de tissu est très commun, principalement en raison de sa haute stabilité lors des manipulations ainsi qu'à ses bonnes propriétés mécaniques dans deux directions. La toile 2D est le tissu qui présente la plus grande densité d'entrelacements. Étant donné ce grand nombre d'entrelacements qui sont propices à l'apparition de volume libres de fibres, la fraction volumique de fibre dans un composite fait à partir de tels renforts est légèrement inférieure à celles qui pourraient être obtenues avec d'autres types de tissés de densités surfacique, mèches et facteurs de couverture similaires. On note au passage que les tissés

peuvent être constitués de mèches identiques ou différentes en chaîne et en trame, et que leur espacement peut être identique ou différer selon les 2 directions. Dans de rares cas, différents types de fibres peuvent être utilisés dans la chaîne, dans la trame, ou entre la chaîne et la trame. Ceci dit, dans la majorité des cas, un seul type de fibres et de mèches est utilisé avec des densités et espacements similaires dans les 2 directions. On parle alors de tissus balancés [5].

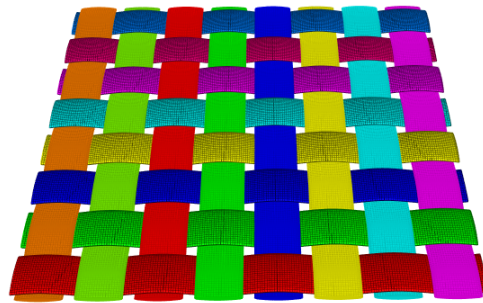


FIGURE 3.7 – Configuration d'un tissu toile

Dans la configuration du tissu sergé ("twill"), plusieurs fils de chaîne passent au-dessus de plusieurs fils de trame et ainsi de suite. L'entrelacement des mèches est donc différent. Dans un tissu sergé 2 x 1, tel que représenté à la Figure 3.8, une mèche de chaîne passe au-dessus d'une mèche de trame pour ensuite passer en-dessous des deux mèches de trame suivantes. Cet entrelacement procure au sergé une souplesse et une capacité de drapage supérieure au tissu toile, tout en permettant d'obtenir typiquement une fraction volumique de fibre légèrement supérieure dans le composite final en raison du nombre inférieur d'entrelacements en comparaison avec le tissu toile. Par contre, la stabilité du tissu est inférieure à celle du tissu toile [5].

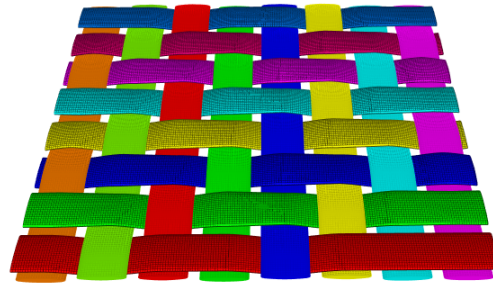


FIGURE 3.8 – Configuration d'un tissu sergé 2 x 1

Le tissu satin est similaire au sergé, mais ici les mèches de chaîne passent au-dessus d'un nombre supérieur de mèches de trame, et ainsi de suite. Les deux satins les plus fréquents sont construits avec une mèche de chaîne passant en-dessous de 4 ou 8 mèches de trame, pour ensuite passer au-dessus d'une mèche de trame et ainsi de suite. Étant donné le nombre d'entrelacements moindre, ce tissu procure une très grande souplesse et une très grande capacité de drapage, en plus de permettre l'atteinte de fractions volumiques de fibres légèrement plus élevées dans le composite qui en est constitué. Pour la même raison, la stabilité de ces tissus est plus faible et ils sont plus délicats à manipuler. La Figure 3.9 illustre la configuration d'un satin 4 x 1 [5].

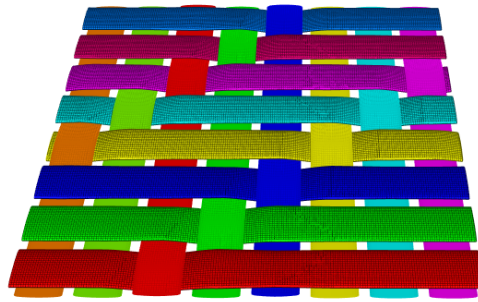


FIGURE 3.9 – Configuration d'un tissu satin 4 x 1

Le Tableau 3.2 résume quelques caractéristiques de ces trois types de tissus en terme de stabilité, de souplesse et de la fraction volumique de fibre du composite final ; 3 étant le plus favorable et 1 étant le moins favorable.

Tableau 3.2 – Comparaison entre les tissus Toile, Serge et Satin

Type de tissu	Stabilité	Souplesse/Drapage	Fraction volumique de fibre
Toile	3	1	1
Serge	2	2	2
Satin	1	3	3

3.2 Comportement mécanique d'un textile

Le comportement d'un textile est plus complexe et difficile à prévoir que celui d'un composite. En effet, le comportement mécanique d'un textile est souvent non-linéaire et non-élastique. Les textiles peuvent supporter/subir de grandes déformations et ne sont généralement pas isotropes. De plus, les textiles ne sont pas des solides continus, et ne sont ni homogènes comme un alliage typique, ni

hétérogènes comme un composite. Les textiles sont des assemblages de solides en structures déformables, définies à plusieurs échelles. Une variation trop importante de l'espacement entre des entités définies à une échelle donnée, par exemple les mèches, va induire des variabilités qui peuvent devenir des défauts critiques. À titre d'exemple, on peut citer des mèches trop rapprochées résultant en un flambement local d'un tissu sec lors du drapage ou du formage, ou encore des mèches trop éloignées résultant en une zone riche en résine dans le composite.

3.2.1 Traction et compression dans le plan

L'application de tension sur un tissu sec strictement dans la direction des mèches résulte en de petites déformations dans le textile. Généralement ces déformations sont élastiques, mais pas parfaitement linéaires. Au départ, le module est plus faible que celui mesuré sur les fibres, notamment dans les tissés, et à plus forte raison lorsque l'entrelacement est plus important. Les mèches deviennent progressivement plus droites sous tension et subissent une compaction locale au niveau des entrelacements, ce qui augmente leur longueur effective.

Progressivement, les fibres deviennent plus droites et le module augmente vers une limite correspondant à celui des fibres elles-mêmes. Le déplacement est donc principalement dû à la compaction transverse des mèches et à une diminution de leur ondulation ("crimp"), et non pas à l'élongation de celles-ci.

Un tissu ne peut soutenir que de très faibles charges en compression dans la direction des mèches. Au-delà de très faibles charges, le tissu subit un flambement ; ce type de charge est à éviter. Il est à noter que le comportement diffère fondamenta-

lement lorsque des forces opposées et parallèles sont appliquées dans des directions autres que celles des mèches de chaîne ou de trame. De plus, la description donnée ci-haut assume que des forces sont appliquées de façons similaire à toutes les mèches voisines. Habituellement, ce n'est pas le cas en pratique, ce qui peut mener à des distortions et défauts locaux [2, 5].

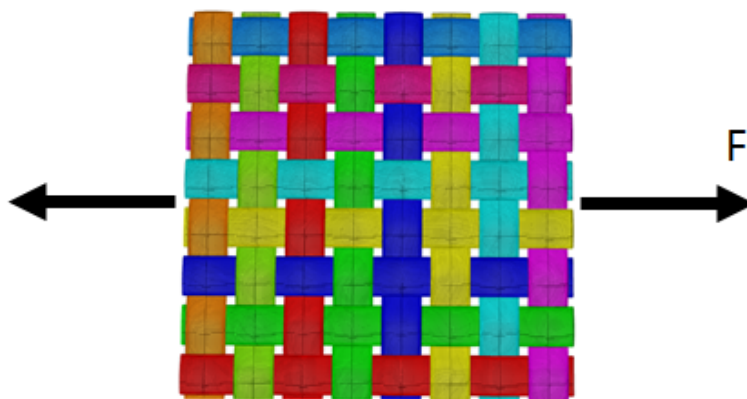


FIGURE 3.10 – Force de traction dans un tissu

3.2.2 Flexion

La rigidité en flexion des tissus secs est souvent négligée puisque très faible. Dans ce contexte, peu d'essais ou de standards sont établis dans la littérature. Le comportement du tissu en flexion est pourtant très important afin de déterminer les rayons de drapage potentiel pour chaque tissu.

Le principe de l'essai de flexion en porte-à-faux, illustré à la Figure 3.11, est de quantifier la flexion d'un tissu sous son propre poids, pour une longueur libre de tissu donnée. Des mesures sont effectuées pour différentes longueurs de tissu libre, permettent de quantifier la flexion en fonction de la courbure du tissu.

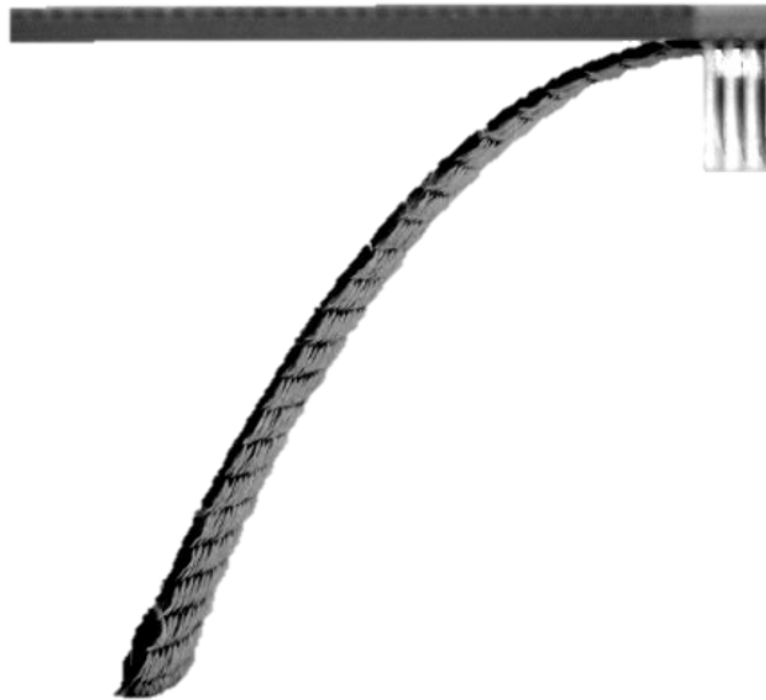


FIGURE 3.11 – Essai de flexion en porte-à-faux [16]

La Figure 3.12 illustre le principe du fonctionnement de l'essai de flexion en porte-à-faux [17].

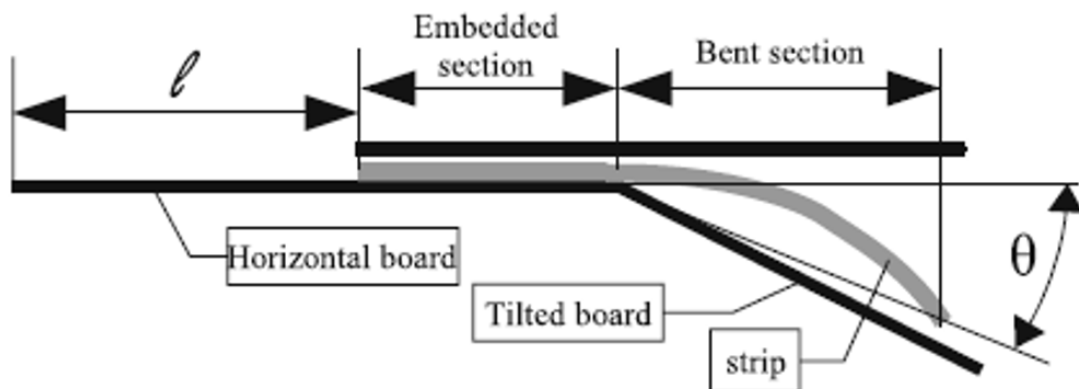


FIGURE 3.12 – Principe du fonctionnement pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]

Il existe plusieurs analyses de cet essais de flexion dont celui de Pierce [17] qui présente un modèle linéaire où le moment de flexion M dépend de la rigidité en flexion G , de la largeur du tissu b ainsi que de la courbure k :

$$M = G \cdot b \cdot k \quad (3.5)$$

Pierce a défini le ratio S comme étant la rigidité en flexion G par rapport au poids par unité d'aire du tissu w :

$$S = \frac{G}{w} \quad (3.6)$$

Une relation entre S et les paramètres géométriques l (section de flexion, Figure 3.12) et θ (angle d'inclinaison, Figure 3.12) est proposée :

$$S = \frac{l^3 \cos \frac{\theta}{2}}{8 \tan \theta} \quad (3.7)$$

Pierce a déterminé que pour un angle θ de 41.5° (Figure 3.12), les calculs sont largement simplifiés puisque $\frac{\cos \frac{\theta}{2}}{\tan \theta} \approx 1$; ce montage est donc reconnu et souvent utilisé pour la mesure de la flexion de tissus secs. La mesure de la longueur l est donc suffisante pour déterminer la rigidité en flexion en utilisant la relation liant le moment de flexion à la courbure du tissu.

Les essais décrits par de Bilbao [17] consistent à prendre des photos successives d'essais à différentes longueurs de tissu libre, Figure 3.13, afin de recréer la courbure du tissu en fonction de la longueur fléchie, Figure 3.14.

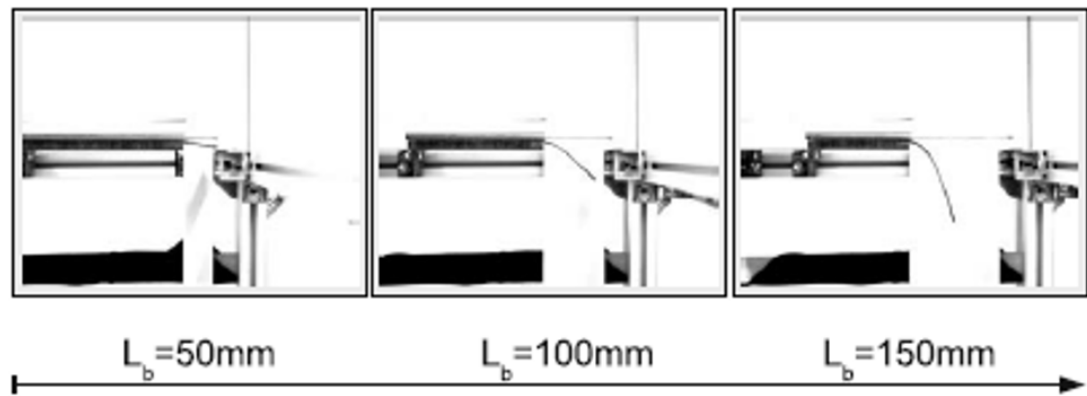


FIGURE 3.13 – Exemples de longueurs différentes de tissu libres durant l'essai de flexion en porte-à-faux [17]

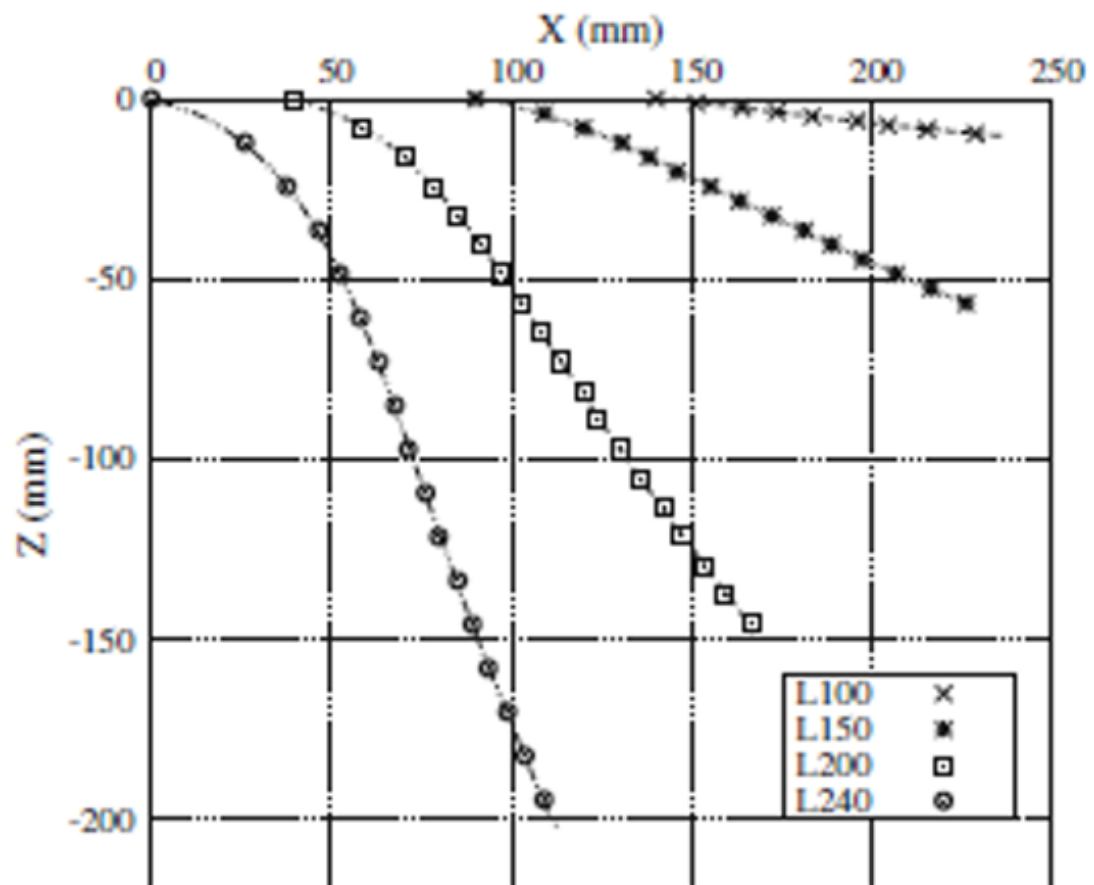


FIGURE 3.14 – Exemples de courbes résultant de l'essai de flexion en porte-à-faux [17]

À l'aide de ces courbes, la courbure ainsi que le moment de flexion du tissu sont calculés pour chaque distance L_b à l'aide des équations suivantes :

$$k = \frac{z}{(1 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.8)$$

Où k est la courbure et z est la double dérivée de la position verticale.

Le moment de flexion $M(s)$ suivant l'abscisse curviligne s , L_b la longueur du tissu, u et ϕ les coordonnées de Frenet du point Q suivant l'abscisse curviligne entre P et F , Figure 3.15.

$$M(s) = W \int_s^{L_b} (u - s) \cos(\phi) du \quad (3.9)$$

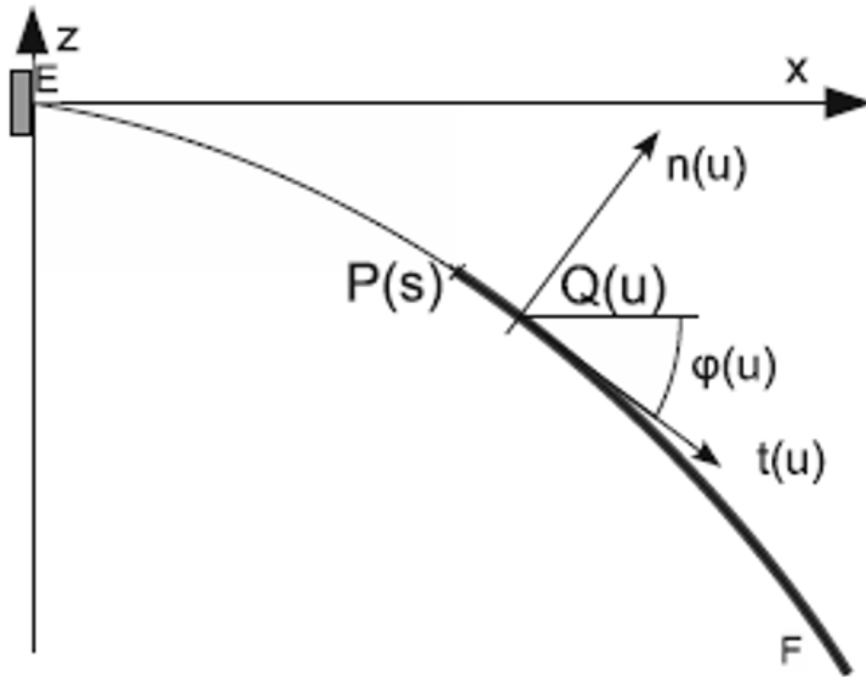


FIGURE 3.15 – Calcul du moment de flexion et de courbure pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]

Le calcul de ces 2 valeurs permet de tracer l'évolution du moment de flexion en fonction de la courbure du tissu.

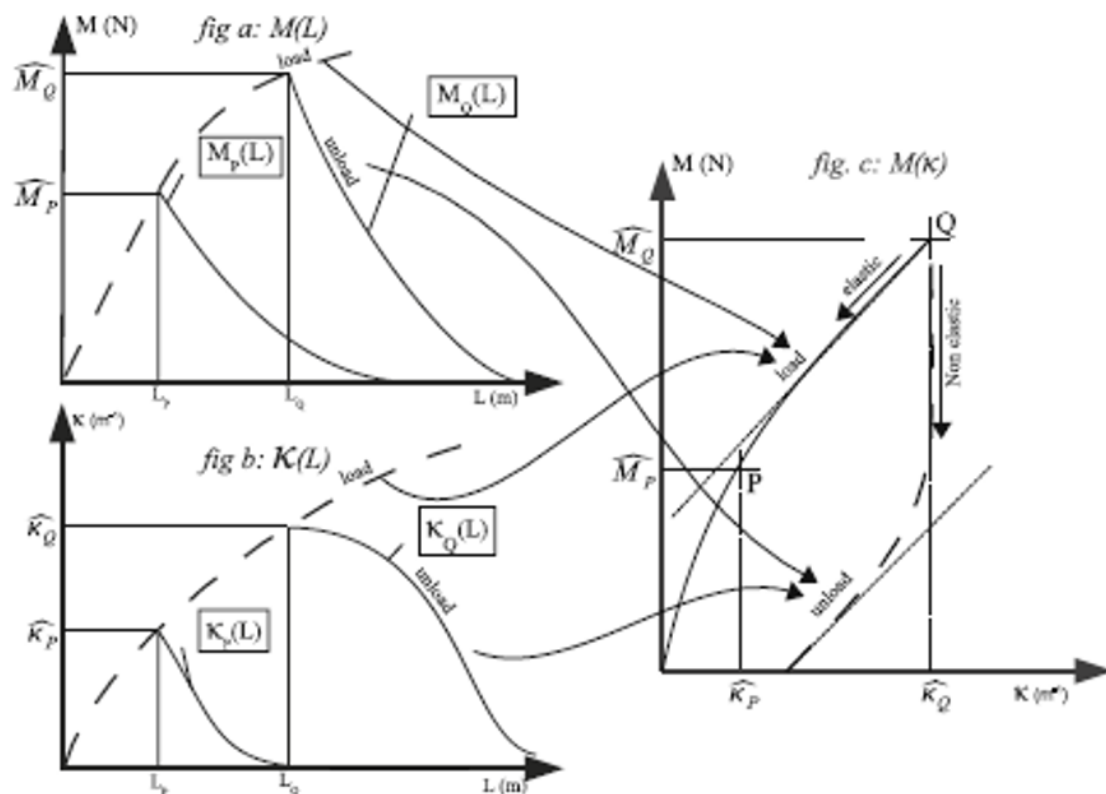


FIGURE 3.16 – Courbes de l'évolution du moment de flexion en fonction de la courbure pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]

A partir de toutes ces données, la rigidité en flexion d'un tissu peut être tracée en fonction de la longueur de tissu (Figure 3.17) [17].

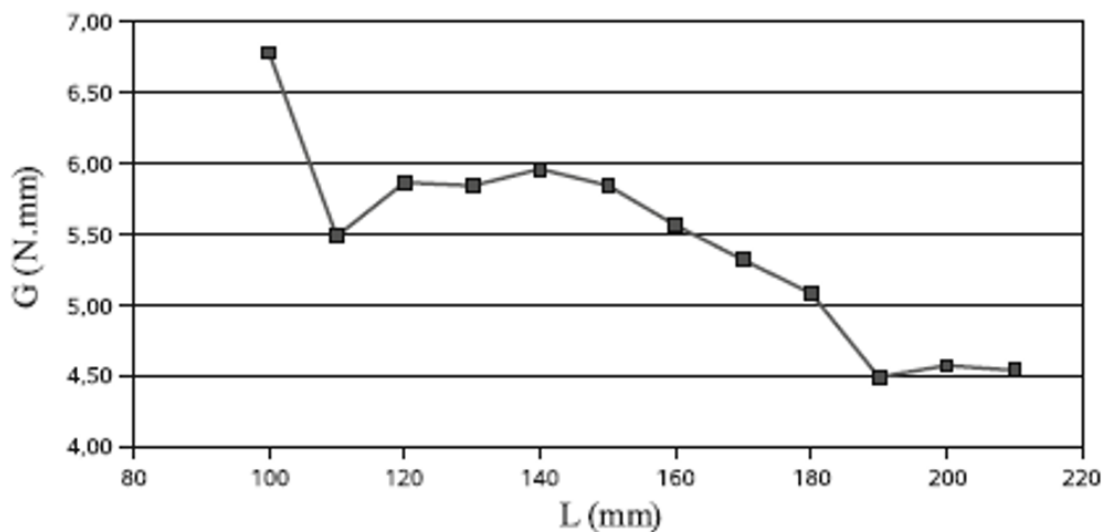


FIGURE 3.17 – Rigidité en flexion en fonction de la longueur pour l'essai de flexion en porte-à-faux [17]

Cette méthode nécessite des moyens d'analyse d'image et de modélisation graphique. L'essai de Pierce est plus simple à mettre en œuvre et ne nécessite que peu de moyens.

3.2.3 Cisaillement

Le cisaillement d'un tissu résulte de l'application de forces parallèles et opposées dans une direction autre que celles des mèches, tel qu'illustré à la Figure 3.18. La déformation due au cisaillement n'est pas linéaire ni élastique et peut être très grande. La déformation est due d'abord à la rotation relative des mèches à leurs points de superposition et à la réduction de l'espacement entre les mèches, puis ensuite à la compaction latérale des mèches de chaîne et de trame une fois celles-ci en contact. La définition classique du cisaillement implique une rotation relative des mèches de chaîne et de trame aux points de superposition. C'est grâce à ce mode de déformation qu'il est possible de draper un tissu sur des surfaces présentant des courbures doubles tel que discuté à la Section 3.3. Le tissu peut subir de grandes déformations, ce qui permet d'éviter le flambement lorsqu'il est déposé dans un moule. On note qu'il est possible de cisiller un tissu par l'application de forces ou de déplacements parallèles aux mèches, mais non colinéaires l'un à l'autre. On note aussi que dans un cisaillement classique, la distance entre les points de superposition ("crossovers") ne varie pas, et donc que la distance entre les mèches de trame, définie perpendiculairement aux mèches de chaîne, diminue lors du cisaillement. Il en va de même pour les mèches de chaîne ; donc si l'épaisseur du tissu demeure constante, la fraction volumique augmente avec une diminution

de l'angle défini entre les mèches de chaîne et de trame [5].



FIGURE 3.18 – Force de cisaillement appliquée à un tissu

Il est possible d'analyser le comportement d'un tissu sec en cisaillement avec différentes méthodes. Les deux principales méthodes pour l'évaluation du cisaillement de tissus secs sont l'essai en cadre articulé et l'essai de traction en biais.

Essai de cisaillement en cadre articulé

Le tissu est positionné dans un cadre articulé, par lequel est appliqué un cisaillement qui augmente progressivement jusqu'à une augmentation importante de la force et/ou un flambement du tissu dans le plan. Les mêmes essais peuvent être effectués sur des empilement de plusieurs plis de tissus. La Figure 3.19 montre un cadre articulé permettant de mesurer le comportement en cisaillement d'un tissu ou d'un empilement. Il faut toutefois noter 3 limitations importantes à cet essai :

1. Le cisaillement est imposé sur l'ensemble de l'échantillon par les conditions d'ancrage. On ne peut donc pas savoir quels défauts localisés apparaîtraient

dans des conditions de fabrication réelles où le cisaillement n'est pas guidé de façons aussi extensive ;

2. L'ancrage des mèches dans les membrures du cadre ne permet pas leur rotation ; on vient donc imposer une flexion localisée et artificielle de toutes les mèches aux points d'ancrage ;
3. Le cisaillement est strictement à plat.

L'angle de cisaillement γ est défini selon les équations 3.10 et 3.11 en fonction des paramètres illustrés à la Figure 3.19.

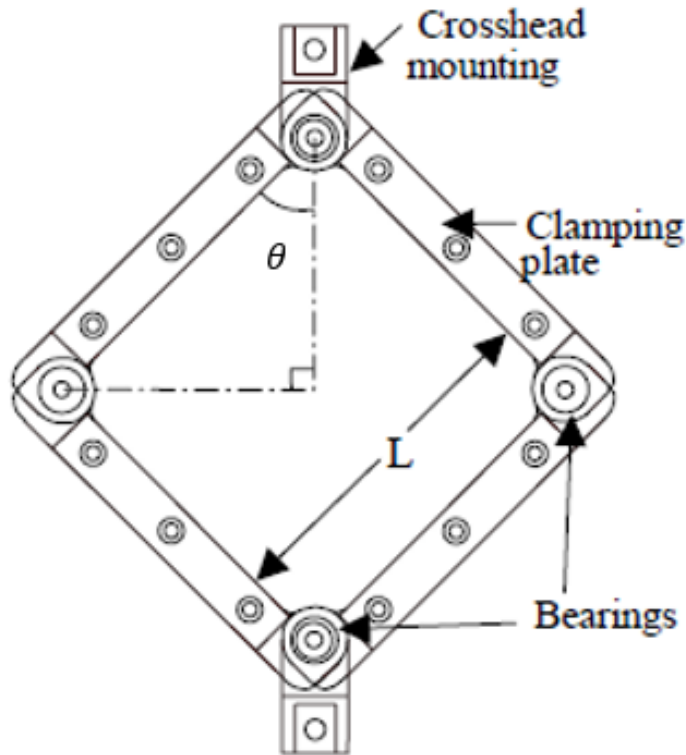


FIGURE 3.19 – Détails du cadre articulé [12]

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\theta \quad (3.10)$$

Avec l'équation suivante pour l'angle θ :

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{2}L_{frame} + d}{2L_{Frame}} = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{d}{2L_{Frame}} \quad (3.11)$$

Où d est la distance parcourue par la partie mobile du cadre et L la longueur du côté du cadre. La combinaison de ces deux équations permet de déterminer l'angle de cisaillement γ .

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2 \cdot \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{d}{2L_{Frame}}\right) \quad (3.12)$$

Cette valeur d'angle de cisaillement est considérée comme l'angle de cisaillement moyen de l'échantillon. Localement, cet angle est susceptible de varier.

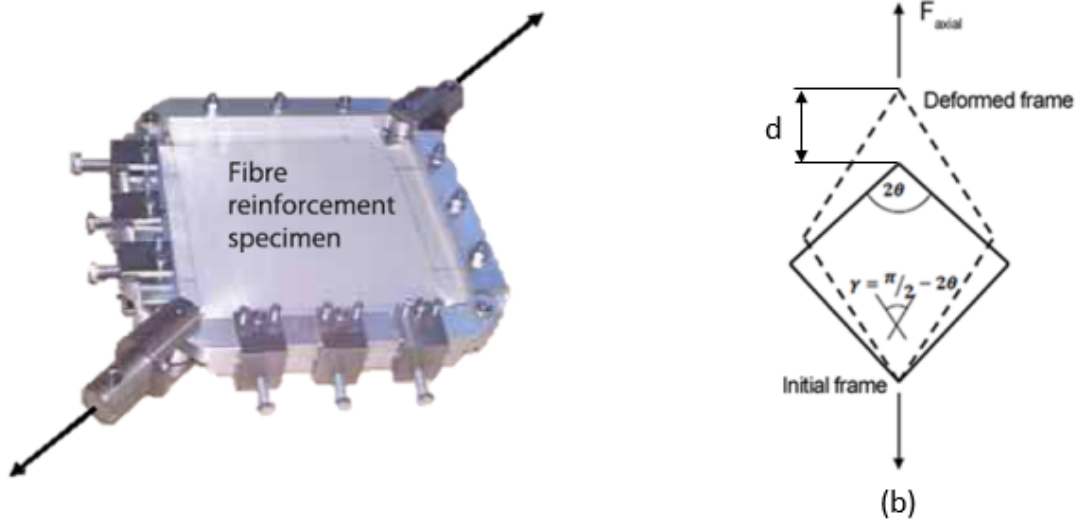


FIGURE 3.20 – Élongation du cadre articulé [12, 13]

Lors de l'essai présenté à la Figure 3.20, l'échantillon est sollicité en cisaillement pur. La force et le déplacement du cadre sont enregistrés et la force de cisaillement du tissu est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$F_S = \frac{F_{axiale}}{2\cos\theta} \quad (3.13)$$

Où F_{Cis} est la force de cisaillement équivalente, et F_{Axiale} est la force axiale appliquée sur le cadre. Selon la taille du cadre ainsi que sa forme, un facteur d'amplification peut être défini par l'équation 3.14. La Figure 3.21 montre le montage amplificateur.

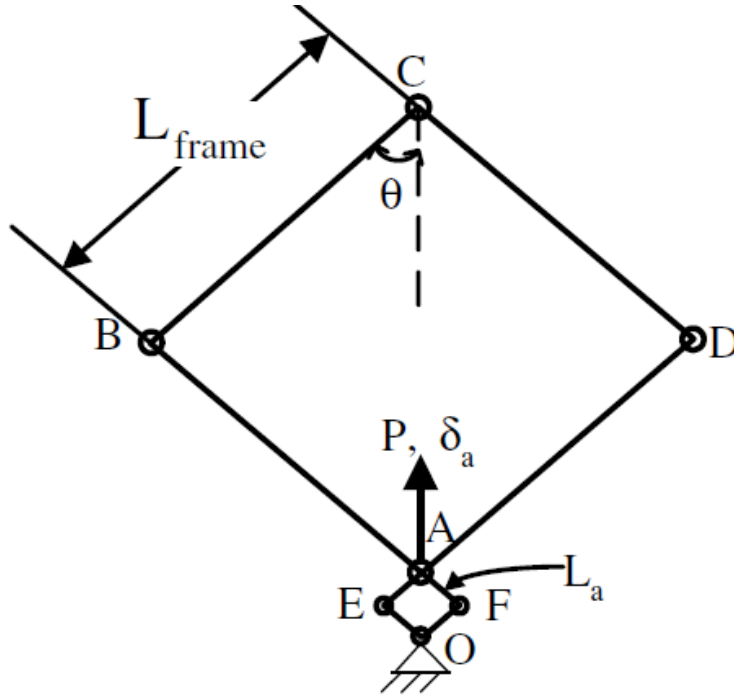


FIGURE 3.21 – Montage amplificateur pour l'essai de cisaillement avec cadre articulé [17]

$$\alpha = \frac{L_{Frame}}{L_a} \quad (3.14)$$

Dans ces conditions, on obtient une force de cisaillement différente :

$$F_S = \frac{F_{Axiale}}{2\alpha \cos\theta} \quad (3.15)$$

Afin d'obtenir des résultats comparables entre les différents montages expérimentaux, les forces de cisaillement sont normalisées :

$$F_{Normalized} = F_S \cdot \frac{L_{Frame}}{L_{Fabric}^2} \quad (3.16)$$

Où L_{Fabric} est la longueur du tissu soumise au cisaillement et L_{Frame} est la longueur du cadre, Figure 3.21.

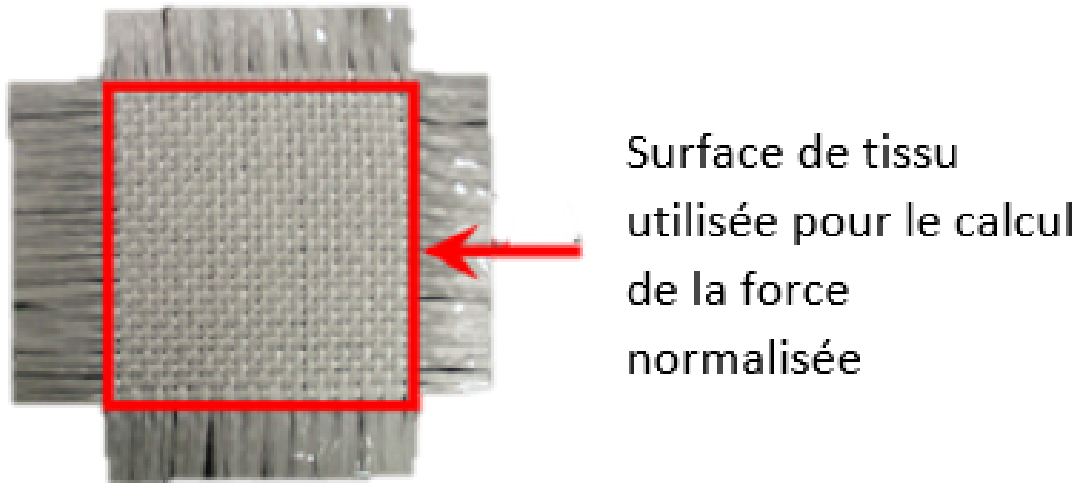


FIGURE 3.22 – Surface cisailée lors d'un essai de cisaillement [14]

Afin d'étudier l'influence des conditions expérimentales selon les moyens à disposition, différents laboratoires ont effectué des essais en modifiant certains paramètres tel que la taille de cadre, la vitesse de sollicitation, etc.

Les résultats de ces investigations montrent que la normalisation de la force permet une comparaison correcte des résultats expérimentaux (Figure 3.26).

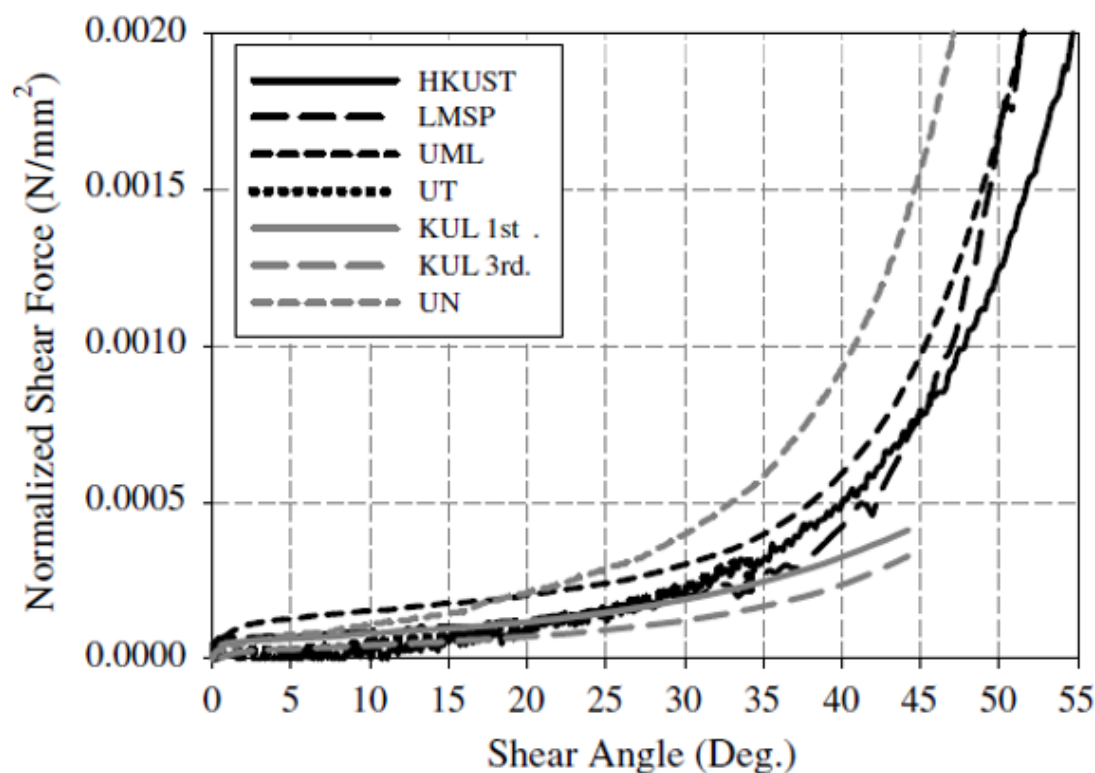


FIGURE 3.23 – Exemples de résultats d'essais effectués avec un cadre articulé [14]

Essai de traction en biais

L'essai de traction en biais consiste à effectuer un essai de traction sur un échantillon de tissu rectangulaire où les mèches de chaîne et de trame sont orientés à $\pm 45^\circ$ de la longueur, Figure 3.26. La longueur initiale de l'échantillon doit être au moins deux fois sa largeur de manière à ce que les fibres de la zone C soient libres à leurs extrémités. En effet, si l'on considère qu'il n'y a pas de glissement entre les fils de chaîne et de trame et que les fibres ne sont pas extensibles, la zone C de l'échantillon est sollicitée en cisaillement pur.

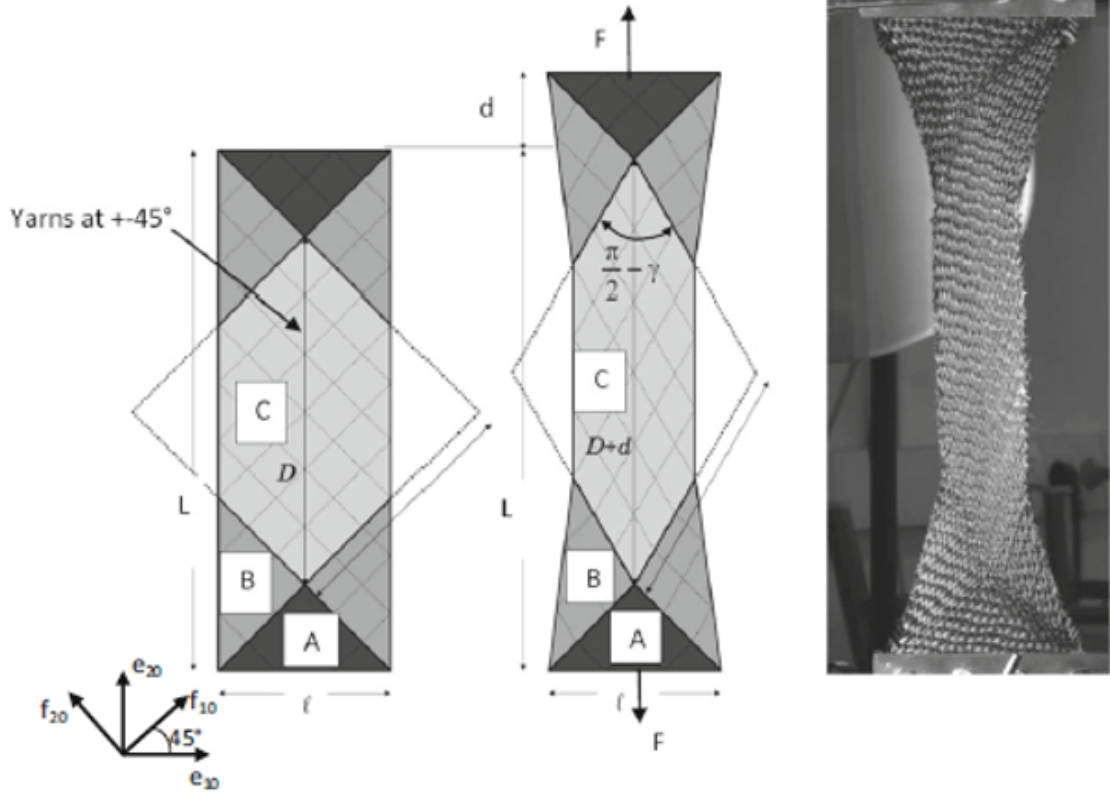


FIGURE 3.24 – Concept de l'essai de traction en biais pour l'évaluation du cisaillement [16]

L'angle de cisaillement est défini comme suit :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\theta \quad (3.17)$$

avec

$$\cos\theta = \frac{D+d}{\sqrt{2}D} \quad (3.18)$$

En combinant ces deux équations, γ peut être obtenu :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D+d}{\sqrt{2}D}\right) \quad (3.19)$$

avec $D = L - l$ la longueur de la zone centrale C.

Comme décrit ci-dessus, il existe 3 zones distinctes dans l'échantillon compliquant le calcul de la force de cisaillement dans la zone de cisaillement pur. On peut déterminer la force de cisaillement en fonction de l'angle de cisaillement de cette zone en considérant les hypothèses suivantes : (a) les angles de cisaillement sont considérés uniformes sur chaque zone ; (b) le cisaillement dans la zone C est 2 fois plus élevé que dans la zone B ; (c) il n'y a pas de cisaillement dans la zone A ; (d) l'échantillon de tissu est initialement exactement orienté à $\pm 45^\circ$ avec ses mèches [14, 15].

$$F_S(\gamma) = \frac{1}{(2L - 3l)\cos\gamma} \cdot \left(\left(\frac{L}{l} - 1 \right) \cdot F \cdot \left(\cos\frac{\gamma}{2} - \sin\frac{\gamma}{2} \right) - l \cdot F_S\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cos\frac{\gamma}{2} \right) \quad (3.20)$$

où L et l sont respectivement la longueur et la largeur initiale de l'éprouvette.

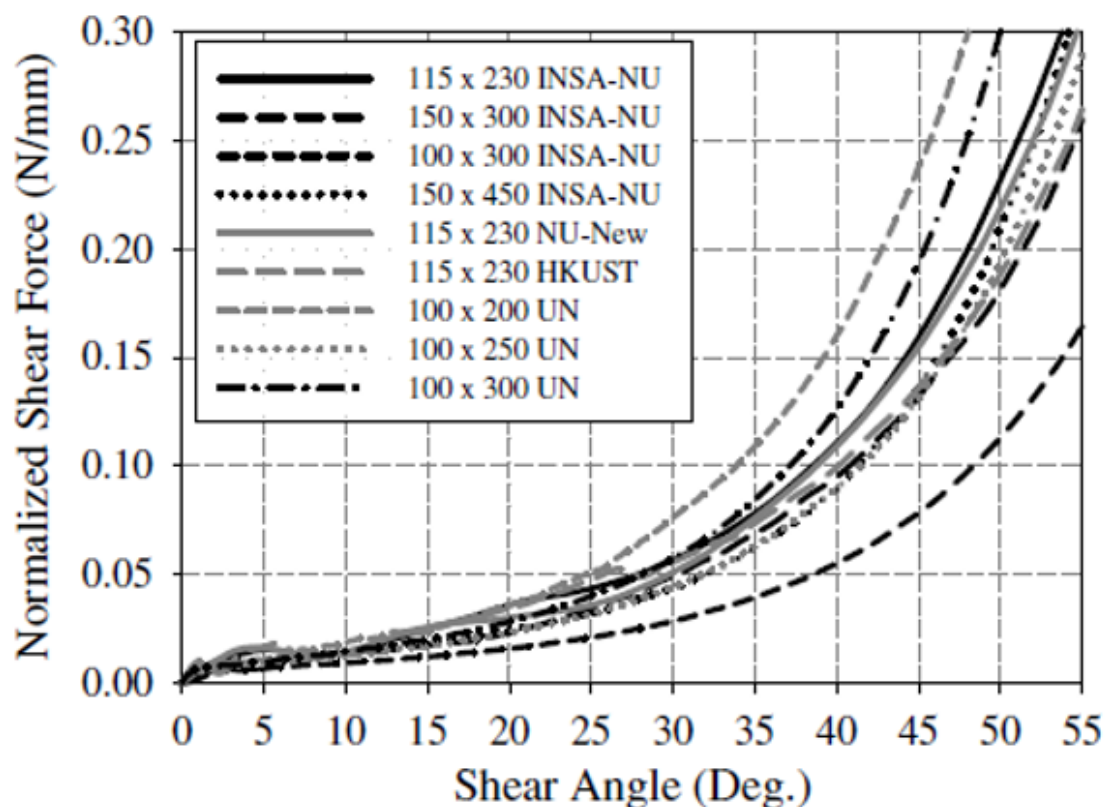


FIGURE 3.25 – Exemples de résultats des essais de cisaillement avec l'essai de traction en biais [14]

Le calcul théorique de la force de cisaillement est valable jusqu'à un angle de cisaillement de 30-35°, puis, les essais menés par Cao et al [14] montrent qu'il est préférable au-delà de cet angle, d'utiliser une méthode d'analyse optique menant à des résultats plus fiables.

Comparaison des deux méthodes

La zone A des échantillons soumis à un essai de cisaillement par extension en biais demeure non déformée puisqu'une de ses extrémités est pincée dans l'outillage et la zone B subit un angle de cisaillement moitié moindre que celui de la zone C. On considère que les angles de cisaillement sont constants par zone.

La présence des zones A, B et C est moins simple que la zone intégralement soumise

à un cisaillement pur de l'essai avec cadre articulé. Cependant, les fibres de la zone C sont libres à leurs extrémités, ce qui constitue un avantage certain par rapport à l'essai avec cadre articulé où les fibres sont pincées dans le cadre, engendrant des tensions dans celles-ci. L'étude [15] montre que les tensions dans les fibres influencent fortement les résultats de force de cisaillement (Figure 3.26). En effet, lorsque les tensions sont réduites à zéro dans les essais avec le cadre articulé, les résultats sont proches de ceux obtenus par l'essai de traction en biais.

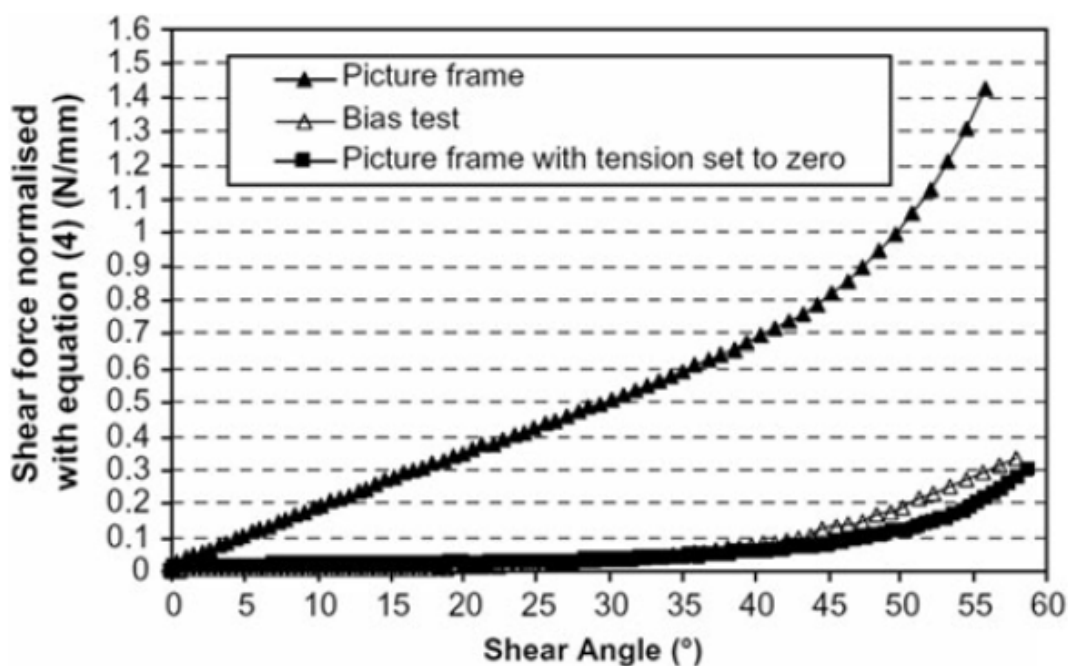


FIGURE 3.26 – Comparaison pour les deux méthodes disponibles pour l'évaluation du cisaillement [15]

Un deuxième avantage de l'essai de traction en biais face à l'essai avec cadre articulé est la simplicité de cet essai. Par ailleurs, des résultats d'essais présentés dans la référence [14] montrent l'influence de la température et de la vitesse de sollicitation du tissu, qui ont un effet marqué sur le comportement en cisaillement de ce dernier.

3.2.4 Compaction

La compaction est une compression effectuée perpendiculairement aux directions des mèches et au plan du tissu. Le comportement en compaction n'est pas linéaire ni élastique, le tissu subit de grandes déformations. La compaction est critique à l'atteinte de fractions volumiques élevées dans les pièces. La Figure 3.27 montre une force de compaction appliquée sur un tissu toile [6].

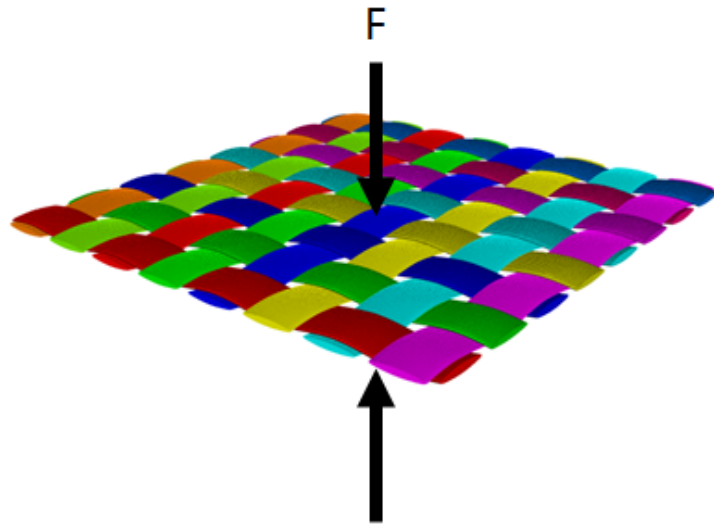


FIGURE 3.27 – Force de compaction sur un tissu

Comme indiqué au début de la Section 3.1.4, la fraction volumique de fibre est inversement proportionnelle à l'épaisseur du textile. La compaction permet de diminuer l'épaisseur et ainsi d'augmenter la fraction volumique de fibre. Comme démontré dans la référence [6], lorsqu'un textile subit des cycles de compaction répétés ("debulk"), les fibres se réorganisent et l'épaisseur du textile diminue. Le textile peut subir plusieurs séries de compaction successives et les fibres continuent de se réorganiser, ce qui diminue l'épaisseur davantage et augmente la fraction volumique. La Figure 3.28 montre les résultats de cycles de compaction successifs. De plus, de tels cycles de compaction permettent généralement d'augmenter l'ho-

mogénéité de la fraction volumique d'une préforme puisque les fibres se déplacent vers des zones vides, diminuant les espaces libres entre les mèches. [6]

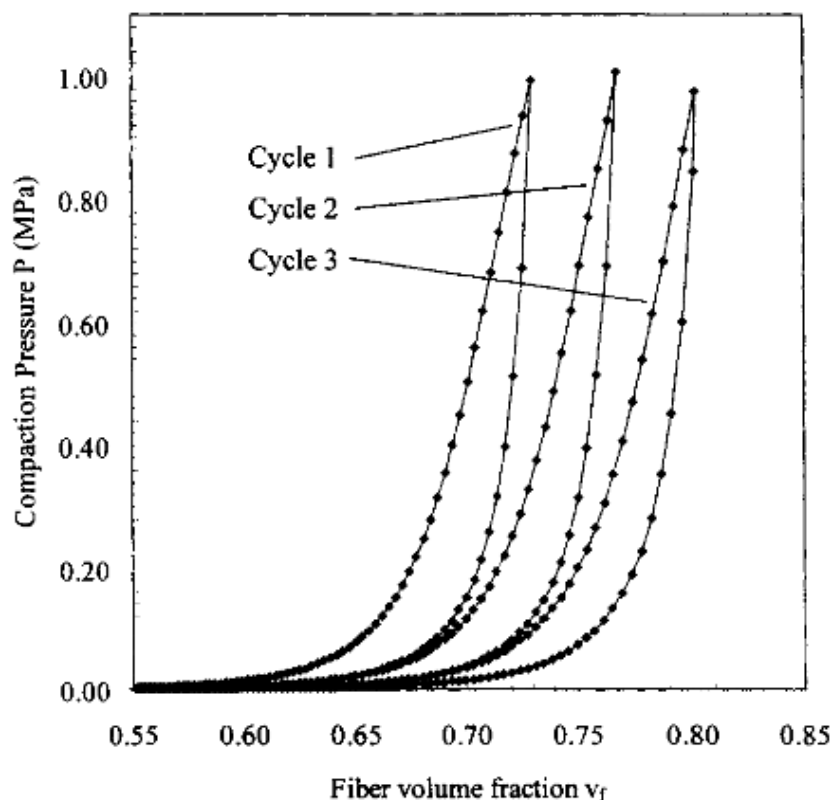


FIGURE 3.28 – Fraction volumique de fibre en fonction des cycles de compaction [6]

Lors de la fabrication de pièces, la pression exercée sur le textile dépend du procédé de fabrication utilisé. Dans le cas d'un moulage par infusion de résine sous vide, la pression initiale exercée sur la fibre est équivalente à la pression atmosphérique, soit environ 100 kPa. Par contre, lorsque la résine entre dans la préforme, cette pression totale est partagée entre la préforme et la résine. La pression en un point donnée augmente dans la résine alors que le front s'éloigne, en raison du gradient de pression requis pour l'écoulement, et donc la pression sur la préforme en ce même point diminue. L'épaisseur de la préforme augmente donc lors de l'infusion, pour diminuer à nouveau lorsque l'entrée de résine est fermée. Sur la Figure 3.28,

la pression exercée est 10 fois plus élevée que la pression atmosphérique, correspondant à un moulage par transfert de résine entre un moule mâle et un moule femelle, tous les deux étant rigides à toutes fins pratiques [6].

3.3 Défauts liés au drapage

Plusieurs défauts peuvent se produire lors du drapage et/ou du formage d'une préforme. Ces défauts se produisent généralement lors de manipulations ou lorsque la géométrie à draper comporte des zones spécifiques, par exemple des coins extérieurs et intérieurs, ou des zones favorisant le cisaillement de la préforme. Les tensions, contraintes et déplacements appliqués dans la préforme peuvent aussi engendrer des défauts. Il convient ici de mentionner l'importance des échelles de grandeur lorsqu'on discute de comportement de préformes et de défauts. Le formage et/ou le drapage peuvent se dérouler correctement à l'échelle macroscopique où l'ensemble d'un patron se dépose tel que prévu, lorsque considéré comme une pièce continue, mais des défauts peuvent être observés à l'échelle mésoscopique ou des quantités telles que la distance entre les mèches prennent toute leur importance.

3.3.1 Glissement relatif des plis superposés

Le drapage sur une surface courbe peut résulter en un glissement des tissus composant la préforme. Ce défaut se produit dans les courbes convexes et concaves, ou sous tension. Dans les courbes convexes, le dernier pli de tissu à l'extérieur de

la préforme doit se conformer à un rayon de courbure supérieur à celui des autres plis de tissus. Ceci implique un déplacement relatif des plis en bout de préforme, tel qu'illustré à la Figure 3.29a. Ce défaut peut se produire aussi dans les courbes concaves, avec un rayon de courbure plus petit pour les plis de tissu localisés dans l'intérieur de la courbe, Figure 3.29b. Dans ce cas, l'effet ne peut être compensé.

[5]

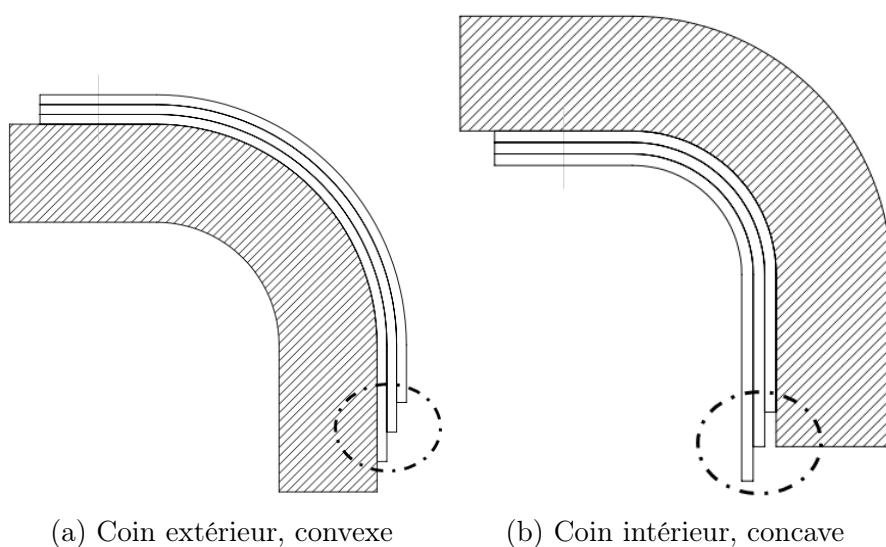


FIGURE 3.29 – Glissement relatif des plis de tissus dans les coins d'une préforme

3.3.2 Défauts résultant d'une tension

L'application d'une tension sur la préforme peut réduire le glissement relatif dans le cas convexe, et éviter le flambement lors du drapage, permettant l'automatisation potentielle du drapage. La force de tension peut être appliquée en fixant certains côtés de la préforme sur le moule. Par contre, différents défauts peuvent survenir dû à cette force. Sur un coin extérieur, la tension T peut engendrer une compaction de la préforme localisée dans la courbe. Cette force provoque une com-

paction dans la préforme et l'épaisseur de la pièce finale et sa fraction volumique est donc variable, tel qu'illustré à la Figure 3.30a. L'épaisseur t est inférieure dans la courbe et donc la fraction volumique de fibre à cet endroit augmente. Cette compaction est importante à considérer lors de la conception d'une pièce en composite utilisant le procédé de moulage par transfert de résine (RTM). Cet effet est aussi à considérer avec le procédé d'infusion sous vide, mais l'impact est moins critique. En contrepartie, on ne peut appliquer de tension lorsque la préforme est drapée sur une courbe concave sauf si un contre-moule est utilisé. Dans ce cas, un vide peut apparaître sous la préforme, tel qu'illustré à la Figure 3.30b. Ceci peut engendrer une région riche en résine dans la pièce composite finale [2, 5].

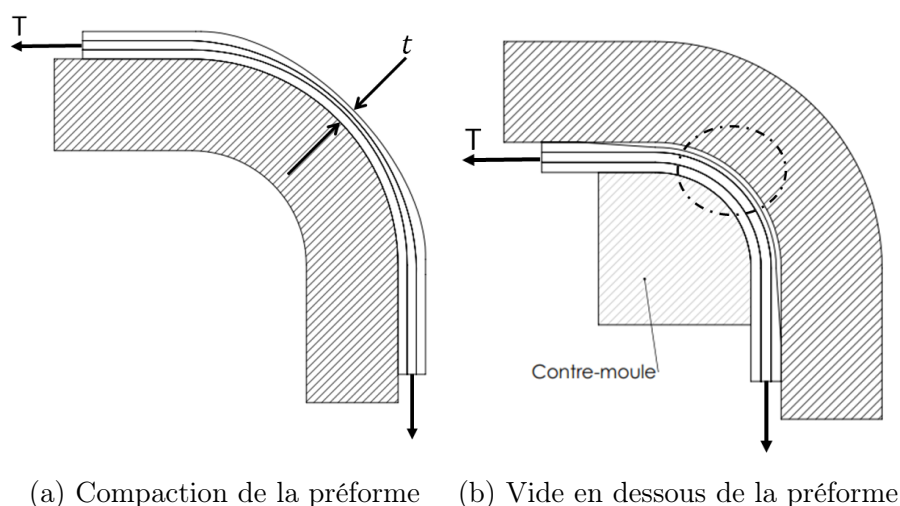


FIGURE 3.30 – Défauts dus à une force de tension appliquée sur une préforme

Lorsque la préforme est fixée à certains endroits sur le moule, il peut y avoir flambement : la fixation de la préforme peut empêcher le glissement des tissus, Figure 3.31.

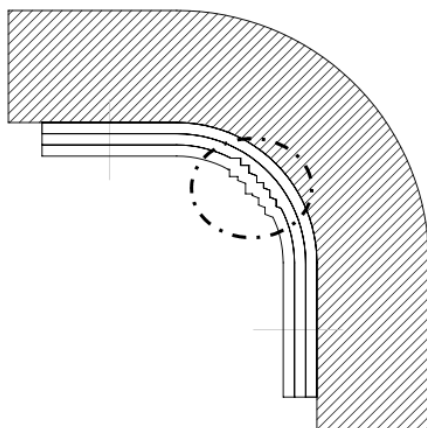


FIGURE 3.31 – Flambement dans les tissus d’une préforme

3.3.3 Distance entre les mèches

Tel que mentionné à la sous-section 3.2.3, l’application d’une force de cisaillement dans un tissu permet de favoriser le drapage. Par contre, un cisaillement du tissu diminue l’espace entre les mèches et peut ainsi augmenter la fraction volumique de fibre dans le composite. Lorsqu’un tissu est cisailé, les mèches se compactent latéralement une fois qu’elles ont fait contact. Ensuite, si le tissu revient à sa configuration originale, la compaction latérale des mèches des fils résulte en une augmentation de la distance entre les mèches ce qui diminue le facteur de couverture final, augmente la fraction volumique de fibre dans les mèches, mais diminue la fraction volumique nominale, pour une fraction volumique totale inchangée. La Figure 3.32 illustre ce processus. [5]

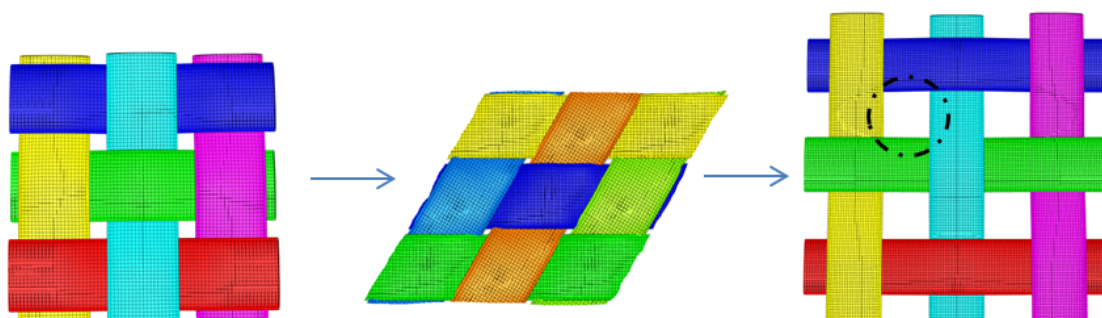


FIGURE 3.32 – Ouverture dans un tissu dû au cisaillement

Le déplacement relatif des mèches dans le tissu peut causer des variations au niveau de la fraction volumique de fibre et aussi des zones riches en résine. Par exemple, la Figure 3.33 illustre le déplacement d'une mèche dans un tissu. Dans ce cas, la mèche verticale située au milieu est déplacée vers la droite. La région de gauche contient donc une fraction volumique inférieure à celle de la région de droite.

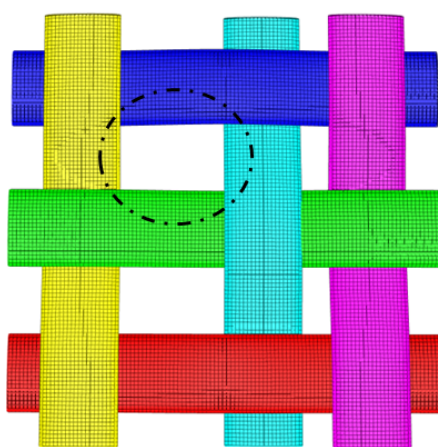


FIGURE 3.33 – Déplacement d'une mèche

3.3.4 Petit rayons

Des défauts localisés peuvent se produire lorsque les rayons de courbure des moules sont du même ordre de grandeur que les mèches du tissu. Les mèches peuvent glisser autour d'un coin ayant un petit rayon et avoir de la difficulté à draper le

coin. Cette situation peut exagérer le glissement des mèches dans le plan.

3.4 Conclusion

Dans le cadre de cette thèse, beaucoup de développements sont effectué sur des sujets pour lesquels peu de littérature est disponible. Les différents types de renfort et leur architecture, les comportements mécaniques des tissus secs ainsi que les défauts liés au drapage sont considérés dans tous les aspects du travail.

Chapitre 4

Matériaux et Méthodes

Ce chapitre inclus la description des tissus utilisés, une étude du comportement du drapage sur des pièces de Hutchinson, et une élaboration des concepts d'outil développés pour évaluer les caractéristiques géométriques repérées sur les géométries.

Quatre tissus étant disponibles chez Hutchinson ont été sélectionnés afin de caractériser les comportements et limitations de différents tissus. À partir de ces quatre tissus, une étude du comportement du drapage a été effectuée sur plusieurs pièces complexes chez Hutchinson, et des caractéristiques influençant le drapage des tissus ont été identifiées. Puis, des outils de caractérisation ont été conçus afin de permettre la comparaison rapide de différents tissus.

4.1 Tissus utilisés

4.1.1 Tissu toile de verre style 7500

Le tissu style 7500 est un tissu toile de verre ayant une densité surfacique de 325 g/m^2 et une épaisseur moyenne par pli de 0.34 mm à une fraction volumique d'environ 55%. Les mèches de verre torsadées sont de type EC9 134 x2. Ce tissu compte 6.3 mèches/cm dans la direction de la chaîne et 5.5 mèches/cm dans la direction de la trame (Annexe A, type 7500).

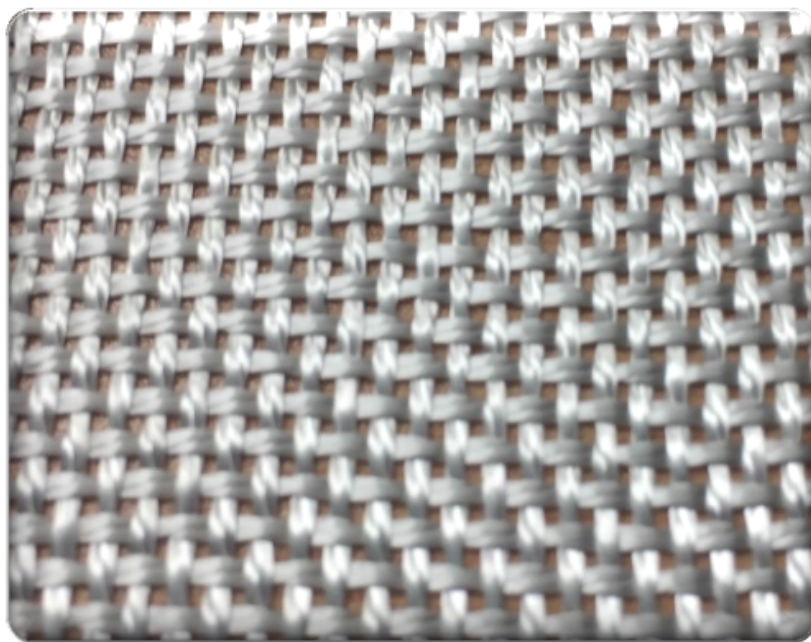


FIGURE 4.1 – Tissu toile de verre style 7500

4.1.2 Tissu satin 8 de verre style 7781

Le tissu style 7781 est un satin 8 de verre ayant une densité surfacique de 303 g/m^2 et une épaisseur moyenne par pli de 0.23 mm à une fraction volumique d'environ 55%. Les mèches de verre sont de type EC6 66 x2 non torsadées. Ce tissu compte

22.4 mèches/cm dans la direction de la chaîne et 21.3 mèches/cm dans la direction de la trame (Annexe A, type 7781).

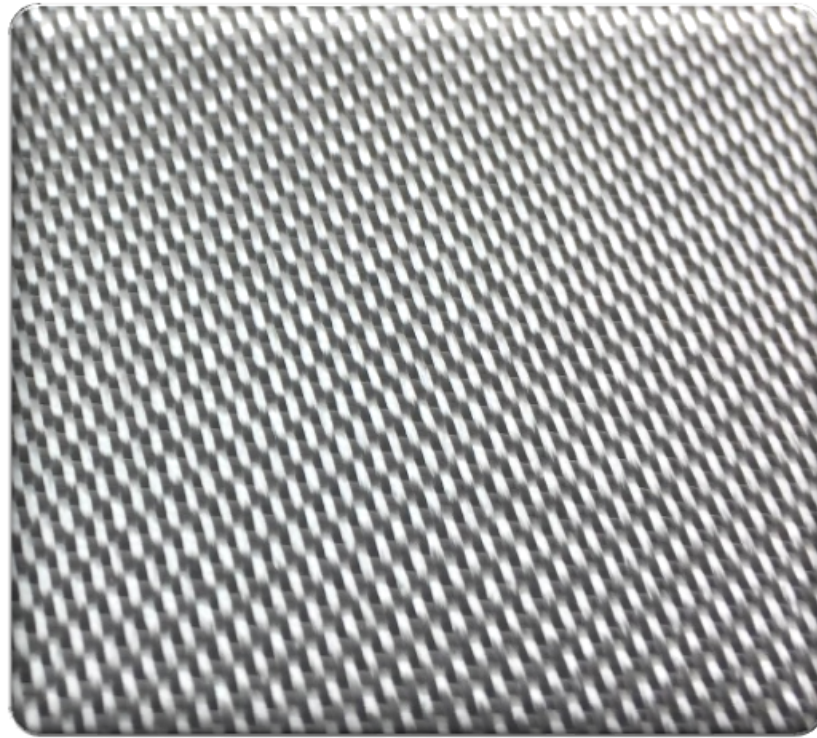


FIGURE 4.2 – Tissu satin 8 de verre 7781

4.1.3 Tissu sergé de carbone style 1040

Le tissu style 1040 (TC-12-T) est un sergé ("twill") de carbone ayant une densité surfacique de 405 g/m^2 et une épaisseur moyenne par pli de 0.43 mm à une fraction volumique d'environ 55%. Ce tissu est fait de mèches en carbone non torsadées de 6K filaments de type Toray TC-12-T. Ce tissu compte 5 mèches/cm dans la direction de la chaîne et 5 mèches/cm dans la direction de la trame. (Annexe A, type TC-12-T)

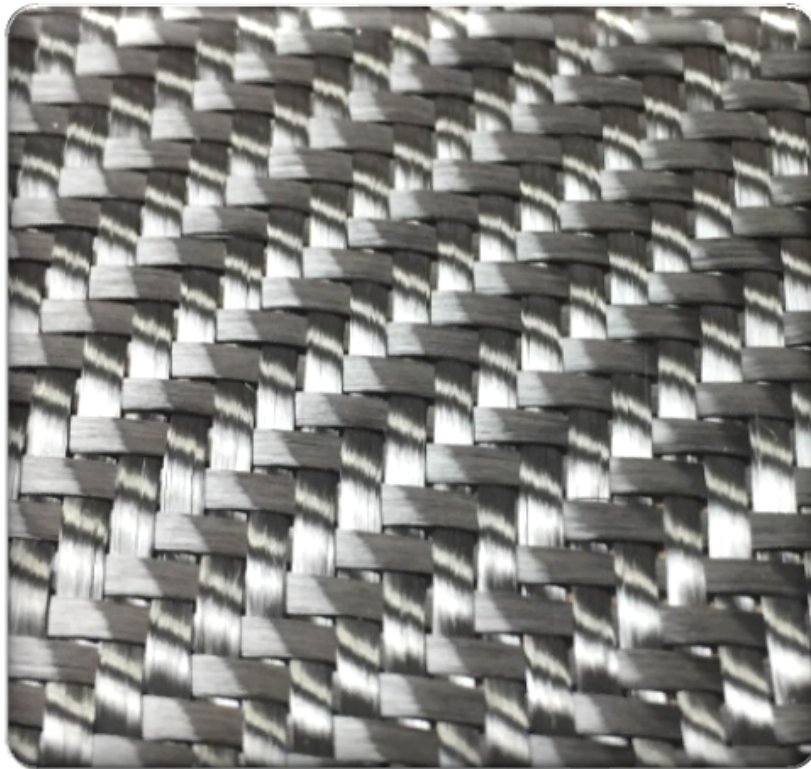


FIGURE 4.3 – Tissu sergé de carbone style 1040

4.1.4 Tissu satin 5 de carbone style 4540

Le tissu style 4540 est un satin 5 de carbone ayant une densité surfacique de base de 380 g/m^2 avec 24 g/m^2 de poudre d'époxy appliquée sur les deux faces pour un total de 404 g/m^2 , et une épaisseur moyenne par pli de 0.45 mm à une fraction volumique d'environ 55%. Ce tissu a des mèches de carbone 6K filaments de type Tenax HTA40 E13 non torsadées. Ce tissu compte 4.6 mèches/cm dans la direction de la chaîne et 4.6 mèches/cm dans la direction de la trame (Annexe A, style 4540).

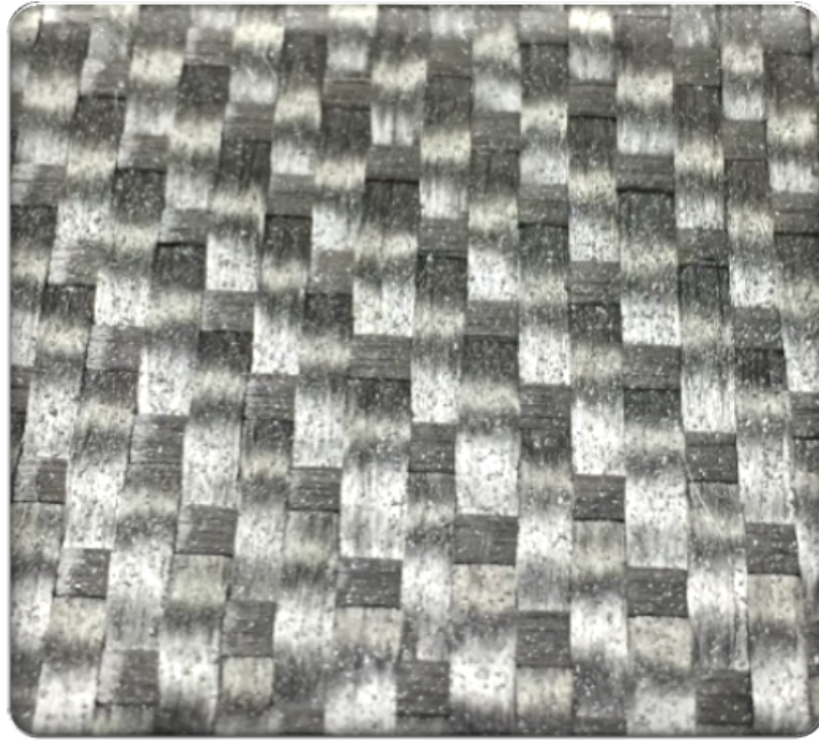


FIGURE 4.4 – Tissu satin 5 carbone 4540

4.2 Étude de comportement du drapage

Le comportement d'un tissu lors du drapage d'un moule est affecté par les caractéristiques du tissu ainsi que par la géométrie du moule sur lequel ce tissu est drapé. Les caractéristiques des tissus secs sont définies en considérant divers aspects du tissu influençant le drapage soit le cisaillement, la flexion, la friction entre les plis et avec le moule, ainsi que la stabilité. Chacunes de ces caractéristiques sont détaillées dans ce chapitre. Selon la géométrie à draper, certaines caractéristiques du tissu auront plus d'impact sur le drapage que d'autres.

Plusieurs géométries typiques ont été observées sur les pièces de Hutchinson. Ces géométries typiques ont été nommées géométries de base. La géométrie complexe

d'une pièce ou d'un moule peut être décomposée en plusieurs géométries de base, ce qui facilite l'analyse de cette géométrie complexe. Les caractéristiques des tissus ainsi que les géométries de base ont été déterminées en analysant un grand nombre de pièces chez Hutchinson. Le comportement des tissus est caractérisés en quantifiant des géométries de base repérées sur des moules complexes.

L'analyse du comportement des tissus sur les géométries de base permet de savoir si un tissu donné peut être drapé sur une certaine combinaison de géométries. Pour ce faire, le comportement des tissus doit être analysé afin de connaître les effets des caractéristiques impliquées dans le drapage d'une géométrie de base donnée.

Des caractéristiques spécifiques au drapage de tissus ont été identifiées. Ensuite, les géométries de base sont quantifiées selon les paramètres influençant le drapage, comme par exemple un rayon ou l'angle d'un coin extérieur. Chacune de ces géométries doit être caractérisée en considérant les mêmes caractéristiques des tissus soit le cisaillement, la flexion, la friction et la stabilité. Ayant donc quantifié la difficulté associée aux géométries de base, il est possible de déterminer si une géométrie spécifique peut être drapée par un tissu donné. Ce processus permet aussi de différencier le drapage de différents tissus sur une géométrie spécifique.

La caractérisation du comportement des tissus lors du drapage doit considérer les aspects du comportement des tissus qui entrent en jeu lors de la production de pièces chez Hutchinson. Cette caractérisation doit permettre de déterminer rapidement quel tissu peut être utilisé en fonction de la géométrie du moule, des orientations de fibre et des restrictions mécaniques imposées sur les préformes. Cette caractérisation doit également être utilisée pour déterminer un temps de

drapage lors de la soumission d'un projet.

La Figure 4.5 illustre deux pièces typiques de complexités différentes : la pièce résultant des moules M04603 et M02772. Au total, 5 pièces complexes ont été analysées dans le cadre de cette thèse. Les détails sur ces pièces se retrouvent à l'annexe C.

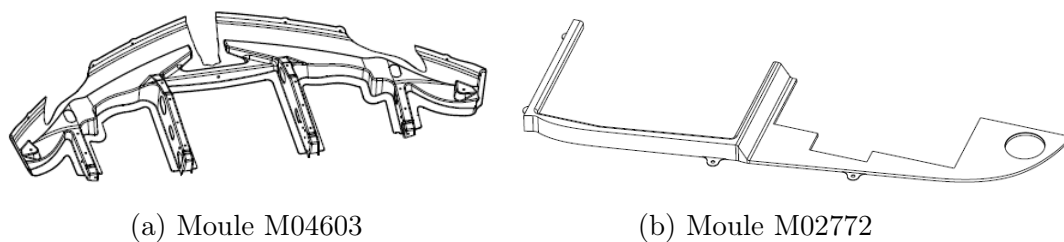


FIGURE 4.5 – Pièces choisies pour l'analyse du drapage

Toutes les descriptions des caractéristiques présentées dans les prochaines sections sont fortement inspirées du contenu du chapitre 3.

4.2.1 Cisaillement dans le plan

Angle de blocage

Le cisaillement dans le plan est défini par la capacité d'un tissu à se déformer dans le plan par rotation relative de ses mèches, qui sont initialement perpendiculaires. L'angle de blocage est défini par l'angle de cisaillement maximal auquel un tissu peut se déformer avant de flamber et de présenter des ondulations dans le plan. Afin de permettre le drapage, un tissu doit pouvoir être cisailé au-delà d'un angle de cisaillement maximal imposé lors du drapage d'une pièce donnée, sans créer de plis dans le tissu. Certaines géométries à courbure double induisent

un cisaillement dans les tissus lors du drapage. Par exemple, un coin extérieur, un coin intérieur, une cavité ou une protubérance vont généralement cisailer un tissu lors du drapage.

La Figure 4.6 illustre des zones de cisaillement plan sur le moule M04603 et "Le Poisson".

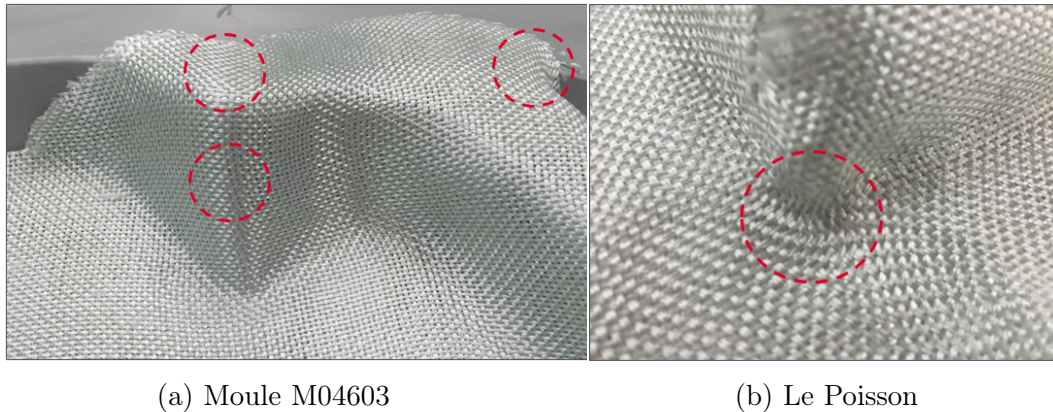


FIGURE 4.6 – Cisaillement localisé sur 2 pièces analysées

Lorsqu'il n'est pas possible de draper un tissu sur une géométrie donnée, on peut couper le tissu afin d'interrompre la continuité de certaines mèches et de réduire les restrictions liées au cisaillement. Par contre ceci requiert des manipulations supplémentaires et réduit les propriétés structurelles des pièces résultantes. Dans certains cas, la capacité d'un tissu de supporter des angles de cisaillement plus élevés permet de réduire l'ampleur de coupes nécessaires dans le tissu.

Aussi, il est important de considérer l'orientation des fibres non seulement pour leur effet au niveau du cisaillement, mais aussi en fonction du positionnement des goupilles. Le cisaillement et un choix judicieux de l'orientation des fibres peuvent permettre d'annuler une tension des mèches entre deux goupilles.

Retour en cisaillement

Chaque géométrie nécessite qu'un tissu puisse atteindre un certain angle de cisaillement maximal afin d'assurer un bon drapage. Par contre, une fois drapés, certains tissus montrent un certain retour élastique en cisaillement, ce qui complexifie le drapage. Le retour en cisaillement est donc une caractéristique importante à prendre en considération lorsqu'on veut quantifier la capacité au drapage d'un tissu.

4.2.2 Flexion

La flexion est définie par le rayon minimal atteint par un tissu dans un coin intérieur simple ainsi que par le retour élastique en flexion. Le rayon minimal de flexion de chaque tissu doit correspondre avec le rayon minimal de la pièce à draper. Après plusieurs essais de flexion sur des pièces chez Hutchinson, tous les tissus pouvaient se conformer à n'importe quel rayon sous une force suffisante. Le retour élastique en flexion est donc l'aspect de la flexion qui affecte le plus le drapage.

Le retour élastique en flexion des tissus est défini par la capacité d'un tissu à être plié sur une géométrie spécifique, et à rester en place. En production, cette caractéristique permet au tissu de rester drapé durant le positionnement du sac-à-vide ou membrane. Elle peut dépendre du diamètre des mèches, du type de tissu, du matériau des fibres, du facteur de couverture, du rayon minimal de flexion et de la friction entre les plis et avec le moule.

La Figure 4.7 illustre des petits rayons de flexion sur le moule M04603.

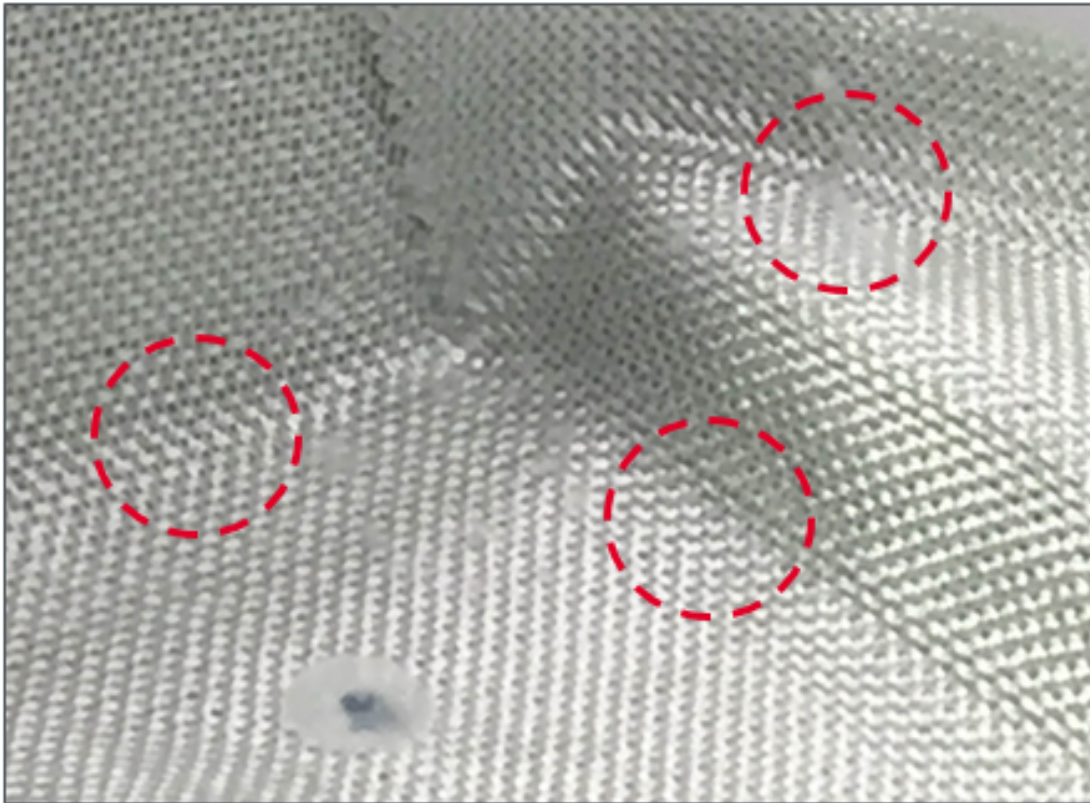


FIGURE 4.7 – Flexion de différentes courbures sur le moule M04603

4.2.3 Friction

Friction entre les plis

La friction entre les plis est définie par la capacité de mouvement relatif dans le plan des plis d'un patron les uns relativement aux autres. Ce facteur est à considérer lorsque la pièce à draper contient de grandes surfaces courbes ou de longues surfaces complexes. La résistance à la friction entre les plis dépend du diamètre des mèches, du type de tissu, des torsades dans les mèches, du facteur de couverture et du matériau.

Friction avec le moule

La friction avec le moule est définie par la capacité de mouvement dans le plan de la préforme relativement à la surface du moule. Ce facteur est à considérer lorsque la pièce à draper contient des parois verticales, de grandes surfaces courbes ou de longues surfaces complexes. La friction avec le moule dépend du diamètre des mèches, du type de tissu, des torsades dans les mèches, du facteur de couverture et du matériau et fini de surface du moule. Afin d'avoir une manipulation plus facile des patrons lors du drapage et d'éviter qu'ils ne se désassemblent avant le drapage, il est préférable d'obtenir un rapport élevé entre la force de friction entre les plis et la force de friction avec le moule.

4.2.4 Stabilité

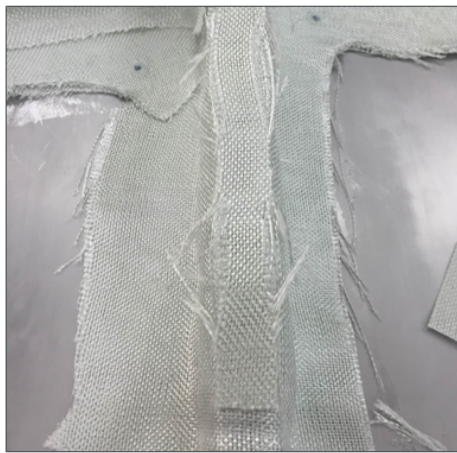
Effilochement

L'effilochement est défini comme étant la susceptibilité d'une mèche localisée sur le bord d'un patron à glisser hors du patron et s'en désassembler. Cette caractéristique est essentielle pour les applications où le fini du contour est nécessaire. Une haute résistance à l'effilochement permet aussi de diminuer le risque de glissement des mèches au centre d'un patron. Cette caractéristique peut dépendre du diamètre des mèches, du type de tissu, du matériau, des torsades dans les mèches, de l'ajout de colle ou de coutures et du facteur de couverture.

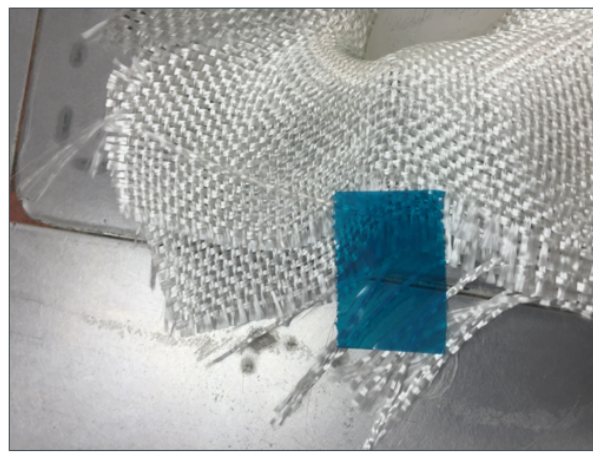
Stabilité au niveau des goupilles

La stabilité au niveau des goupilles est définie comme étant la capacité des mèches dans un tissu à rester en place lors de l'application d'une force près d'une goupille. Cette caractéristique est basée sur le déplacement maximal et l'effilochement au niveau des goupilles. Elle peut dépendre du type de tissu, du matériaux, des torsades dans les mèches, de l'adhésif utilisé, de l'orientation des fibres, du diamètre des mèches et de la distance du bord de la préforme aux goupilles.

La Figure 4.8 illustre des régions où la stabilité du tissu à une importance critique.



(a) Moule M04603



(b) Le Poisson

FIGURE 4.8 – Présence d'effilochement et de glissement sur les pièces analysées

4.2.5 Compaction

La compaction est définie par la capacité d'un tissu à se déformer selon son épaisseur. La compaction permet d'atteindre des fractions volumiques de fibre plus élevées dans les pièces résultantes et de connaître la variation d'épaisseur résultant de la compaction. Selon les essais de drapage effectués sur les moules, la compaction

a un effet mineur sur le drapage et sera donc négligée dans cette thèse.

4.3 Outils de caractérisation portatifs

Les caractéristiques des tissus influençant le drapage ont été identifiées dans la section précédente. Des outils de caractérisation portatifs ont été développés dans le cadre de cette thèse afin de quantifier ces caractéristiques, avec comme objectif principal de comparer différents tissus rapidement. Les résultats d'essais pouvant être effectués avec un outil d'essais universel, tel que l'essai de cisaillement plan dans un cadre articulé présenté au chapitre 3, sont également présentés. De tels essais serviront de validation pour les essais effectués avec les outils de caractérisation portatifs conçues dans le cadre de cette thèse pour une caractérisation rapide. Un objectif secondaire pour les outils de caractérisation portatifs est de permettre un transport facile pour l'évaluation de tissus présentés par des fournisseurs dans le cadre de conférences.

Les outils de caractérisation portatifs ont été développés dans le contexte de cette thèse afin de mesurer rapidement le comportement en cisaillement, en flexion, en friction ainsi qu'en stabilité de façon suffisamment précise. Le cahier des charges pour les outils inclut les requis suivants :

- Rapide d'utilisation
- Facilite l'utilisation
- Logeable dans une valise à main
- Doit permettre la comparaison de différents tissus

- Doit permettre d'évaluer toutes les caractéristiques avec peu d'outils différents

Trois outils de caractérisation ont été conçus afin de permettre la caractérisation complète d'un tissu. Le premier outil de caractérisation dans le plan permet de mesurer toutes les caractéristiques pouvant être mesurées dans le plan tel que le cisaillement, la friction et la stabilité des goupilles. Le deuxième outil permet de mesurer le retour élastique en flexion, et le troisième outil permet de mesurer l'effilochement des tissus.

Aussi, afin de valider l'exactitude des essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation plan, des essais de cisaillement standard avec un cadre articulé sont effectués.

4.3.1 Outil de caractérisation axiale

La conception du premier outil de caractérisation prend en considération toutes les caractéristiques pouvant être mesurés dans le plan :

- La cisaillement maximal
- Le retour élastique en cisaillement
- Le déplacement du tissu autour des goupilles
- La friction entre les plis
- La friction entre les plis et le moule

La Figure 4.9 illustre l'outil de caractérisation axiale.

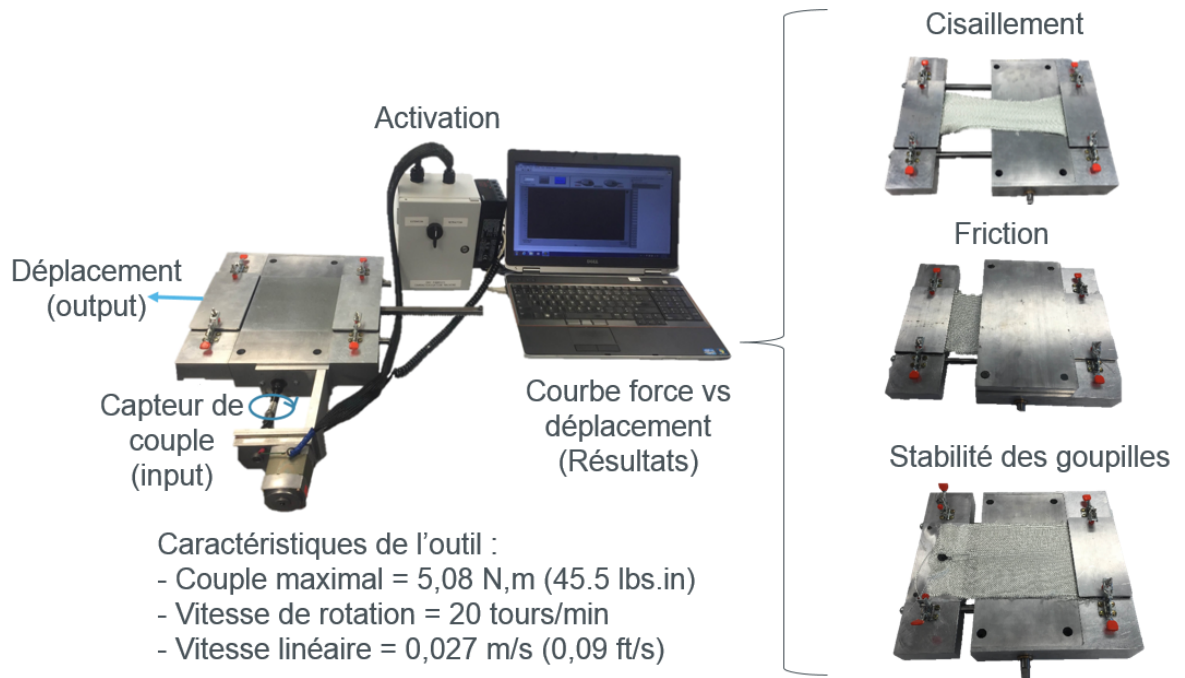


FIGURE 4.9 – Outil portatif de caractérisation axiale

Concept général et mécanismes

La Figure 4.10 présente le concept général de cet outil. L'outil comprend un bloc fixe et un bloc mobile, tous deux en aluminium. Ces deux blocs sont liés par un pignon et une crémaillère. Des pinces de serrage sont montées sur chacun des blocs afin de tenir le tissu en place lors des essais. Un capteur de couple est connecté à l'arbre d'entrée afin de mesurer le couple résistant.

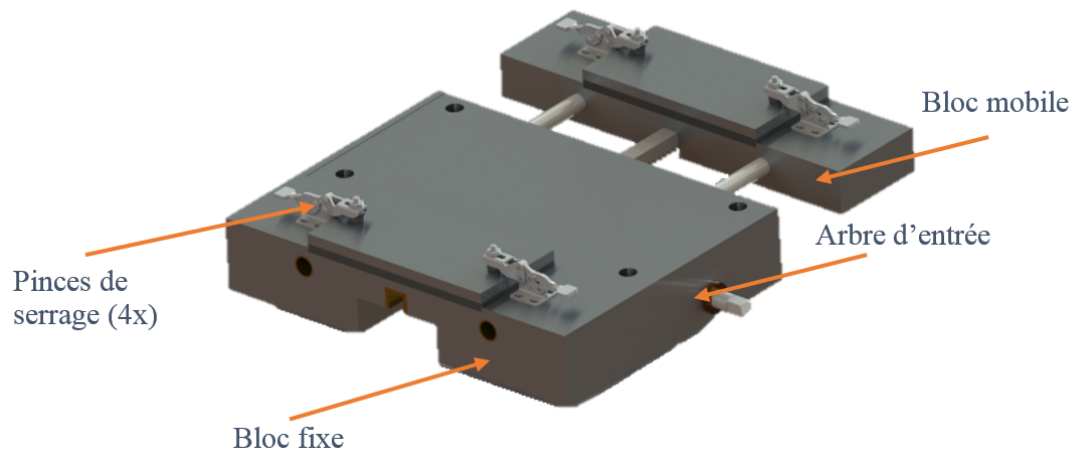


FIGURE 4.10 – Concept général

La Figure 4.11 montre des vues partielles du mécanisme de l'outil de caractrisation. La Figure 4.11a montre le mécanisme permettant le mouvement du bloc mobile. La crémaillère est fixée sur le bloc mobile à l'aide de vis. Le pignon est fixé sur l'arbre d'entrée à l'aide d'une clé et vis de fixation. La Figure 4.11b montre les paliers soutenant l'arbre d'entrée, les paliers soutenant les barres de guidage pour le bloc mobile et le palier permettant le mouvement linéaire de la crémaillère.

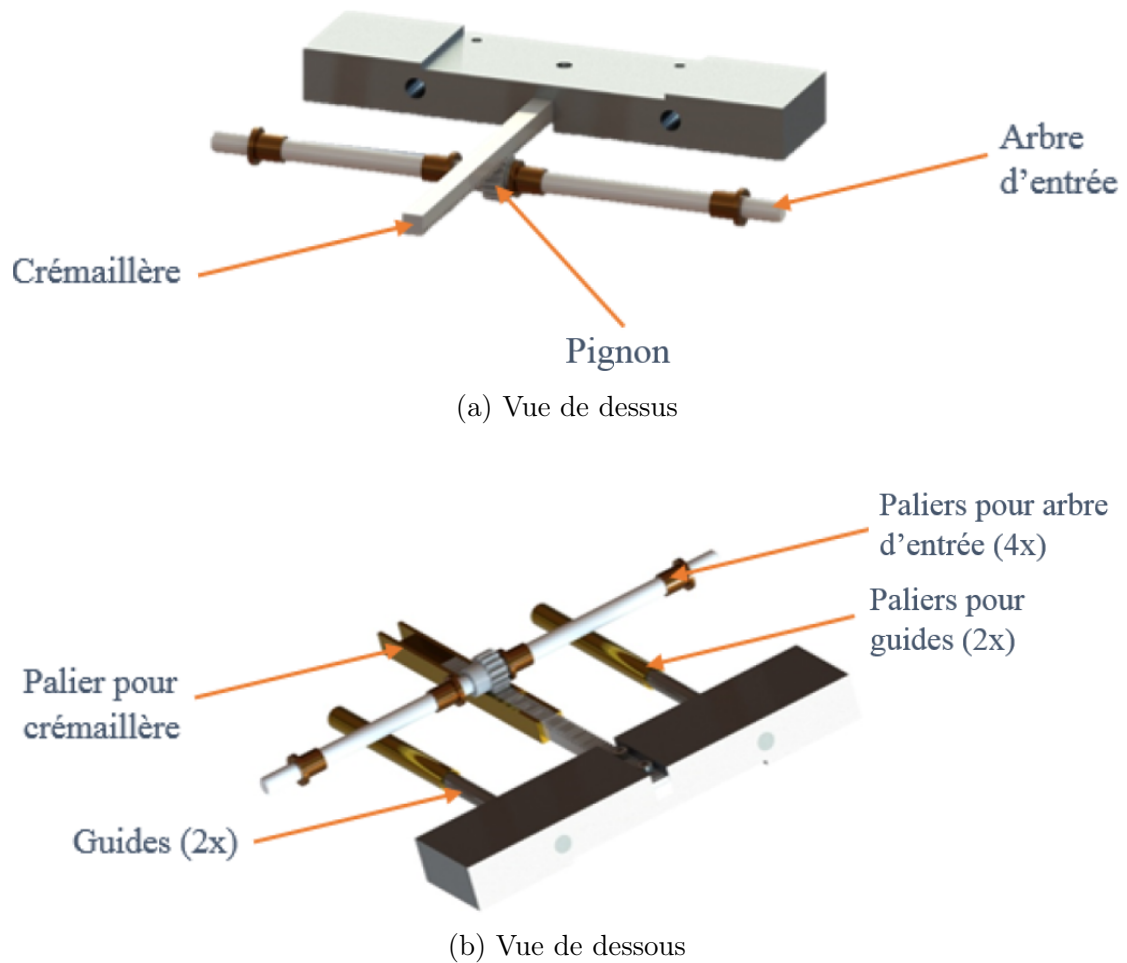


FIGURE 4.11 – Mécanismes pour l'outil de caractérisation axiale

Fonctionnalités et assemblage

L'outil de caractérisation peut être utilisé dans plusieurs configurations afin de mesurer diverses caractéristiques dans le plan. Cette sous-section explique la conception de l'outil de caractérisation plan. Le fonctionnement de l'outil pour chacune des caractéristique est expliqué à la section 4.4.

Configuration 1

Permet d'évaluer :

- Cisaillement maximal pour une force donnée
- Retour élastique en cisaillement

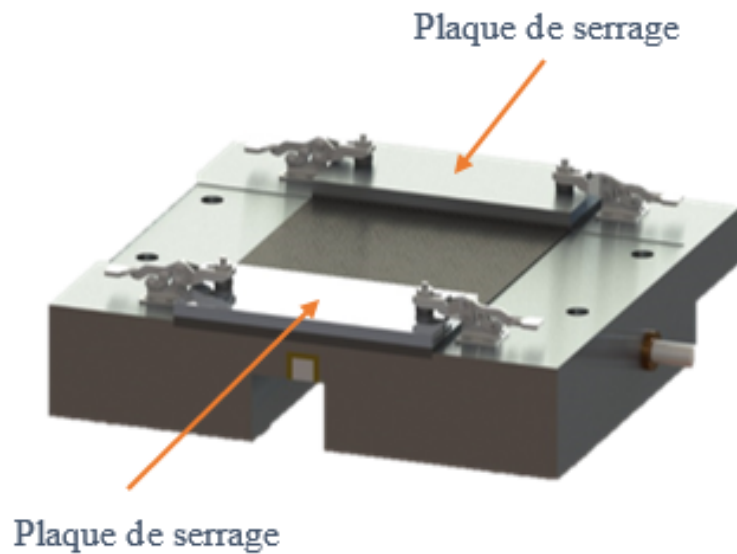


FIGURE 4.12 – Configuration 1 : Pinces de serrage de chaque côté

Configuration 2

Permet d'évaluer :

- Déplacement du tissu autour des goupilles

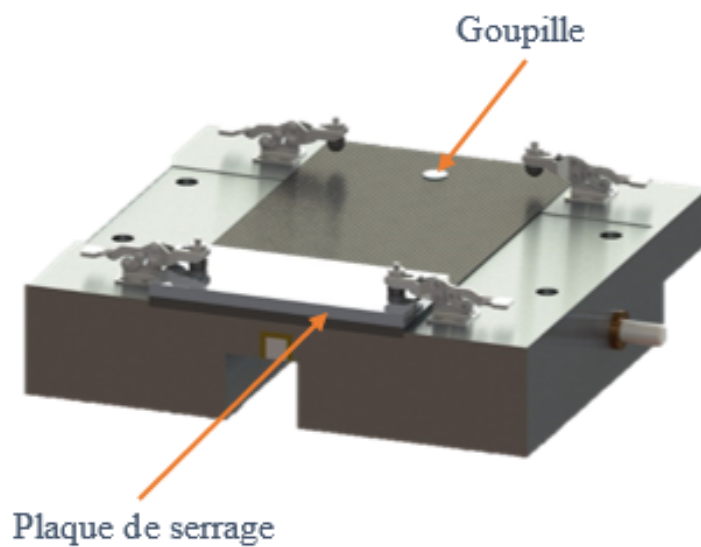


FIGURE 4.13 – Configuration 2 : Pinces de serrage du côté fixe et goupille du côté mobile

Configuration 3

Permet d'évaluer :

- Friction entre les plis
- Friction avec le moule

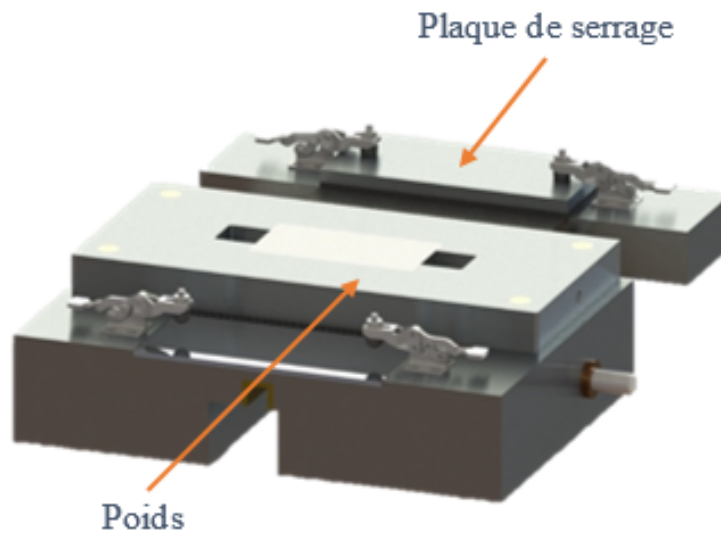


FIGURE 4.14 – Configuration 3 : Ajout du bloc de friction au centre et pince de serrage du côté mobile

L'assemblage pour la configuration 1 est illustré à la Figure 4.15 et consiste à coincer le tissu sur chaque bloc entre deux morceaux de caoutchouc ayant un haut coefficient de friction, qui empêchent le mouvement du tissu lors des essais. Une plaque d'aluminium est ajoutée sur le dessus afin de répartir les forces des pinces de serrage sur toute la surface.

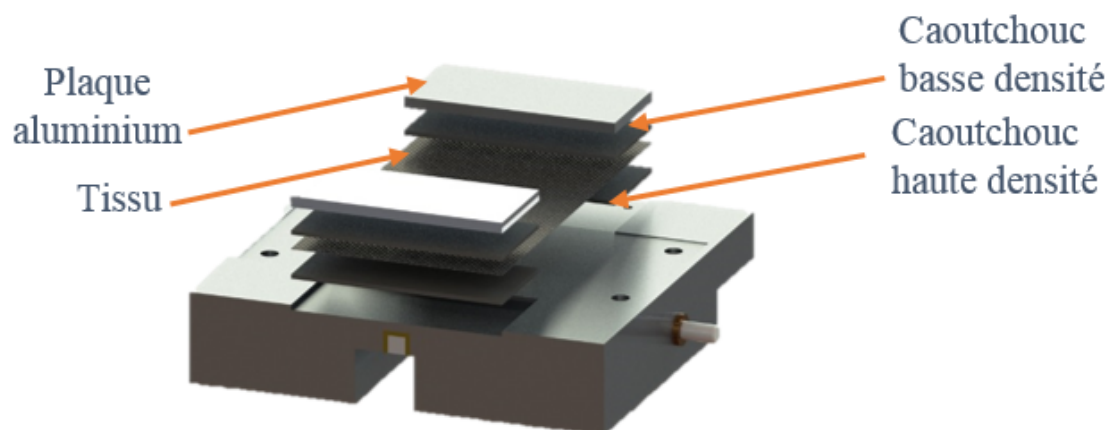


FIGURE 4.15 – Assemblage, configuration 1

L'assemblage pour la configuration 2 est similaire à celui de la configuration 1 du côté du bloc fixe. Du côté bloc mobile, une plaque d'aluminium ayant un trou de même diamètre que les goupilles est utilisée pour la fixation du patron tel qu'illustré à la Figure 4.16.

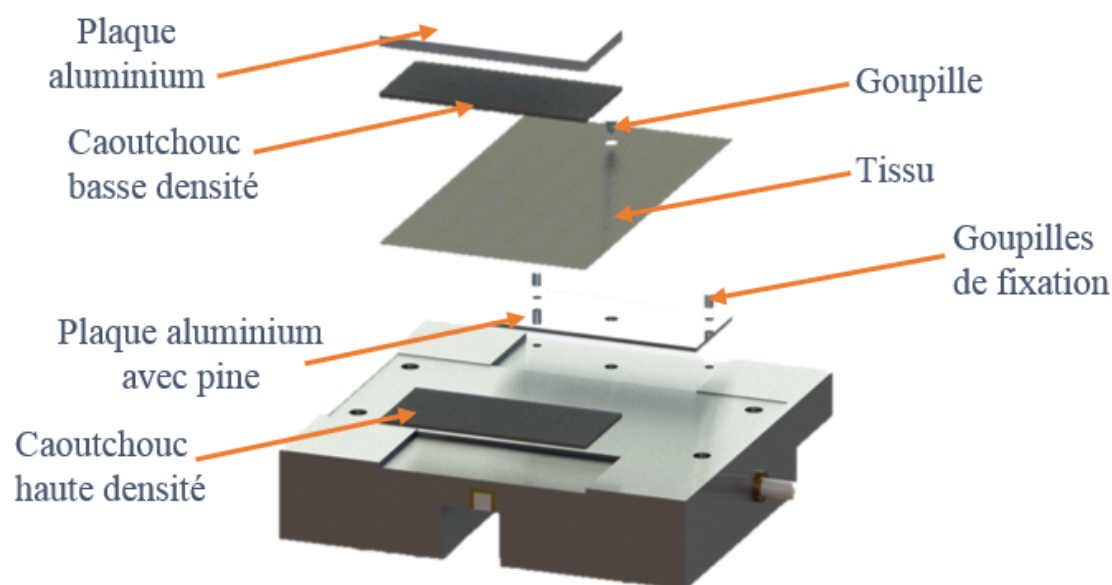


FIGURE 4.16 – Assemblage, configuration 2

L'assemblage pour la configuration 3 est similaire à celui de la configuration 1, mais cette fois-ci du côté du bloc mobile. Une plaque de caoutchouc de haute densité est ajoutée du côté du bloc fixe afin d'être au même niveau sur toute la

surface. Ensuite, un bloc d'aluminium est fixé sur le dessus du bloc fixe à l'aide de goupilles de fixation. Des masses peuvent être ajoutées ou retirées dans ce bloc d'aluminium afin d'augmenter ou de diminuer la friction.

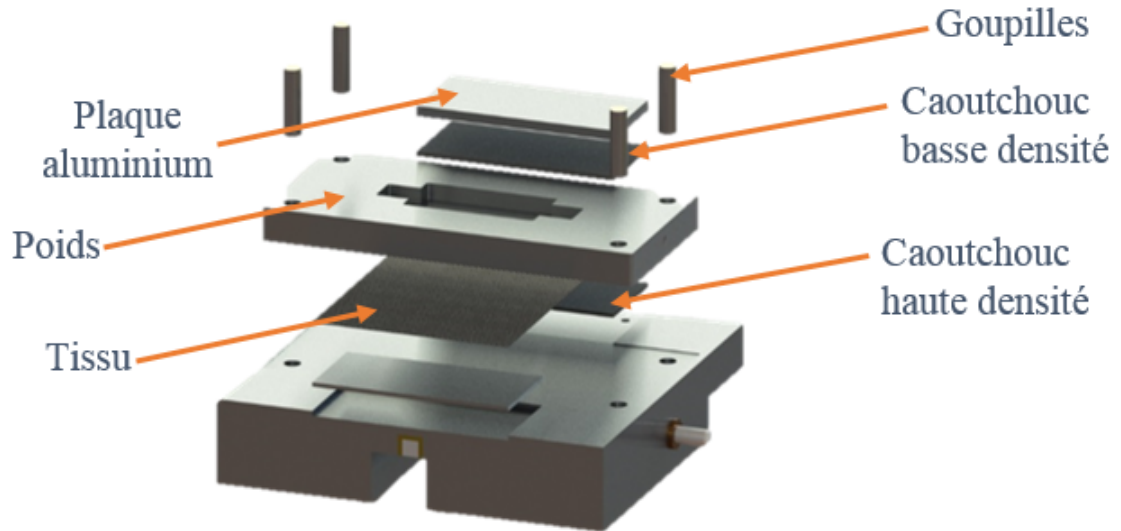


FIGURE 4.17 – Assemblage, configuration 3

Montage expérimental

Le moteur électrique AC 3 phases d'une puissance de 4 Watts comporte une réduction par engrenages à la sortie. Le couple maximal à la sortie de la réduction est de $5.08 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($45 \text{ lbs} \cdot \text{po}$) avec une vitesse de rotation de 2.09 rad/sec (20 rpm). Le rayon nominal du pignon est de 0.0127 m . La vitesse linéaire est donc calculée comme suit :

$$\begin{aligned}
 V_{\text{linéaire}} &= \omega_{\text{moteur}} \cdot r_{\text{pignon}} \\
 &= 2.09 \cdot 0.0127 \\
 &= 0.027 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

La force appliquée sur le tissu peut être déterminée à partir du couple maximal du moteur ainsi que du rayon du pignon.

$$\begin{aligned} F_{Tissu} &= \frac{C_{moteur}}{r_{pignon}} \\ &= \frac{5.08}{0.0127} \\ &= 400N \end{aligned}$$

La force réelle appliquée sur les échantillons est moindre considérant les pertes dans le système mécanique, mais l'outil vise à effectuer des comparaisons entre différents tissus ; les pertes seront très similaires lors de chaque essai.

4.3.2 Outil de flexion

L'outil construit pour mesurer la flexion des tissus secs est constitué d'un moule mâle et un moule femelle représentant un coin à 90° ayant un rayon pratiquement nul. Le tissu ou la préforme est installé sur la partie femelle de cet outil afin de permettre l'évaluation de la flexion dans un coin ainsi que sur les bords. La Figure 4.18 illustre le concept de l'outil de flexion.

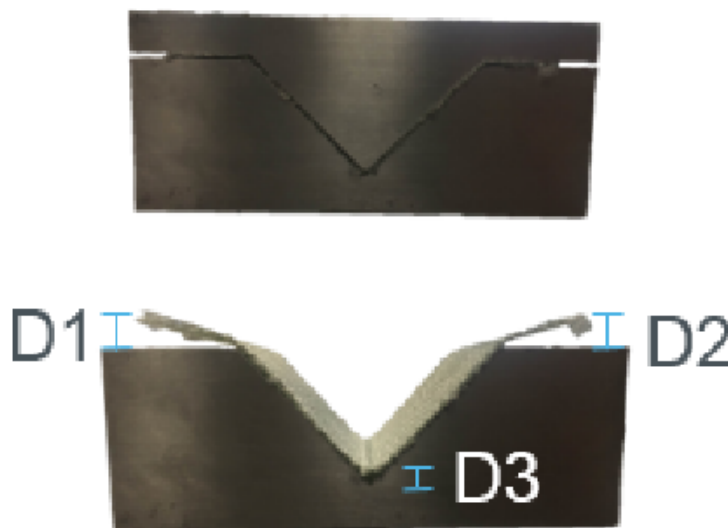


FIGURE 4.18 – Concept de l'outil de flexion

4.3.3 Outil d'effilochement

Un outil a été conçu afin de permettre de quantifier l'effilochement de différents tissus. Le concept est d'utiliser un écoulement d'air contrôlé pour effiloche le tissu pendant une certaine période de temps, et de mesurer la perte des mèches de fibres.

L'outil d'effilochement consiste en une cavité mesurant 88.9 x 292.1 mm (3.5" x 11.5") couverte d'une plaque transparente en acrylique de 101.6 x 304.8 mm (4" x 12"). Les dimensions hors tout de l'outil sont 101.6 x 304.8 mm (4" x 12"). La plaque est percée d'un trou filleté d'un diamètre de 6.35 mm (0.25"), orienté à 45° et positionné à 76.2 mm (3") du bord. Une valve avec contrôle de pression est connectée au trou d'entrée d'air et un manomètre est installé après la valve, afin de mesurer la pression d'air. L'outil inclut un tiroir permettant de collecter et vider les brins détachés du tissu lors d'un essai. Les dimensions du tissu installé sont de 76.2 x 228.6 mm (3" x 9") avec une coupe triangulaire au bout et donc

l'effilochement est effectué sur une distance d'environ 152.4 mm (6"). La Figure 4.19 montre la conception de l'outil d'effilochement.

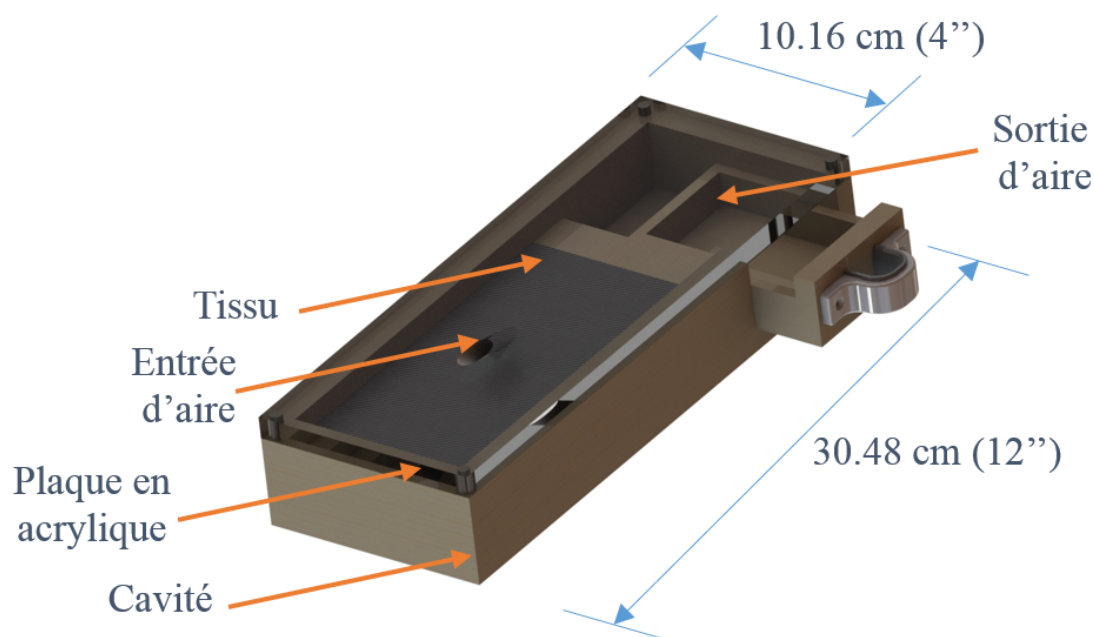


FIGURE 4.19 – Conception de l'outil d'effilochement

4.4 Procédure des essais de caractérisation

4.4.1 Essais avec un cadre articulé

Les essais de cisaillement effectués avec un cadre articulé permettent de mesurer précisément le comportement en cisaillement d'un tissu ou d'un empilement de tissus. Un déplacement est appliqué sur le cadre articulé à l'aide d'une machine d'essai universelle, et le cisaillement du tissu génère une force de résistance. La Figure 4.20 illustre le principe du cadre articulé indiquant l'application de la force et la variation de l'angle du cadre. Dans le cas d'un seul pli de tissu, un cisaillement pur est mesuré. Dans le cas d'un empilement plusieurs plis, des différences

d'orientation ainsi que la friction entre les plis pourraient influencer le résultat [18].

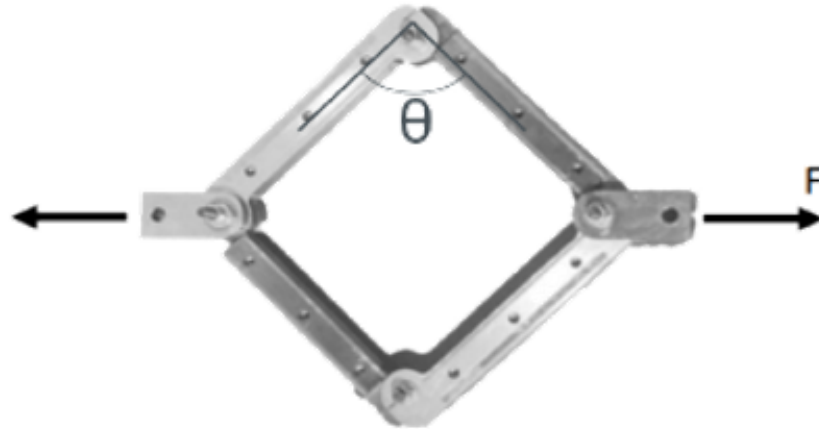


FIGURE 4.20 – Fonctionnement du cadre articulé

Trois outils sont nécessaires afin de réaliser ces essais de cisaillement :

- Un cadre articulé
- Un patron de découpage
- Un support pour le positionnement de la fibre

La cadre articulé a été conçu de façon à ce que l'aire cisailée de l'échantillon soit de 140 x 140 mm (5.5" x 5.5") incluant 45 mm (1.75") de matériel additionnel sur chaque côté afin de permettre de fixer le tissu au cadre articulé, tel qu'illustré à la Figure 4.21. Un patron de bois a été découpé avec ces mêmes dimensions [18].

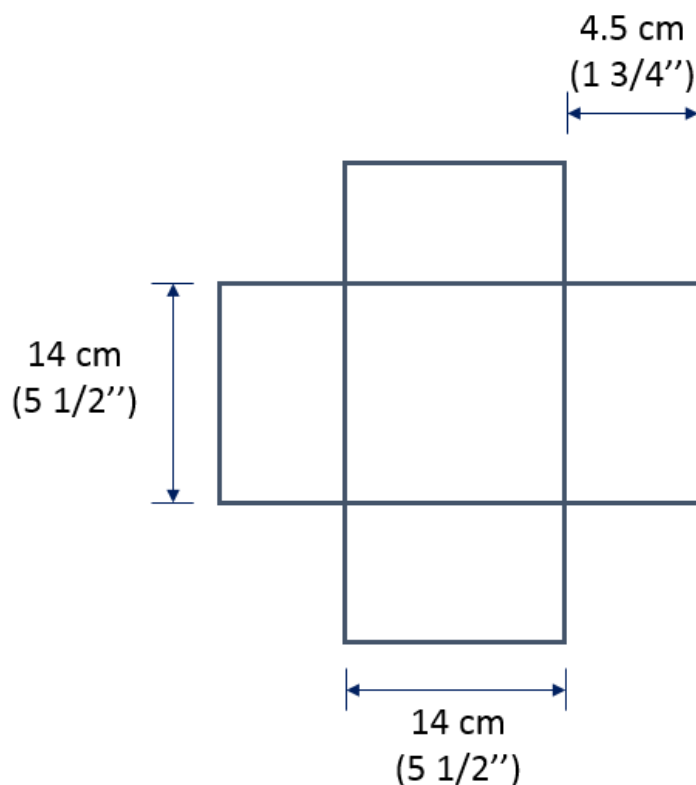


FIGURE 4.21 – Dimension des échantillons pour le cadre articulé

Les échantillons ont été découpés à 0/90° de façon à ce que les mèches de chaîne et de trame soient orientées à 90° les unes des autres avant l'essai. Cinq trous de 6.35 mm (0.25") sont percés sur chaque côté des échantillons afin d'éviter que le serrage des vis du cadre articulé n'endommage l'échantillon. Il y a un total de 20 vis réparties sur les quatre côtés du cadre articulé.

Un support a été conçu afin de supporter le tissu lors du serrage des vis. Ceci permet au tissu de rester orienté à 0/90° tout en induisant une légère tension suivant les mèches et ainsi éviter tout jeu.

La machine d'essai Instron 4482 a été utilisée selon les paramètres apparaissant au Tableau 4.1. Lors d'un essai, un ordinateur enregistre les données de force en fonction du déplacement.

Tableau 4.1 – Paramètres de la machine Instron 4482

Paramètres	Valeur	Unité
Vitesse d'extension	5	mm/min
Extension maximale	95	mm
Fréquence d'échantillonnage	1	Hz

Les données brutes permettent de générer des courbes de la force en fonction du déplacement. Afin d'obtenir des résultats normalisés, ces données sont converties en forces normalisées en fonction de l'angle de cisaillement du tissu [9]. La Figure 4.22 illustre la représentation géométrique du cadre articulé indiquant les constantes et variables de l'essai [18].

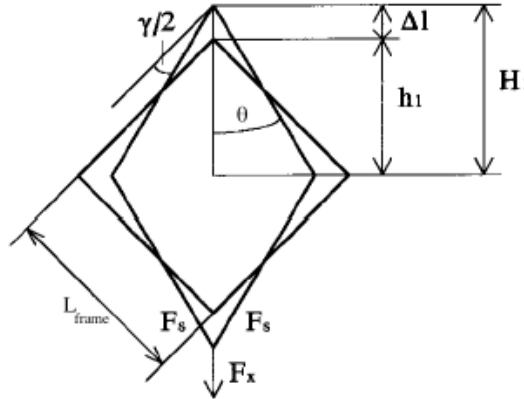


FIGURE 4.22 – Représentation géométrique du cadre articulé [9]

L'angle de cisaillement γ entre la chaîne et la trame des tissus est obtenu par :

$$\gamma = 90^\circ - 2\theta \quad (4.1)$$

La moitié de l'angle aigu du cadre articulé est représentée par θ :

$$\cos(\theta) = \frac{\sqrt{2}L_{cadre} + \Delta l}{2L_{cadre}} \quad (4.2)$$

La force nette appliquée F est déterminée en retirant les forces de résistance pour étirer le cadre articulé sans tissus, F' , de la force totale résultant des essais, F'' :

$$F = F''(\Delta l) - F'(\Delta l) \quad (4.3)$$

Ensuite, la force requise afin de cisailier le tissu seulement F_s est déterminée avec le demi angle du cadre articulé γ et la force nette appliquée F :

$$F_s = \frac{F}{2\cos(\theta)} = \frac{F''(\Delta l) - F'(\Delta l)}{2\cos(\theta)} \quad (4.4)$$

Finalement, la force normalisée $F_{normalise}$ est déterminée à partir de la force requise afin de cisailier le tissu F_s et la longueur des échantillons de tissus L_{tissu} et du cadre articulé L_{cadre} :

$$F_{normalise} = F_s \frac{L_{cadre}}{L_{tissu}^2} \quad (4.5)$$

4.4.2 Essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale

Les essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale donnent des résultats comparables à ceux obtenus à l'aide de l'essai par extension en biais décrit dans la sous-section 3.2.3, où un échantillon de tissu est orienté à $\pm 45^\circ$ ayant une longueur fixe et la longueur opposée mobile permettant la mesure du cisaillement dans le plan (voir chapitre 3).

Étapes d'exécution :

1. La première étape consiste à découper un échantillon de tissu mesurant 15.2 x 29.9 cm (6 x 11.75") à $\pm 45^\circ$ des mèches de chaîne et de trame.

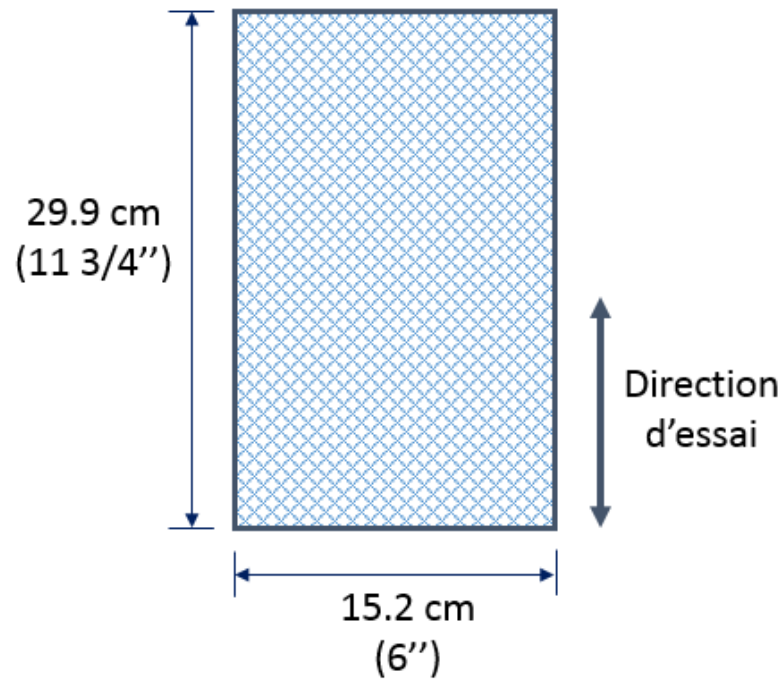


FIGURE 4.23 – Dimensions des échantillons de cisaillement

2. La deuxième étape consiste à installer un tissu dans l'outil de caractérisation, Figure 4.24. La partie mobile de l'outil de caractérisation doit être en contact avec la partie fixe au début de l'essai. Les morceaux de caoutchouc sont installés de chaque côté. Le tissu est manipulé délicatement afin d'assurer de conserver l'orientation originale des fibres. Le tissu est ensuite installé sur l'outil. Les plaques d'aluminium sont installées par-dessus le tissu, puis serrées à l'aide des pinces de serrage.

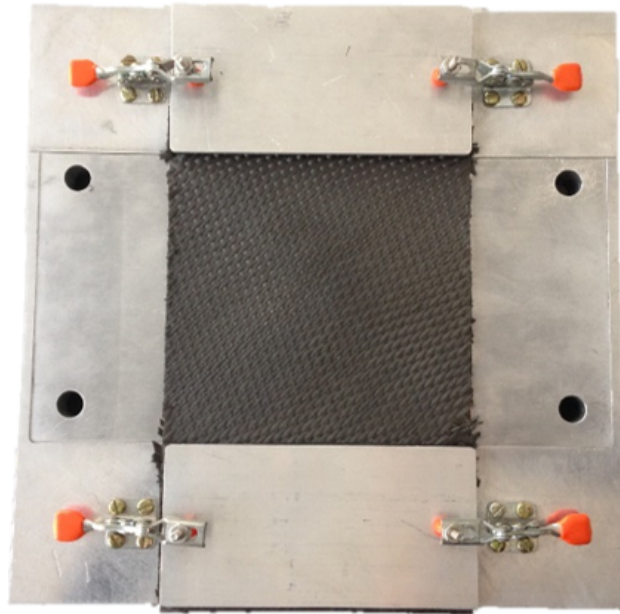


FIGURE 4.24 – Montage du tissu pour l'essai en cisaillement

3. La troisième étape consiste à s'assurer que l'ordinateur capte bien les données du capteur de couple.
4. La quatrième étape consiste à lancer le moteur et à commencer l'acquisition de données. Avant l'activation du moteur et de l'acquisition, l'opérateur doit s'assurer que les pinces de serrage sont suffisamment serrées afin d'éviter un glissement durant l'essai.
5. La cinquième étape consiste à éteindre le moteur aussitôt que celui-ci atteint son couple maximal, Figure 4.25. La distance que le bloc mobile a parcourue doit être mesurée afin de connaître l'extension du tissu pour une force d'environ 400 N. Les données du capteurs servent à valider que la force voulue a bien été atteinte.

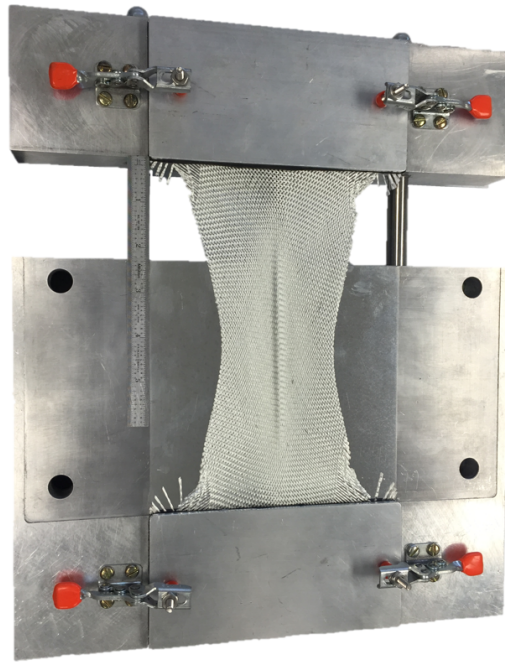


FIGURE 4.25 – Mesure de la distance pour une force de cisaillement donnée

4.4.3 Retour en cisaillement avec l’outil de caractérisation axiale

Les essais de retour élastique en cisaillement sont effectués en même temps que les essais de cisaillement avec l’outil de caractérisation axiale. Une fois le cisaillement maximal atteint et la prise de mesure pour le cisaillement effectuée, le retour en cisaillement peut être mesuré.

Étapes d’exécution :

3. Les deux premières étapes sont identiques aux étapes des essais de cisaillement décrites plus haut.
4. La troisième étape consiste à lancer le moteur pour commencer l’essai. Avant l’activation du moteur, l’opérateur doit s’assurer que les pinces de serrage

sont suffisamment serrées afin d'éviter un glissement durant l'essai.

5. La quatrième étape consiste à éteindre le moteur aussitôt que le couple maximal est atteint et que le tissu est à son extension maximale, Figure 4.26. L'opérateur peut ensuite ouvrir les pinces de serrage simultanément afin de pouvoir mesurer le retrait du tissu suivant son élongation maximale sous une force de 400 N.

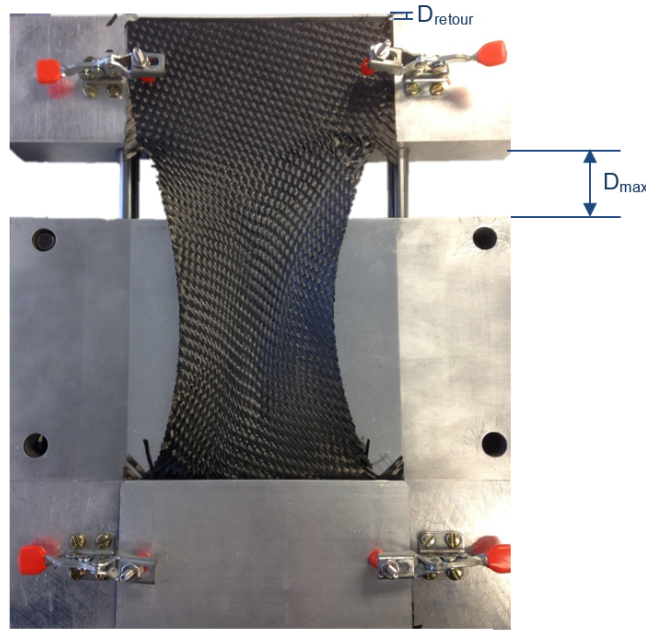


FIGURE 4.26 – Montage du tissu pour le retour en cisaillement

6. La cinquième et dernière étape consiste à mesurer le retour en cisaillement D_{retour} et de l'exprimer relativement à la distance d'élongation maximale du tissu D_{max} :

$$Retour_{cis} = \frac{D_{retour}}{D_{max}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

4.4.4 Essais de flexion

Les essais de flexion sont effectués avec l'outil de flexion. Cet outil de flexion permet de bien représenter la réalité des problèmes en production chez Hutchinson.

Étapes d'exécution :

1. La première étape consiste à couper des échantillons de tissus mesurant 50.8 x 152.4 mm (2 x 6") avec les mèches de chaîne et trame orientées selon 0° et 45°
2. La deuxième étape consiste à positionner un échantillon dans la partie femelle de l'outil suivant la ligne de fixation du tissu, tel qu'illustré sur la Figure 4.27.

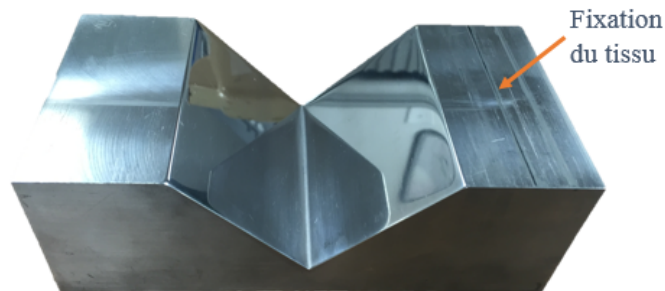


FIGURE 4.27 – Partie femelle de l'outil de flexion

Une fois que le tissu est positionné à la ligne de fixation, un ruban adhésif est positionné par dessus afin de s'assurer que le tissu se déplace dans une seule direction lors de l'essai.

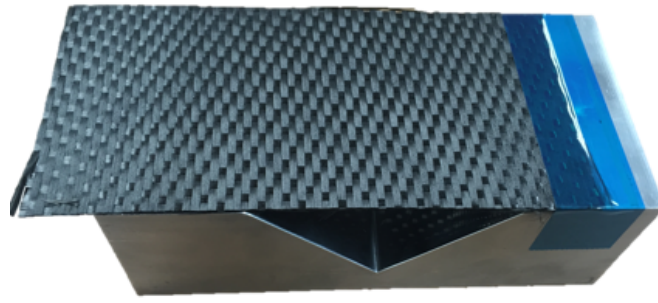


FIGURE 4.28 – Partie femelle de l'outil de flexion, avec tissu

3. La troisième étape consiste à déposer délicatement la partie mâle de l'outil sur la partie femelle. La partie mâle doit rester en place 10 secondes, puis elle est retirée.



FIGURE 4.29 – Fermeture de l'outil de flexion

4. La quatrième étape consiste à mesurer le retour en flexion dans le coin inférieur sur le bord opposé à la fixation, avec une règle. La règle doit être positionnée sur une table afin de prendre la mesure tel qu'illustré aux Figures 4.30 et 4.31.

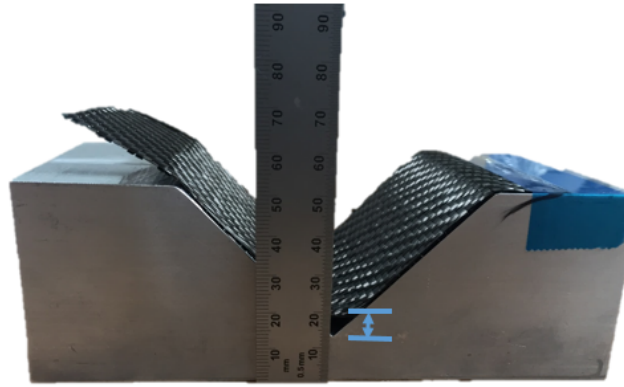


FIGURE 4.30 – Mesure du retour élastique dans le coin inférieur

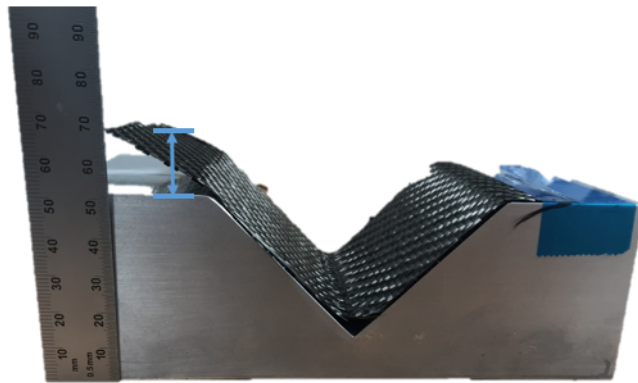


FIGURE 4.31 – Mesure du retour élastique sur le bord opposé à la fixation

4.4.5 Essais de friction

Les essais de friction sont effectués avec l'outil de caractérisation axiale. Deux principales forces de frictions sont présentes lors du drapage d'un moule ; la friction entre les plis et la friction avec le moule. Ces deux forces de friction sont évaluées pour chaque tissu.

Étapes d'exécution :

1. La première étape consiste à découper 4 plis pour chaque essai, de dimensions

24.8 x 15.2 cm (6 x 9 3/4"), avec les mèches de chaîne et de trame orientées à 0/90°. Un pli additionnel de dimensions 7.6 x 15.2 cm (3 x 6") doit aussi être découpé pour le montage sur la partie mobile. La Figure 4.23 illustre les dimensions des échantillons à découper.

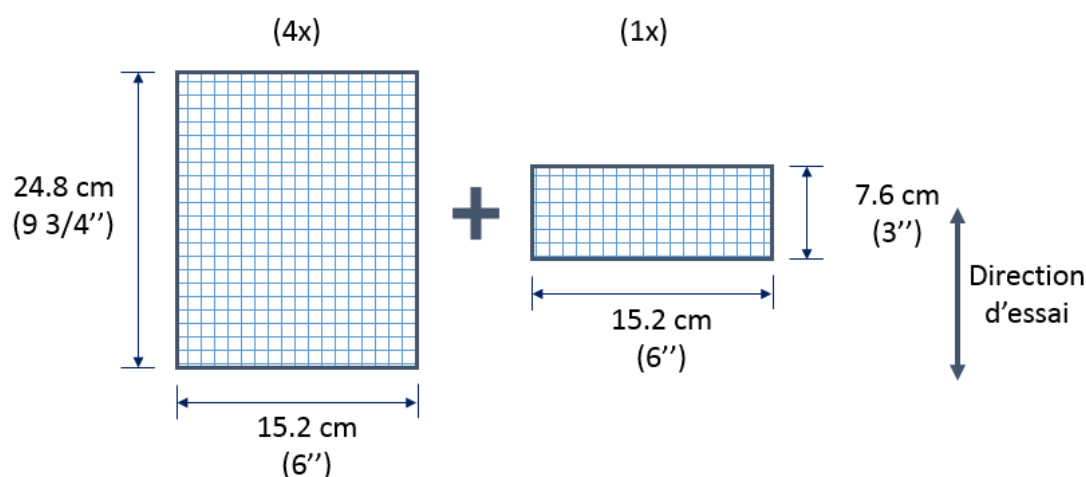


FIGURE 4.32 – Dimensions des échantillons de friction

- La deuxième étape consiste à préparer l'outil de caractérisation avec les paramètres indiqués à la Figure 4.32. Pour les essais de friction avec le moule, seulement un pli est positionné du côté de la partie mobile, où le poids est installé sur la fibre et les pinces sont serrées. Afin d'obtenir des résultats plus précis, un poids supplémentaire est ajouté. Ce poids supplémentaire permet de diminuer l'ampleur des bruits du système. Pour les essais de friction entre les plis, le pli de 76.2 x 152.4 mm (3 x 6") est installé sur le caoutchouc de la partie mobile. Ensuite, un pli est installé du côté de la partie fixe. Puis, deux plis sont installés du côté de la partie mobile, pour finir avec un autre pli du côté de la partie fixe. Pour obtenir des résultats plus précis, un poids supplémentaire est ajouté.

3. Une fois les plis positionnés dans l'outil, l'utilisateur doit s'assurer que l'ordinateur est en mesure de permettre l'acquisition des données. L'ordinateur peut ensuite commencer l'acquisition des données et l'outil peut être mis en marche. L'utilisateur doit s'assurer d'éteindre l'outil une fois que les tissus ne sont plus en contact afin d'éviter un blocage en bout de crémaillère.

4.4.6 Stabilité

La stabilité est définie par une combinaison de deux facteurs ; l'effilochement et la résistance aux goupilles. L'effilochement est caractérisé avec l'outil d'effilochement et la résistance des goupilles est caractérisée avec l'outil de caractérisation axiale.

Essais d'effilochement

Les essais d'effilochement sont effectués avec l'outil d'effilochement. Le concept consiste à imposer un écoulement d'air sur le tissu pendant un certain temps afin de générer un effilochement. L'effilochement est quantifié à l'aide d'un programme d'analyse d'image (ImageJ) qui permet de mesurer les aires de l'échantillons avant et après l'écoulement d'air.

Étapes d'exécution :

1. Tout d'abord, les échantillons de tissu d'un seul pli doivent être découpés. La Figure 4.33 illustre les dimensions des échantillons. Les essais doivent être effectués avec les fibres de chaîne et de trame orientées à $0/90^\circ$ et $\pm 45^\circ$; 3 échantillons sont coupés pour chaque orientation à l'aide d'une machine

de découpe automatique (détails de la machine à la sous-section 2.1.3). Au final, 6 échantillons sont découpés pour chaque tissu.

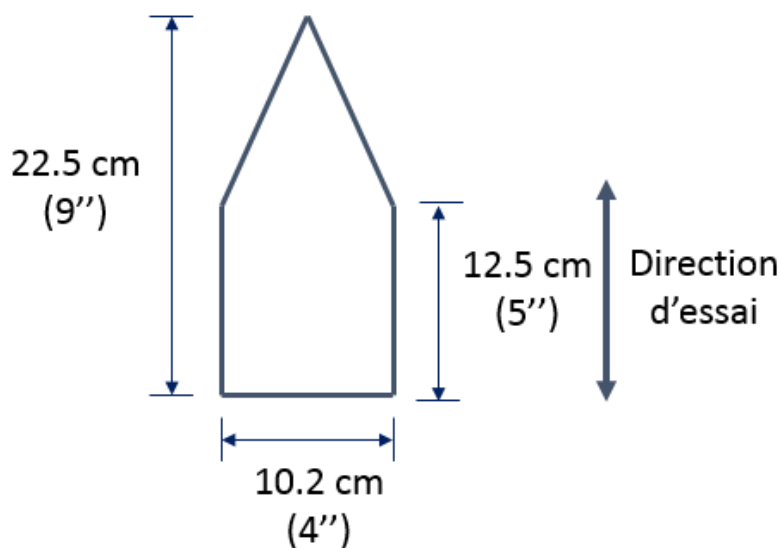


FIGURE 4.33 – Dimensions des échantillons pour les essais d’effilochement

2. Ensuite, la soupape d’effilochement doit être réglée à une pression de 42.7 kPa (6.2 psi). Cette pression a été déterminée suivant plusieurs essais préliminaires afin d’assurer de voir une différence d’effilochement entre chaque tissu. Pour ce faire, les connecteurs à l’entrée doivent être retirés de l’outil et connectés à un manomètre.
3. Les tissus sont ensuite installés dans l’outil. Le tissu est plaqué contre le fond de l’outil et maintenu en place avec un ruban adhésif. Une photo doit être prise avant chaque essai afin de permettre l’analyse d’image ultérieurement. La Figure 4.34 montre un échantillon après essai, avec les distance analysées sur ImageJ. Les distances initiales permettent de définir l’échelle et ainsi de comparer les images avant et après essai.

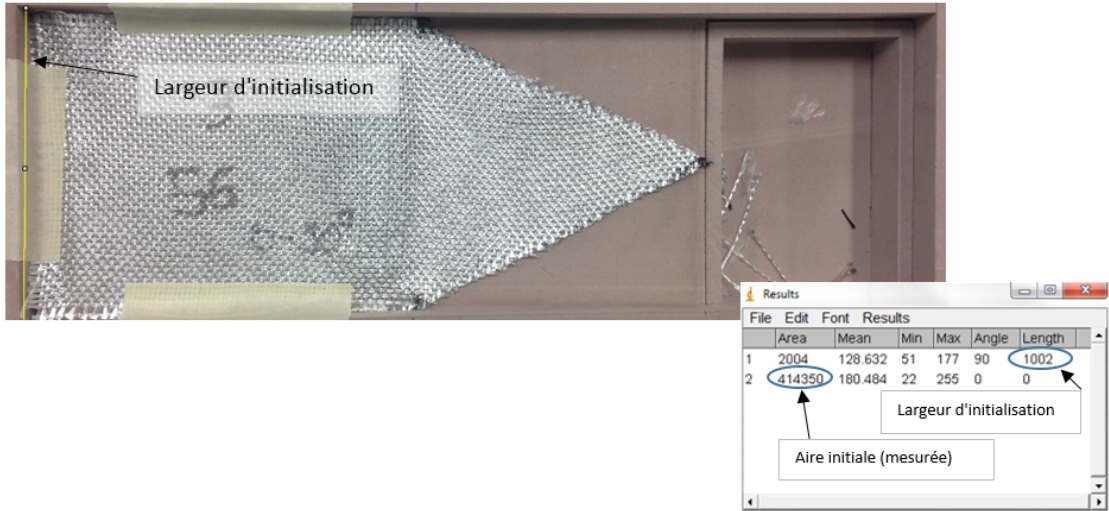


FIGURE 4.34 – Initialisation pour les essais d'effilochement

4. Un facteur d'échelle $F_{echelle}$ est déterminé à l'aide de la largeur réelle mesurée L_{reelle} , et la largeur d'initialisation L_{ini} illustrée à la Figure 4.34. Le facteur d'échelle est calculé comme suit :

$$F_{echelle} = \frac{L_{reelle}[mm]}{L_{ini}[mm]} \quad (4.7)$$

5. Une fois le facteur d'échelle connu, l'aire initiale de la zone triangulaire illustrée à la Figure 4.35 peut être calculé sur ImageJ en tracant des lignes de contour du triangle.

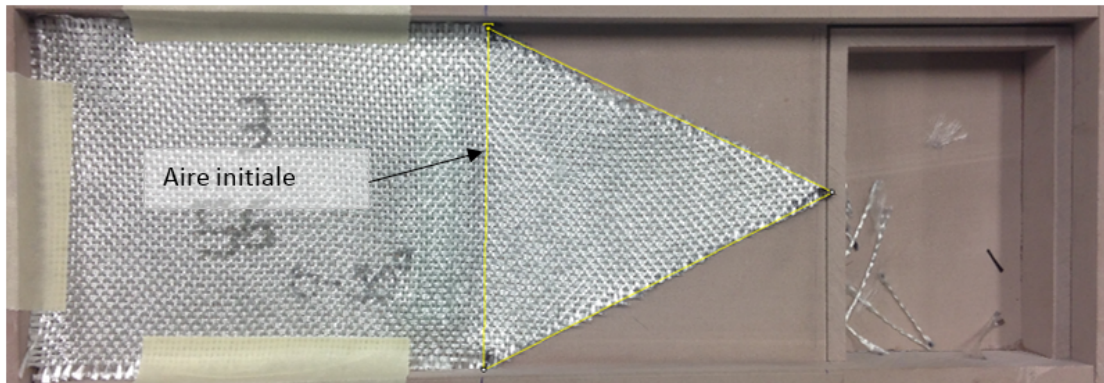


FIGURE 4.35 – Mesure de l'aire initiale sans effilochement

6. Ayant l'aire initial et le facteur d'échelle, l'aire finale peut être calculée par ImageJ en appliquant le même facteur d'échelle. La Figure 4.36 montre la mesure de la surface finale sur ImageJ.

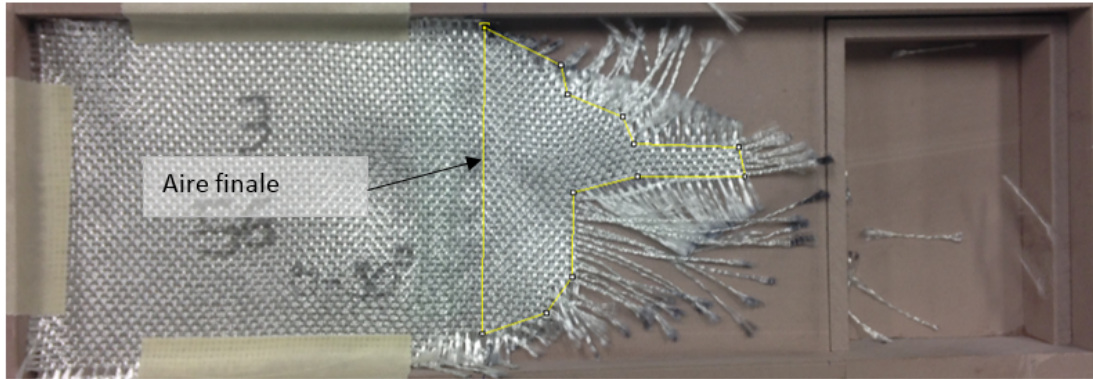


FIGURE 4.36 – Mesure de la surface finale avec effilochement

7. Ayant les aires initiale et finale A_{ini} et A_{fina} , une fraction d'aire effilochée Eff peut être calculée en comparant l'aire finale et l'aire initiale :

$$Eff = \frac{A_{ini}[mm^2] - A_{fina}[mm^2]}{A_{ini}[mm^2]} \quad (4.8)$$

Essais de résistance aux goupilles

Les essais de stabilité des goupilles sont effectués avec l'outil de caractérisation dans le plan. Ces essais permettent de connaître la résistance du tissu lorsque soumis à une tension autour d'une goupille insérée dans le tissu.

Étape d'exécution :

1. Tout d'abord, les échantillons de tissu doivent être découpés. La Figure 4.37 illustre leurs dimensions. Les essais doivent être effectués avec les fibres orientées à $0/90^\circ$ et $\pm 45^\circ$; 3 échantillons sont coupés pour chaque orientation à

l'aide de la machine de découpe automatique (détails de la machine à la sous-section 2.1.3). Au final, 6 échantillons sont découpés pour chaque tissu. Un trou de 31.75 mm (0.25") doit être coupé à 3 cm (1.5") du bord de la largeur et centré selon la largeur.

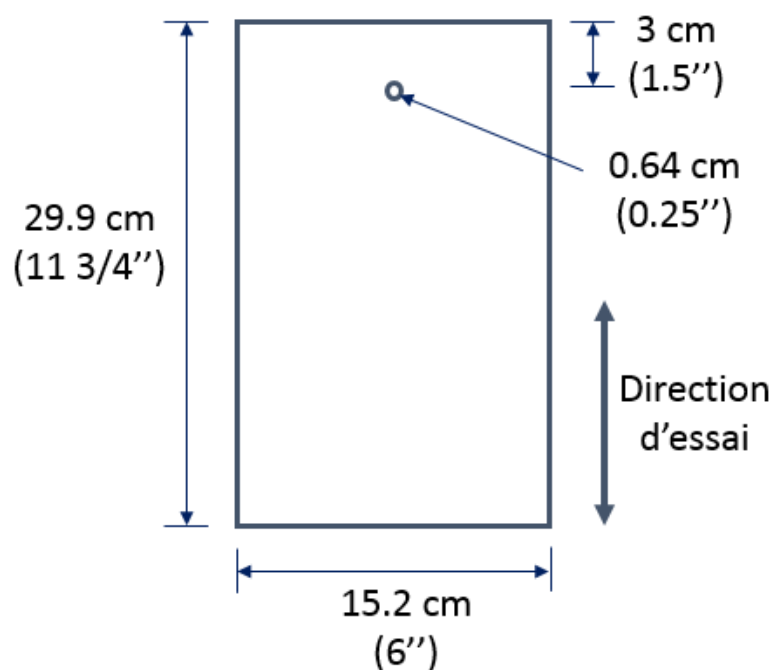


FIGURE 4.37 – Dimensions des échantillons pour essais de résistance aux goupilles

2. L'outil de caractérisation axiale doit être configuré de façon à permettre le positionnement d'une goupille dans la partie mobile (arrangement 2, voir section 4.3). L'échantillon est ensuite déposé sur l'outil où une pince de serrage permet de maintenir le tissu du côté fixe, et une goupille est installée à travers le tissu dans la partie mobile. La Figure 4.38 illustre l'installation du tissu pour ces essais.

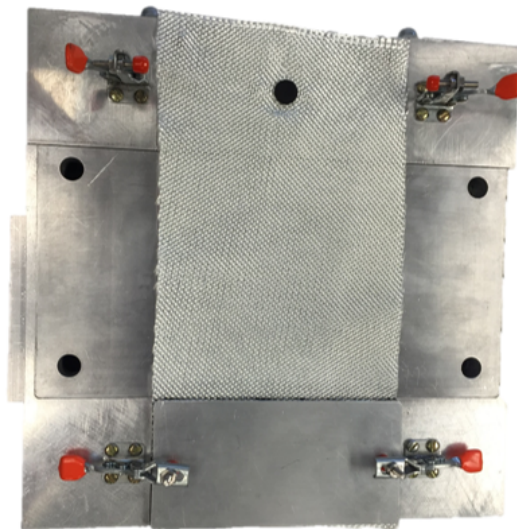


FIGURE 4.38 – Installation du tissu pour les essais de résistance aux goupilles

3. Une fois l'échantillon en place, l'ordinateur doit être configuré de façon à permettre la prise de mesure du capteur de couple. Le moteur de l'outil de caractérisation ainsi que l'acquisition de données doivent être activés simultanément. Le tissu devrait passer par dessus la partie plane de la goupille lors de l'essai. Une fois que la goupille n'est plus dans le tissu, le moteur et l'acquisition de données doivent être arrêtés. La Figure 4.39 montre le résultat d'un essai de résistance aux goupilles.

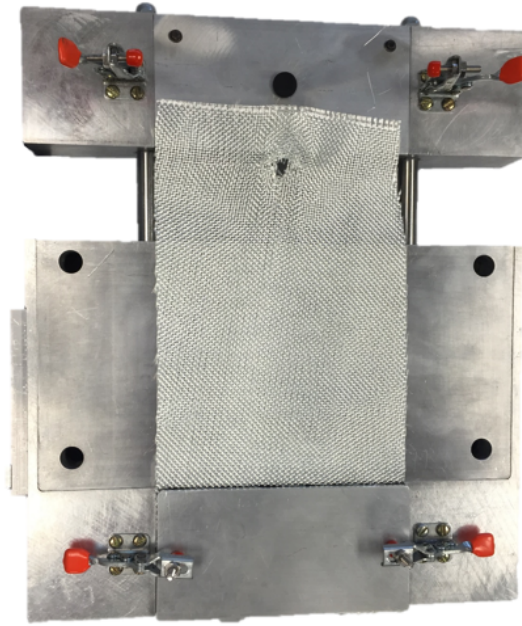


FIGURE 4.39 – Résultat d'un essai de résistance aux goupilles

Chapitre 5

Résultats des Essais de Caractérisation des Tissus

Ce chapitre présente et explique les résultats des essais de caractérisation. Les essais de caractérisation ont été effectués sur les tissus mentionnés au début du chapitre précédent. Des essais de cisaillement avec un cadre articulé et avec l'outil de caractérisation axiale ont été effectués et comparés pour chaque tissu. Des essais de flexion ont été effectués avec l'outil de flexion, des essais de friction ont été effectués avec l'outil de caractérisation axiale et des essais de stabilité (effiloche-ment et résistance aux goupilles) ont été effectués avec l'outil de caractérisation et avec l'outil d'effilochement. Une comparaison des tissus a été effectuée pour chaque caractéristique évaluée. Les tissus ont été classés sur une échelle de 1 à 10 afin de permettre une comparaison simple et rapide.

5.1 Cisaillement

Des essais de cisaillement ont été effectués avec un cadre articulé ainsi qu'avec l'outil de caractérisation. Les essais de cisaillement avec le cadre articulé ont été effectués de façon à valider les essais de cisaillement effectués avec l'outil de caractérisation.

5.1.1 Essais avec un cadre articulé

Pour chacun des tissus investigués, 5 essais ont été effectués avec un pli et 5 autres essais avec un empilement de 4 plis. Les Figures 5.1, 5.2 et 5.3 illustrent les résultats des essais de cisaillement pour trois tissus analysés. Le tissu satin 5 de carbone style 4540 n'a pas été analysé pour les essais avec le cadre articulé du fait de sa disponibilité limitée. Sur les courbes, la différence entre le comportement d'une préforme de 4 plis et d'un pli de tissu est mise en évidence pour chaque tissu. L'effet du nombre de plis est causé par la friction entre les plis, l'orientation imparfaite des différents plis et le nombre de plis à cisailier. Pour ce qui est du tissu toile de verre style 7500, la variation entre 1 et 4 plis à 50° est d'environ 6 fois avec 4 plis, comparativement à environ 3 fois avec le satin 8 de verre style 7781 et environ 2.5 fois avec le sergé de carbone style 1040.

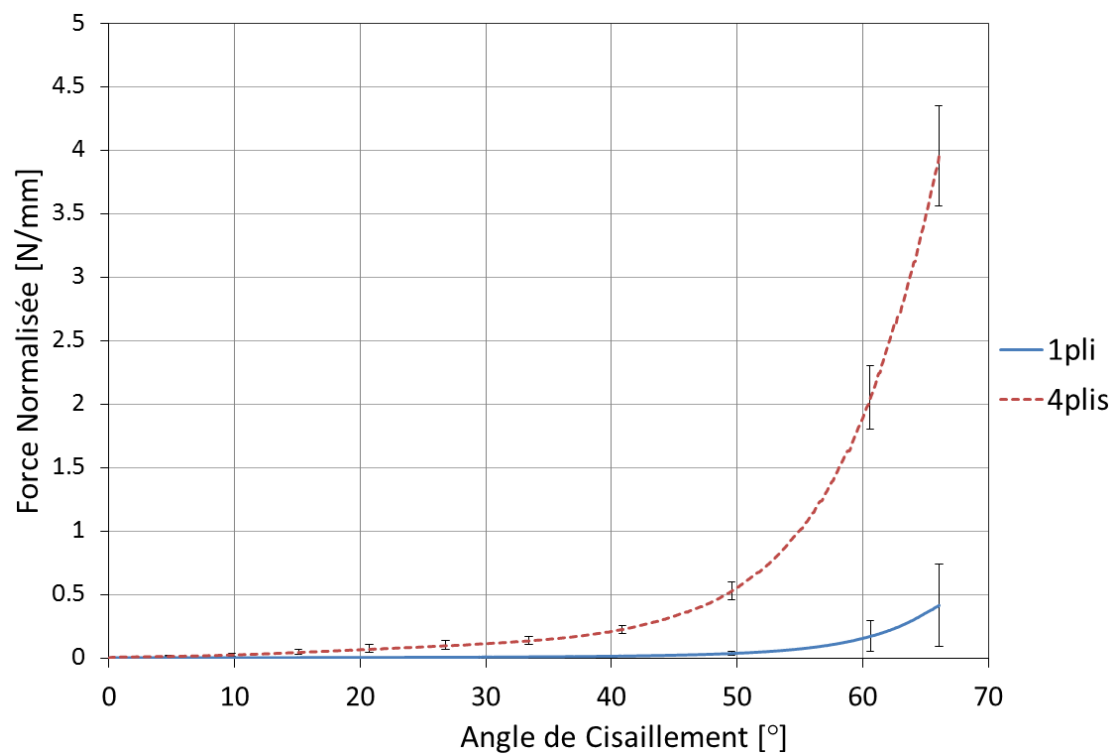


FIGURE 5.1 – Essais de cisaillement avec cadre articulé, 1 pli et 4 plis, tissu toile de verre style 7500

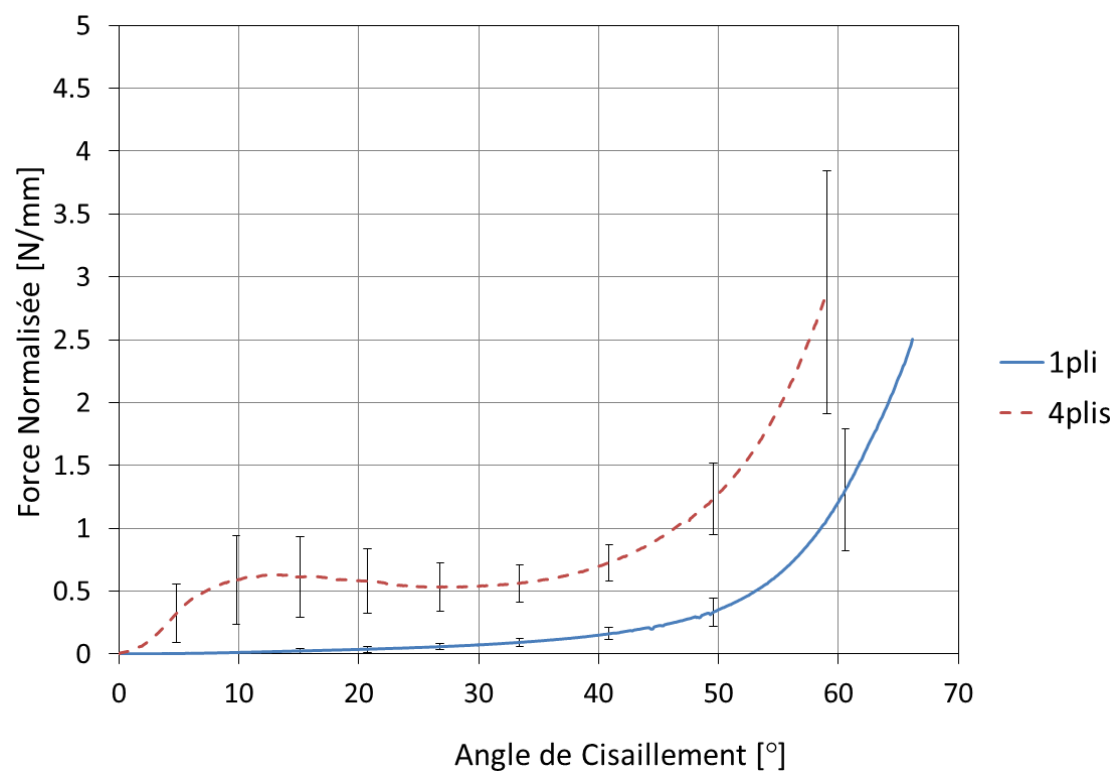


FIGURE 5.2 – Essais de cisaillement avec cadre articulé, 1 pli et 4 plis, satin 8 de verre style 7781

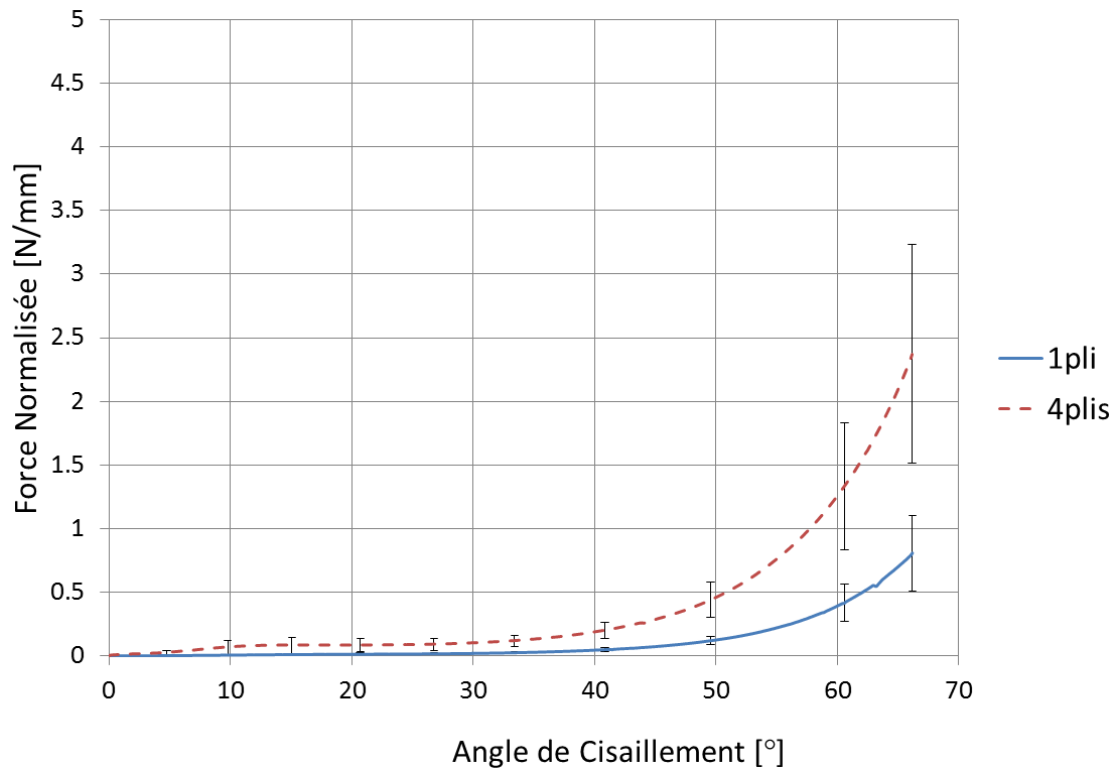


FIGURE 5.3 – Essais de cisaillement avec cadre articulé, 1 pli et 4 plis, sergé de carbone style 1040

Les courbes de la Figure 5.4 permettent de comparer les comportements en cisaillement des tissus pour 1 pli. 5 essais ont été effectués pour chaque tissu. Le tissu toile de verre style 7500 a une capacité en cisaillement supérieure à celle des autres tissus, suivi par le sergé de carbone style 1040 et du satin 8 de verre style 7781. La capacité en cisaillement est importante lors du drapage d'une pièce complexe. Les essais permettent donc de déterminer la facilité du tissu à draper une géométrie donnée.

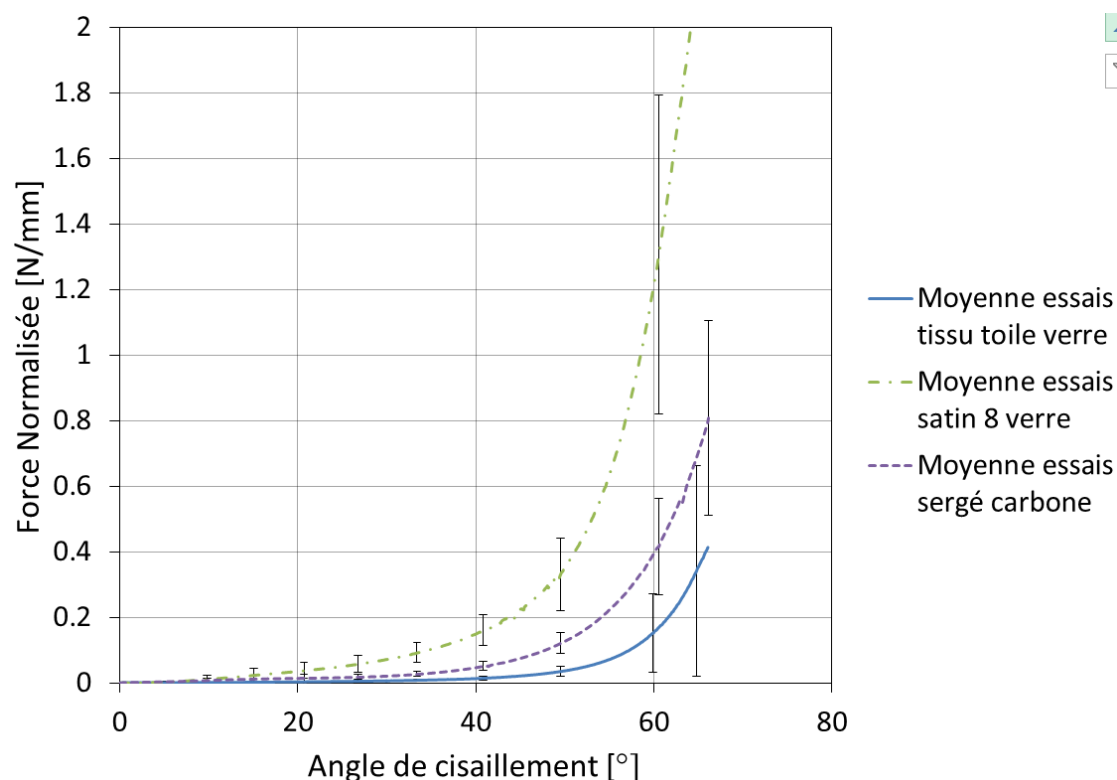


FIGURE 5.4 – Essais de cisaillement avec cadre articulé, tissu toile de verre style 7500, satin 8 de verre style 7781, sergé de carbone style 1040, 1 pli

Les courbes de la Figure 5.5 illustrent le comportement en cisaillement des tissus pour 4 plis. Comparativement aux courbes de la Figure 5.4 où le tissu toile de verre style 7500 présente la plus haute capacité en cisaillement, cette fois-ci le tissu sergé de carbone style 1040 présente la meilleure capacité et le satin 8 de verre style 7781 la moindre. Ceci signifie que la friction entre les plis est élevée avec le tissu toile de verre style 7500 et faible avec le tissu sergé de carbone style 1040.

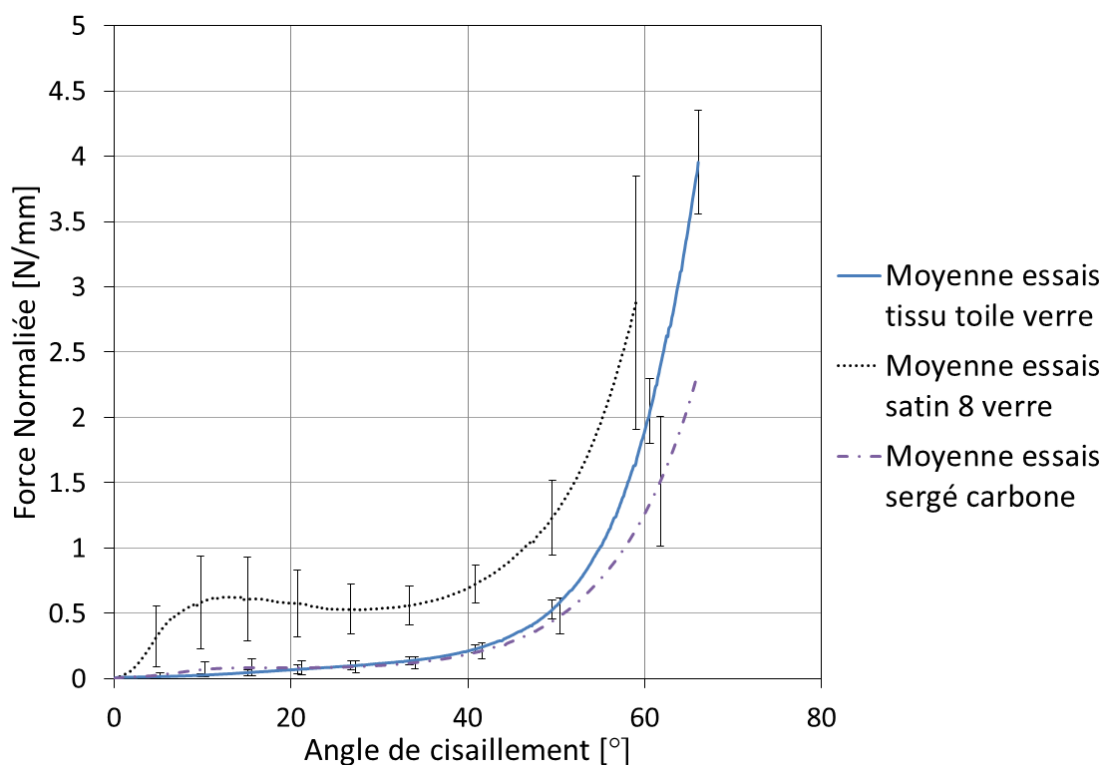


FIGURE 5.5 – Essais de cisaillement avec cadre articulé, tissu toile de verre style 7500, satin 8 de verre style 7781, sergé de carbone style 1040, 4 plis

Les résultats découlant de ces essais normalisés sont comparés avec les résultats des essais de cisaillement effectués avec l'outil de caractérisation dans les pages suivantes. Cette comparaison vise à valider la fonctionnalité de l'outil de caractérisation axiale pour caractériser la performance en cisaillement.

5.1.2 Essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale

Pour les essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation axiale, 3 essais de cisaillement ont été effectués pour chaque tissu, afin de valider la reproductibilité des résultats.

Les tendances des résultats des essais de cisaillement présentés au Tableau 5.1

correspondent bien aux résultats des essais conduits avec le cadre articulé. Tel que mentionné précédemment, la Figure 5.4 montre le résultats des essais de cisaillement avec cadre articulé et présente les courbes de la force normalisée en fonction de l'angle de cisaillement pour les 3 tissus. Selon ces essais, le tissu toile de verre style 7500 est le tissu ayant la plus basse force normalisée pour un angle de cisaillement donnée, suivi du sergé de carbone style 1040 et du satin 8 de verre style 7781. Dans le cas des essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation, le tissu toile de verre style 7500 est aussi celui qui présentent les plus haute capacité en cisaillement, suivi du tissu sergé de carbone style 1040 et du tissu satin 8 de verre style 7781. Par analyse de classification de la capacité en cisaillement des tissus seulement, les résultats des essais de cisaillement avec l'outil de caractérisation sont dans un même ordre de grandeur que les résultats des essais avec cadre articulé. Cette méthode de caractérisation rapide et fonctionnelle permet donc de comparer le comportement en cisaillement de différents tissus.

Les Figures 5.6, 5.7, 5.8 et 5.9 présentent les courbes du couple en fonction du temps pour les essais de cisaillement avec le tissu toile de verre style 7500, le tissu satin 8 de verre style 7781, le sergé de carbone style 1040 et le satin 5 carbone style 4540 respectivement. Ces courbes permettent de valider la valeur du couple maximal atteint et de visualiser leur reproductibilité. Les essais de cisaillement sur le tissu sergé de carbone style 1040 ont été moins reproductibles que les essais faits sur les trois autres tissus ; la force de 400 N appliquée est très près de la capacité du tissu avant déchirure. L'essai 3 a biaisé les résultats car le tissu a atteint sa limite et a déchiré durant l'essai. Pour la majorité des essais, le couple maximal est de 5.1 Nm.

Tableau 5.1 – Résultats des essais de cisaillement conduits avec l’outil de caractérisation axiale

Tissu	Type de fibre	Architecture	Moyenne des extensions [mm]	Écart type [mm]
7500	Verre	Toile	141.99	3.81
7781	Verre	Satin 8	90.42	6.35
1040	Carbone	Sergé	103.12	6.35
4540	Carbone	Satin 5	96.77	6.35

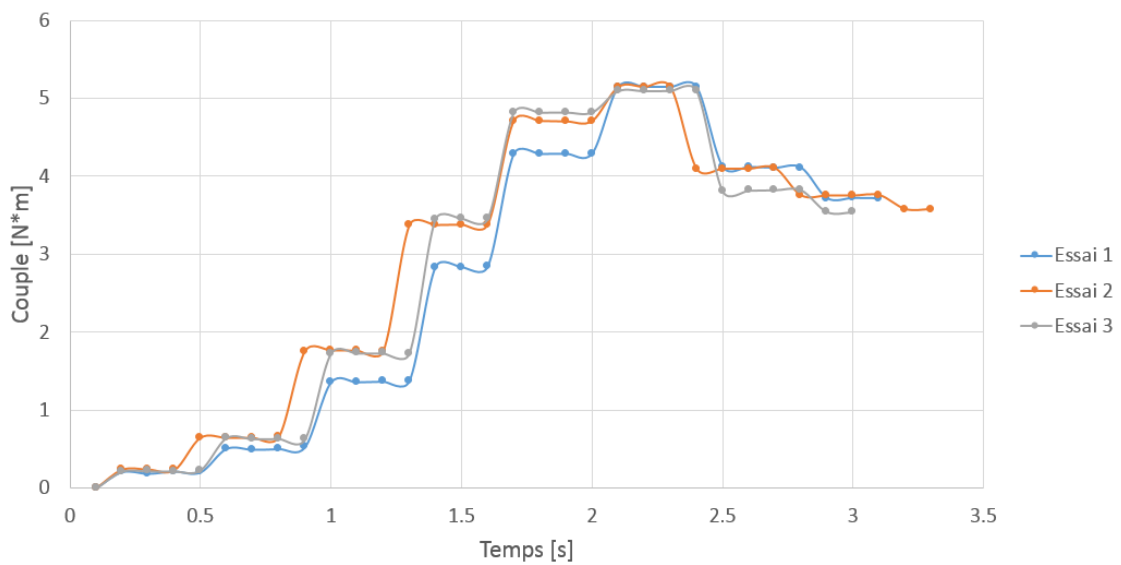


FIGURE 5.6 – Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l’outil de caractérisation pour le tissu toile de verre style 7500

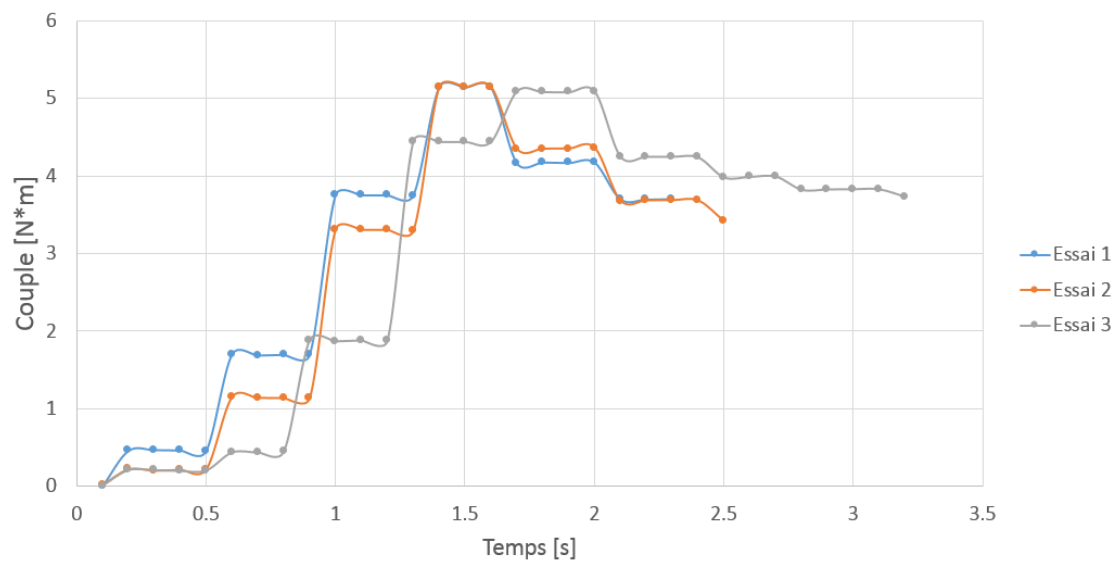


FIGURE 5.7 – Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu satin 8 de verre style 7781

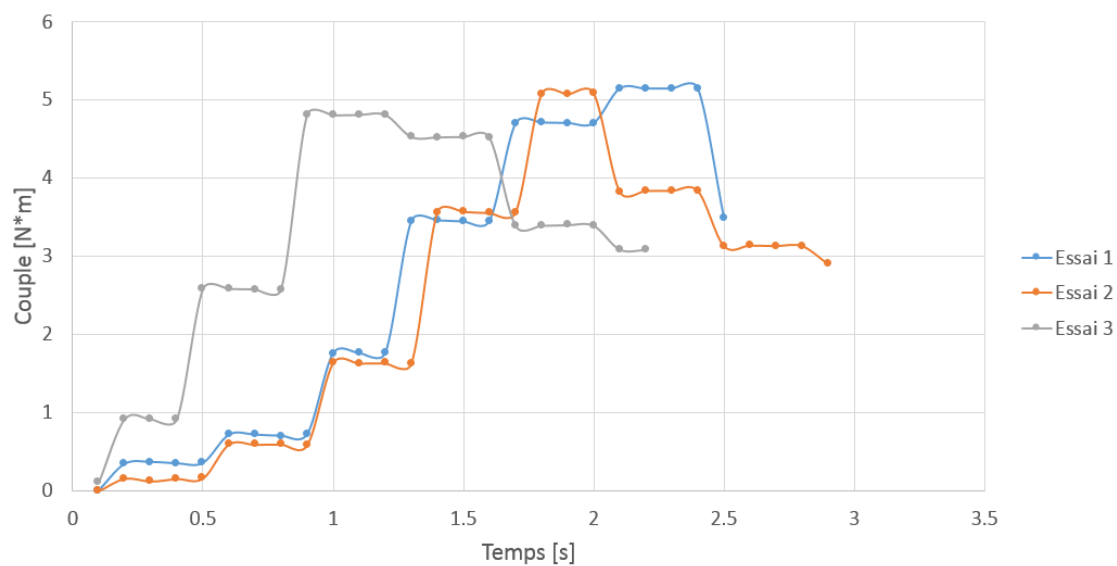


FIGURE 5.8 – Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu sergé de carbone style 1040

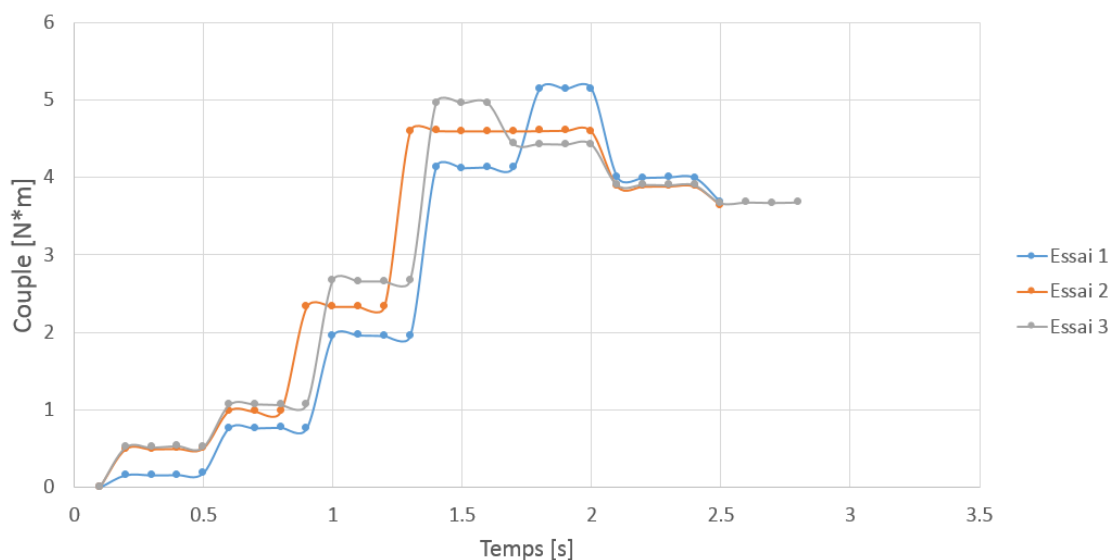


FIGURE 5.9 – Couple en fonction du temps, essais de cisaillement conduits avec l'outil de caractérisation pour le tissu satin 5 de carbone poudré époxy style 4540

5.1.3 Retour en cisaillement, essais conduits avec l'outil de caractérisation axiale

Durant l'essai, lorsque le tissu atteint sa déformation maximale pour la force appliquée, le couple moteur appliqué est maximal. À ce moment, la partie mobile n'est plus en mouvement. Les essais de retour en cisaillement permettent de mesurer le retour de différents tissus après l'application d'une force maximale.

La reproductibilité des essais peut être diminuée lors de l'étape de déserrage du tissu sur la partie mobile. Afin d'assurer une bonne reproductibilité de cette étape, l'utilisateur doit déserrer les pinces en même temps pour assurer que le retour soit égal sur la largeur de l'échantillon. Cette manipulation est la cause des écarts types montrés au Tableau 5.2.

Les résultats sont représentatif de la réalité du drapage sur des pièces réelles. En

effet, le tissu toile de verre style 7500 crée peu de difficultés au niveau du retour en cisaillement, tandis que le tissu satin 5 de carbone style 4540 crée des difficultés majeures à ce niveau, en production chez Hutchinson.

Tableau 5.2 – Résultats des essais de retour en cisaillement conduits avec l’outil de caractérisation axiale

Tissu	Type de fibre	Architecture	Moyenne des retours [%]	Écart type [%]
7500	Verre	Toile	0.5	0.058
7781	Verre	Satin 8	4.7	0.71
1040	Carbone	Sergé	6.4	0.58
4540	Carbone	Satin 5	9.7	0

5.2 Flexion

Les essais de flexion ont été effectués selon deux orientations de fibre (0/90° et +/- 45°) de façon à connaître l’effet de l’orientation sur le comportement en flexion. En général, la flexion à +/- 45° montre un plus petit retour élastique parce que la flexion n’est pas imposée directement dans le sens des mèches. Seul la mesure de flexion sur les bords du satin 8 de verre style 7781 montre la tendance inverse, où la flexion à 90° provoque moins de retour. Cependant, les différences sont généralement faibles.

Dans le cas où le tissu ne peut pas se conformer au rayon de l’outil de flexion, la note attribuée est de 4 cm, voir Figure 5.10. Dans cette situation, la mesure sur les bords doit être prise en s’assurant que le tissu reste au fond du coin.

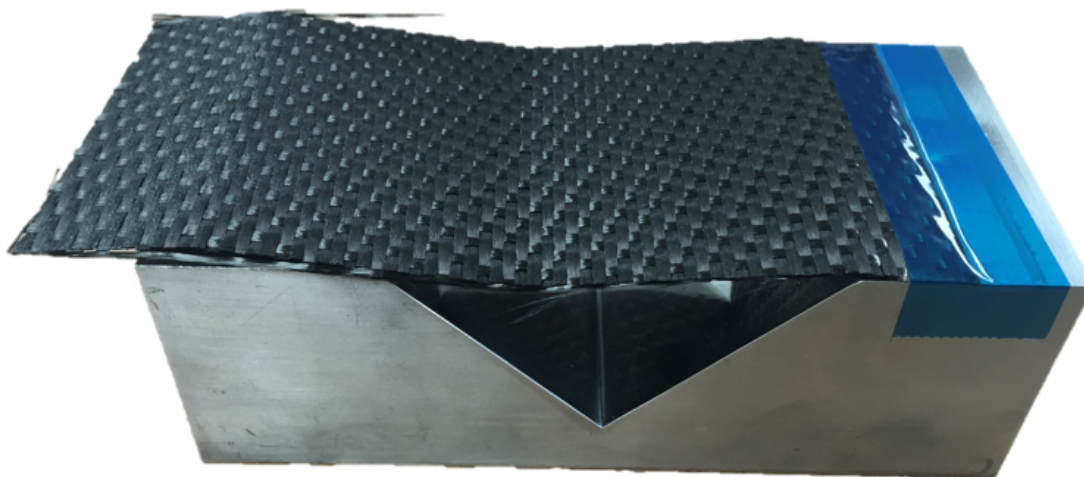


FIGURE 5.10 – Essai de flexion avec le tissu satin 5 carbone style 4540

Les essais de flexion permettent de comparer le comportement de différents tissus au niveau des coins et des bords. Tel que présenté au Tableau 5.3, les résultats démontrent que le tissu toile style 7500 et le satin 8 style 7781 de verre ont les meilleurs performances dans les coins, suivis du sergé style 1040 et du satin 5 carbone style 4540. Concernant la flexion sur les bord, le tissu toile style 7500 est préférable, suivi de près par le satin 8 de verre style 7781. Le sergé de carbone style 1040 se comporte mieux en flexion coin que le satin 5 carbone style 4540.

Cette méthode de caractérisation de la flexion permet une comparaison rapide de la capacité en flexion de différents tissus. Par contre, il est difficile de différencier deux tissus ne pouvant pas se conformer au coin. Par exemple, les résultats de flexion coin pour le sergé style 1040 et le satin 5 carbone style 4540 ne présentent aucune différence. Par contre, en pratique, le sergé style 1040 est plus facile à se conformer aux coins que le satin 5 carbone style 4540. Ces tissus pourraient être différenciés par des outils de mesure de flexion supplémentaires, ayant des angles différents.

Tableau 5.3 – Résultats des essais de flexion conduits avec l’outil de flexion

Tissu	Fibre	Architecture	Flexion coin [cm]		Flexion bord [cm]	
			[0/90]	[+/-45]	[0/90]	[+/-45]
7500	Verre	Toile	0.5	0.4	0.7	0.6
7781	Verre	Satin 8	0.5	0.5	0.9	1.4
1040	Carbone	Sergé	4	4	3.4	2.7
4540	Carbone	Satin 5	4	4	3.8	3.6

5.3 Friction

Une friction élevée entre les plis permet à un empilement de tissus de se comporter comme un tissu monolithique et facilite les manipulations de drapage. L’inverse est aussi vrai ; une faible friction entre les plis rend les manipulations difficiles. Une friction élevée entre les plis et le moule empêche le tissu en contact avec le moule de bouger en symbiose avec les autres plis, ce qui rend les manipulations plus difficiles. En termes de drapage, il est donc préférable d’avoir une friction entre les plis plus élevée, et une friction entre les plis et le moule plus faible.

Les Figures 5.11, 5.12, 5.13 et 5.14 montrent les courbes résultant des essais de friction entre les plis et les Figures 5.15, 5.16, 5.17 et 5.18 montrent les courbes résultant des essais de friction avec le moule pour le tissu toile de verre style 7500, le satin 8 de verre style 7781, le sergé de carbone style 1040 et le satin 5 carbone style 4540 respectivement. Théoriquement, les courbes de friction devraient diminuer linéairement avec le temps jusqu’à obtenir un couple nul. Pratiquement, la vitesse de rotation du moteur, le poids de la partie mobile ainsi que les imperfections des essais font en sorte que le couple ne diminue pas tout à fait à 0. Lors d’un essai à vide, un couple résiduel est présent à la fin de l’essai.

Pour l'évaluation de la friction entre les tissus, seules les valeurs de la friction statique sont évaluées, donc seulement la friction initiale. En pratique, c'est la friction statique qui est le plus souvent impliquée lors du drapage d'une pièce.

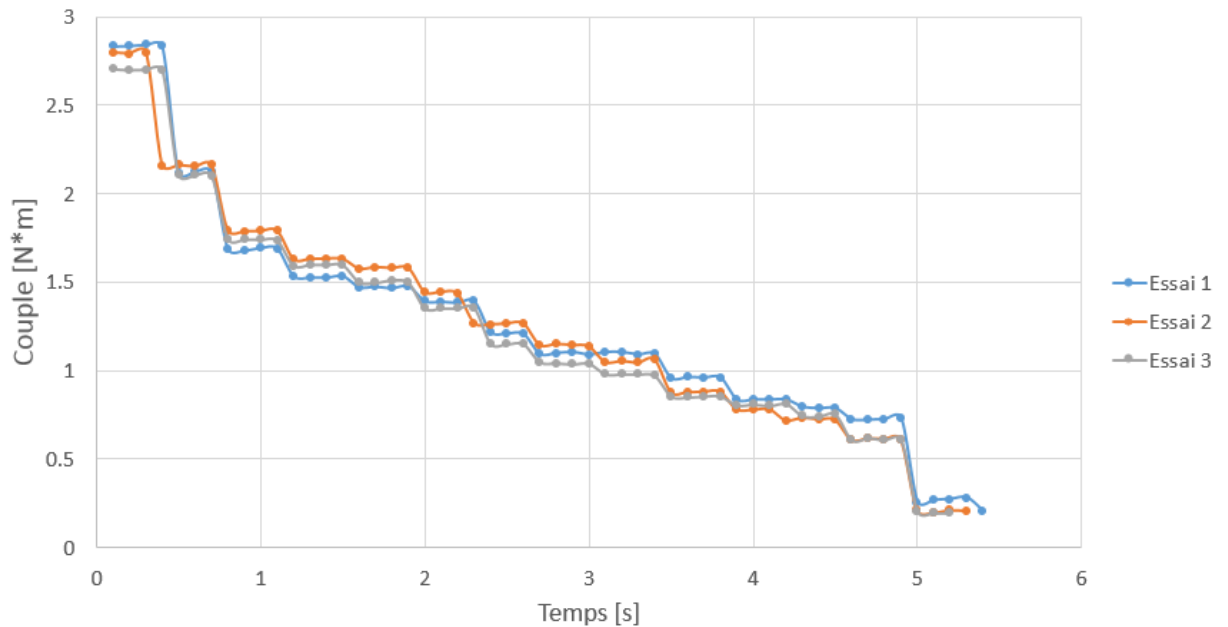


FIGURE 5.11 – Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu toile de verre style 7500

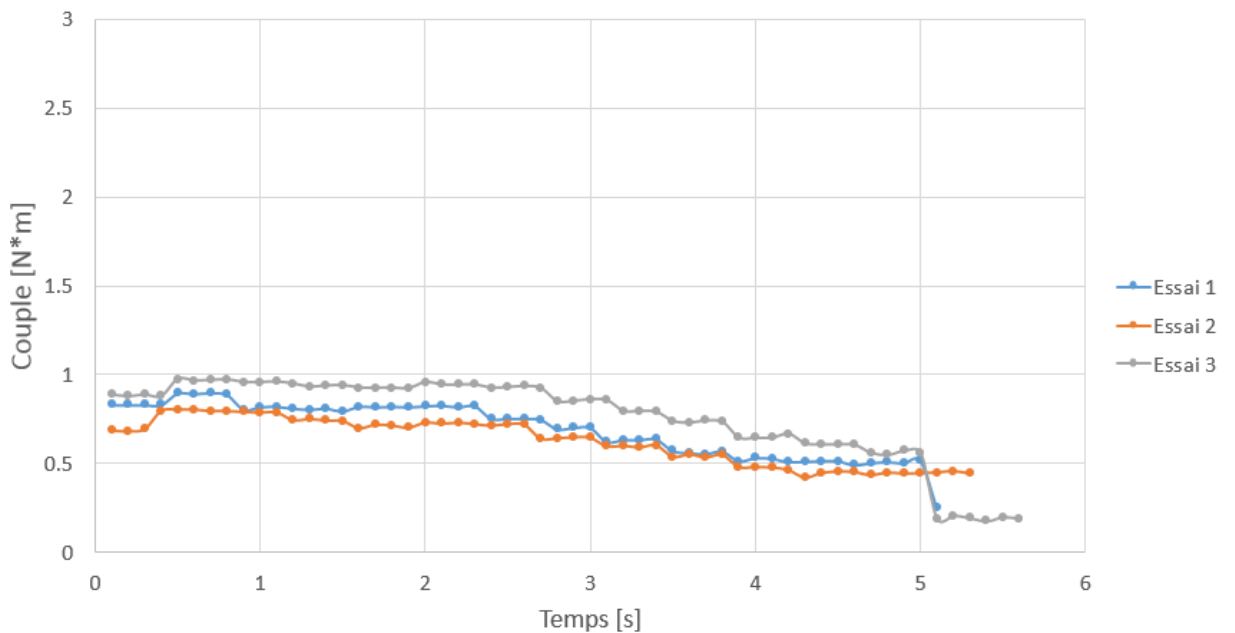


FIGURE 5.12 – Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu satin 8 de verre style 7781

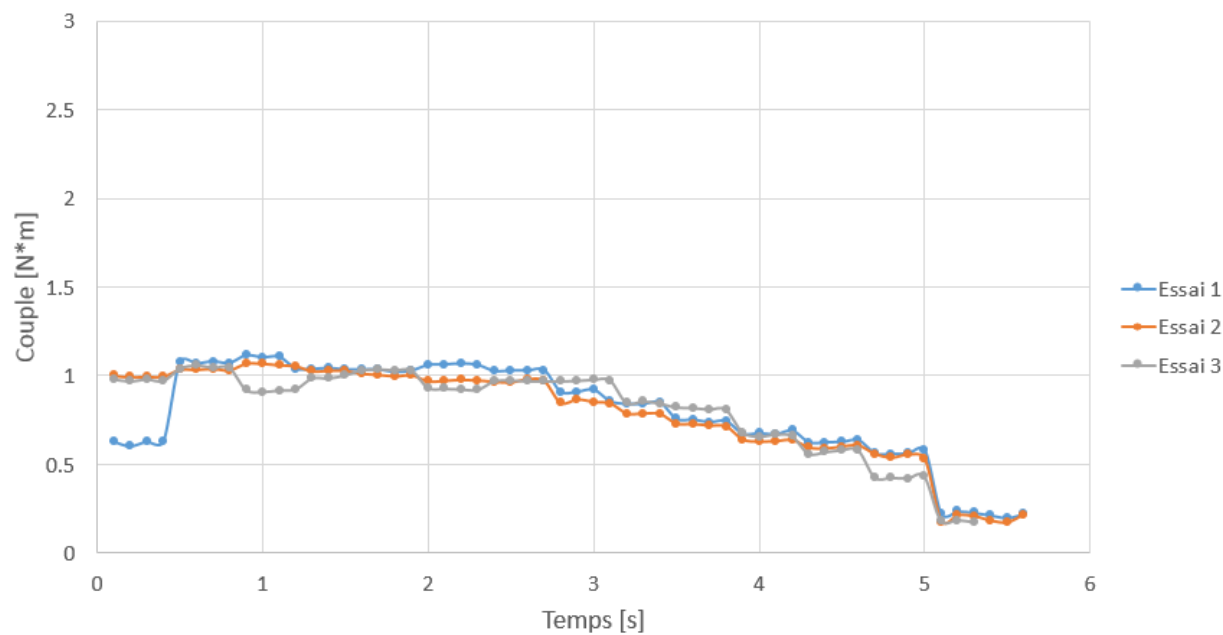


FIGURE 5.13 – Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu sergé de carbone style 1040

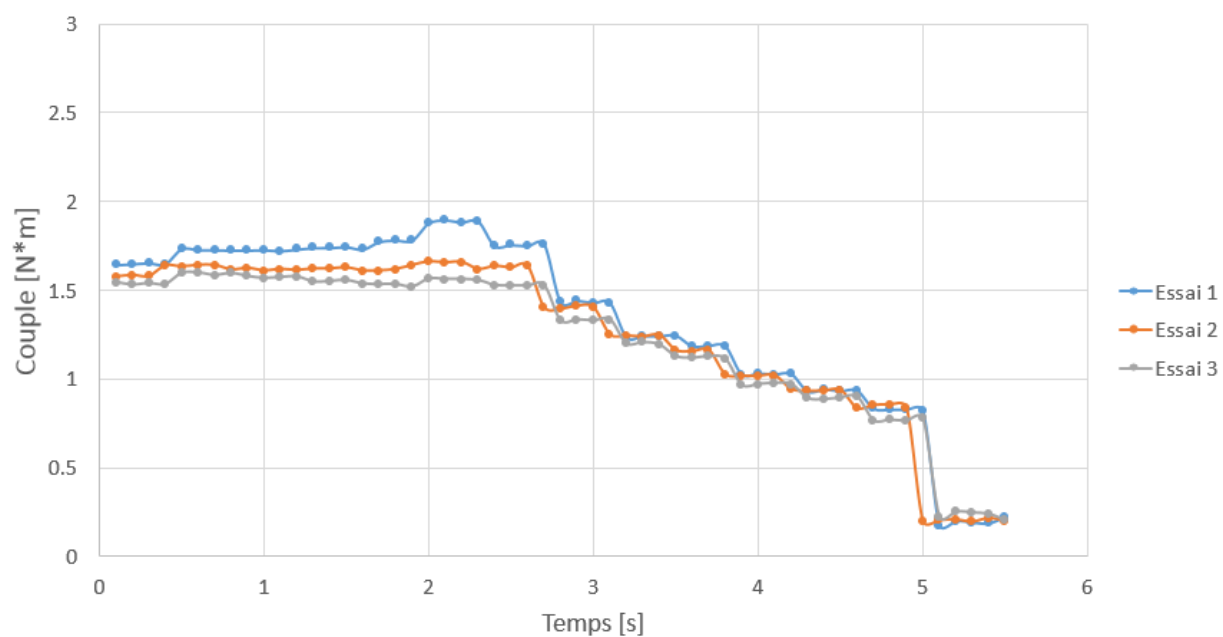


FIGURE 5.14 – Résultat des essais de friction entre les plis de tissus pour le tissu satin 5 de carbone poudré époxy style 4540

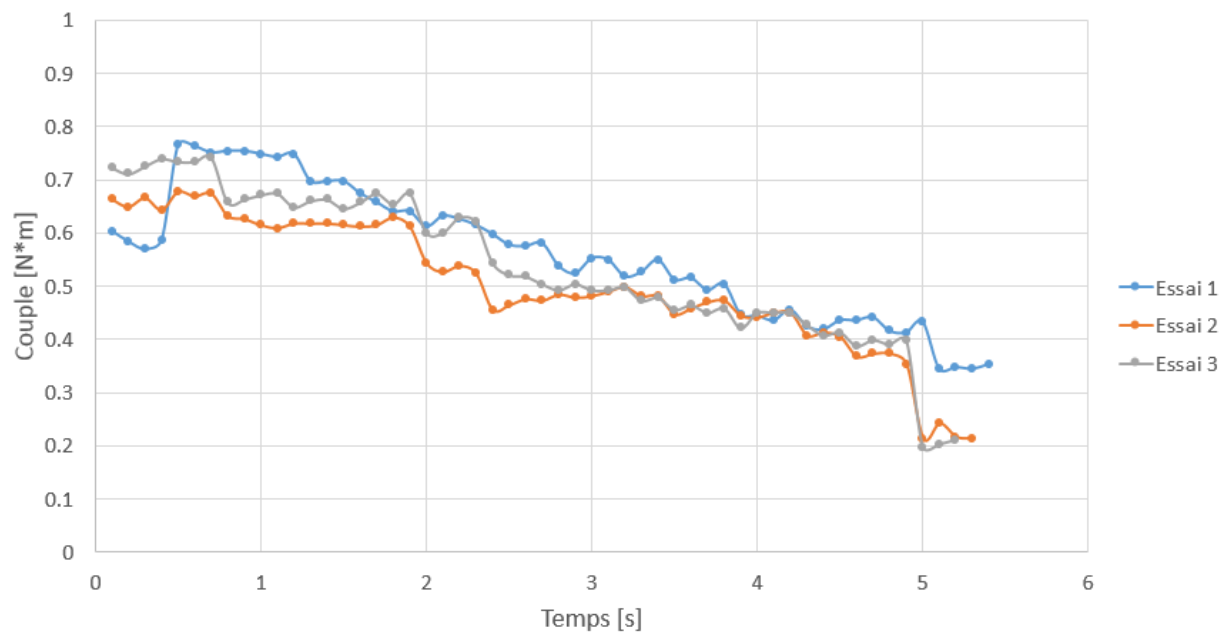


FIGURE 5.15 – Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu toile de verre style 7500

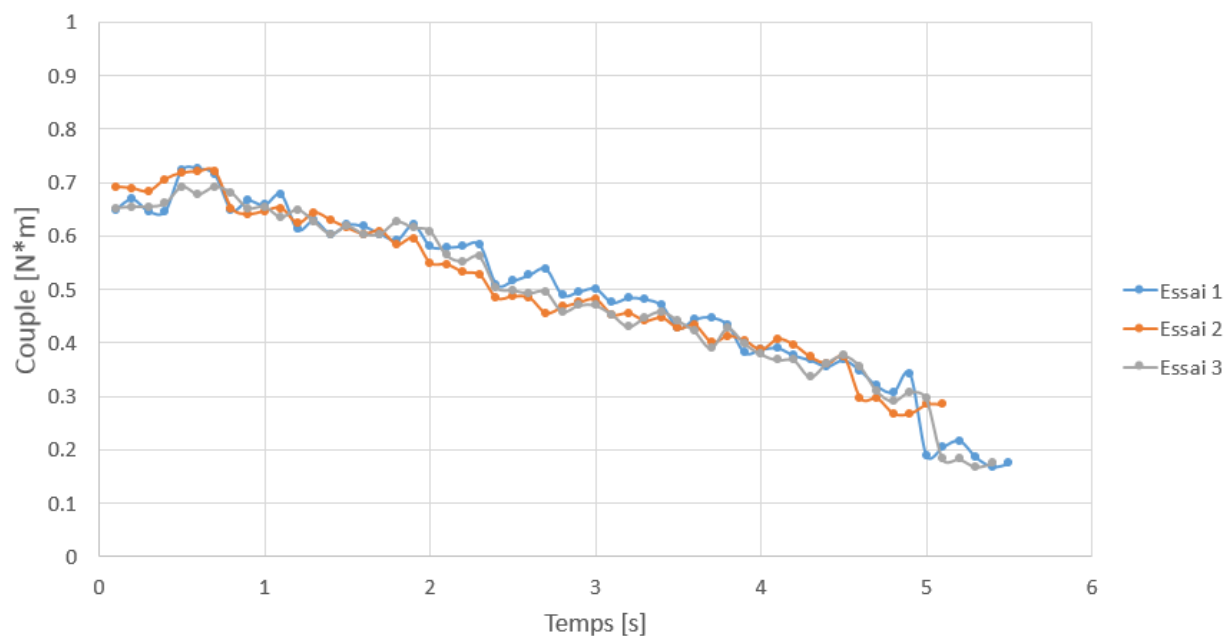


FIGURE 5.16 – Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu satin 8 de verre style 7781

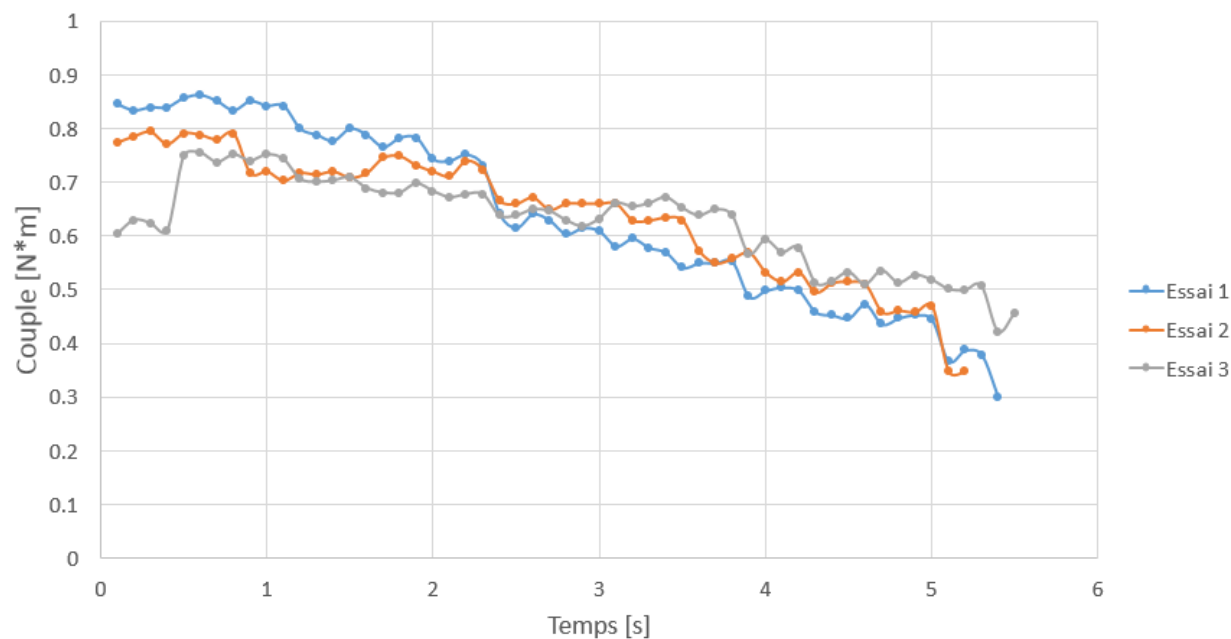


FIGURE 5.17 – Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu sergé de carbone style 1040

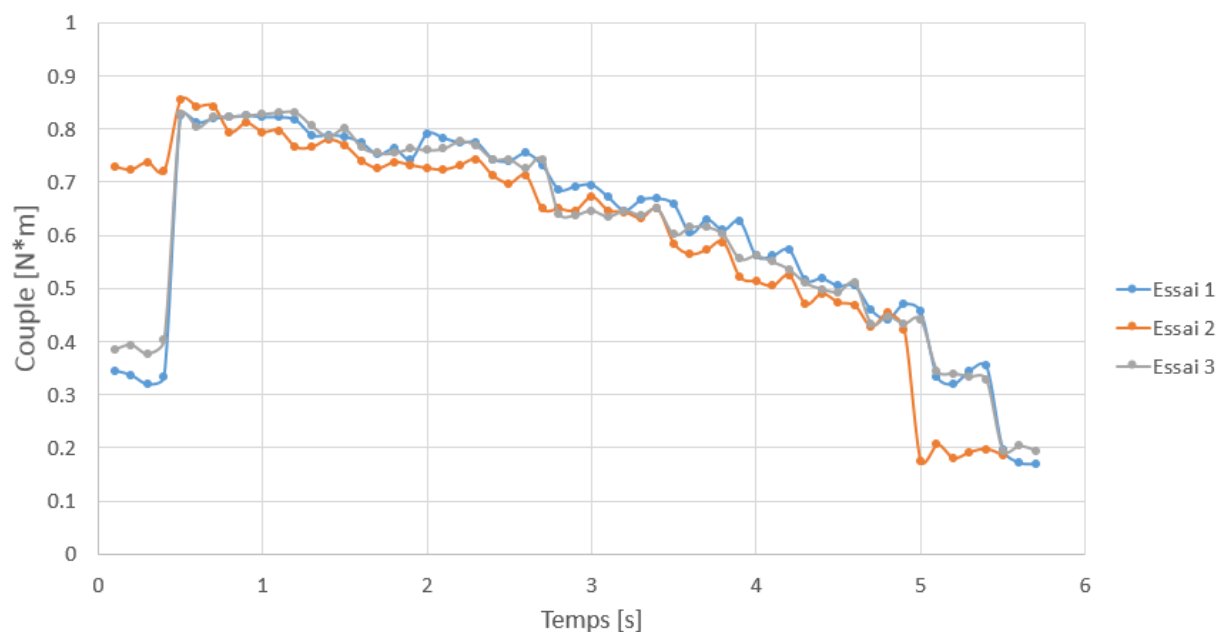


FIGURE 5.18 – Résultats des essais de friction avec le moule pour le tissu satin 5 de carbone poudré époxy style 4540

Le Tableau 5.4 présente les résultats pour la friction entre les plis et avec le moule pour les 4 tissus. Le tissu toile de verre style 7500 est le tissu ayant la plus haute friction entre les plis, dû à son faible facteur de couverture et à son architecture.

Ceci signifie qu'un empilement de plis de ce tissu sera plus facile à manipuler et à draper une géométrie donnée. Le satin 5 carbone style 4540 est le deuxième tissu offrant la friction la plus élevée entre les plis, principalement dû à la poudre d'époxy présente sur ses deux côtés. Le sergé de carbone style 1040 est le troisième tissu ayant la friction la plus élevée entre les plis. L'ensimage des brins de fibre de ce tissu diminue la friction entre les plis. Finalement, le satin 8 de verre style 7781 présente la plus faible friction entre les plis. Ce tissu contient de très petits entrelacements entre les mèches, ce qui promeut une faible friction entre les plis.

La friction avec le moule est similaire pour tous les tissus, tel que présenté au Tableau 5.4. L'important pour un bon drapage est de faire en sorte que le rapport de la friction entre les plis à la friction avec le moule soit le plus élevé possible. Plus ce rapport est élevé, plus les manipulations d'un empilement de plis de tissus seront facilitées. Le tissu toile de verre style 7500 sera donc le tissu le plus facile à manipuler lors du drapage de plis multiples, suivi du satin 5 carbone style 4540, du sergé de carbone style 1040 et finalement du satin 8 de verre style 7781.

Tableau 5.4 – Résultats des essais de friction conduits avec l'outil de caractérisation axiale

Tissu	Fibre	Architecture	Couple résultant de la friction entre les plis moyenne [N · m]	Écart type [N · m]	Couple résultant de la friction avec le moule moyenne [N · m]	Écart type [N · m]
7500	Verre	Toile	2.78	0.07	0.73	0.06
7781	Verre	Satin 8	0.89	0.10	0.71	0.02
1040	Carbone	Sergé	1.08	0.21	0.80	0.12
4540	Carbone	Satin 5	1.66	0.05	0.83	0.21

5.4 Stabilité

5.4.1 Effilochement

L'effilochement a été mesuré par la fraction d'aire effilochée pour des échantillons orientés à $0/90^\circ$ et $\pm 45^\circ$. Donc, plus le pourcentage est élevé, plus la résistance à l'effilochement du tissu est élevée. Le tissu satin 5 carbone style 4540 a la plus petite capacité à garder ses fibres, soit 11.6%. Étant donné que ce tissu contient de la poudre d'époxy de chaque côté, sa résistance à l'effilochement est largement augmentée. Au contraire, le tissu toile de verre style 7500 a une résistance à l'effilochement beaucoup moindre. En effet, ce tissu a un facteur de couverture très faible, ce qui facilite la perte de brins sur les bords. Le tissu satin 8 de verre style 7781 est tissé très serré avec un facteur de couverture très élevé et de petites mèches. Ces caractéristiques conduisent à un effilochement moyen. Le sergé de carbone style 1040 a une résistance à l'effilochement supérieure à celle des tissus de verre. Ses brins sont plus massifs (6k) que les brins des tissus de verre. Il est donc plus difficile de perdre une grande quantité de brins. Par contre, expérimentalement, il est à remarquer que les brins situés sur les bords des échantillons de sergé de carbone style 1040 sont très difficiles à maintenir en place. Tel que présenté au Tableau 5.5, l'air effiloché dépend fortement de l'angle entre les mèches de chaîne et de trame. Dépendamment du tissu utilisé, la résistance à l'effilochement peut être préférable à $0/90^\circ$ ou bien à $\pm 45^\circ$. Avec les tissus analysés, seul le tissu toile de verre style 7500 a une résistance plus faible avec une orientation à $\pm 45^\circ$.

Tableau 5.5 – Résultats des essais d’effilochement

Tissu	Type de fibre	Architecture	Orienta- tion [°]	Aire effilochée [%]	Écart type [%]	Aire effilochée moyenne [%]
7500	Verre	Toile	0/90 +/-45	33,7 26,7	5.63 6.33	30,2
7781	Verre	Satin 8	0/90 +/-45	17,3 30,4	2.58 2.56	23,9
1040	Carbone	Sergé	0/90 +/-45	9,5 31,5	1.45 1.44	20,5
4540	Carbone	Satin 5	0/90 +/-45	7,1 16,1	2.24 1.47	11,6

5.4.2 Résistance aux goupilles

La résistance aux goupilles a été mesurée en évaluant le temps auquel la goupille est retirée du tissu. Les Figures 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22 illustrent les courbes du couple en fonction du temps pour les essais de résistance aux goupilles avec les mèches de chaîne et de trame orienté à 0/90° et les Figures 5.23, 5.24, 5.25 et 5.26 les courbes avec les mèches de chaîne et de trame orientées à +/-45°. 3 essais ont été effectués pour chaque orientation. Le temps est une fonction linéaire de la distance parcourue par le bloc mobile. Une diminution drastique du couple correspond au moment où la goupille s’est retirée. Il est donc possible de savoir à quelle distance la goupille s’est retirée du tissu, tel que mentionné à la sous-section 4.4.6. Le temps de décrochage de la goupille sera comparé pour chaque tissu.

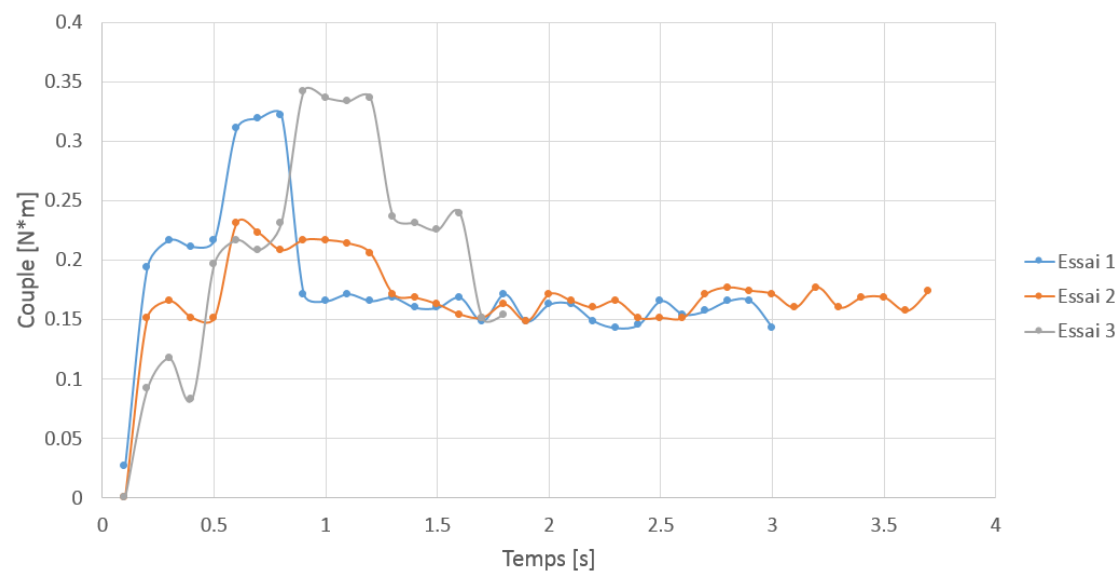


FIGURE 5.19 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7500 orienté à 0/90°

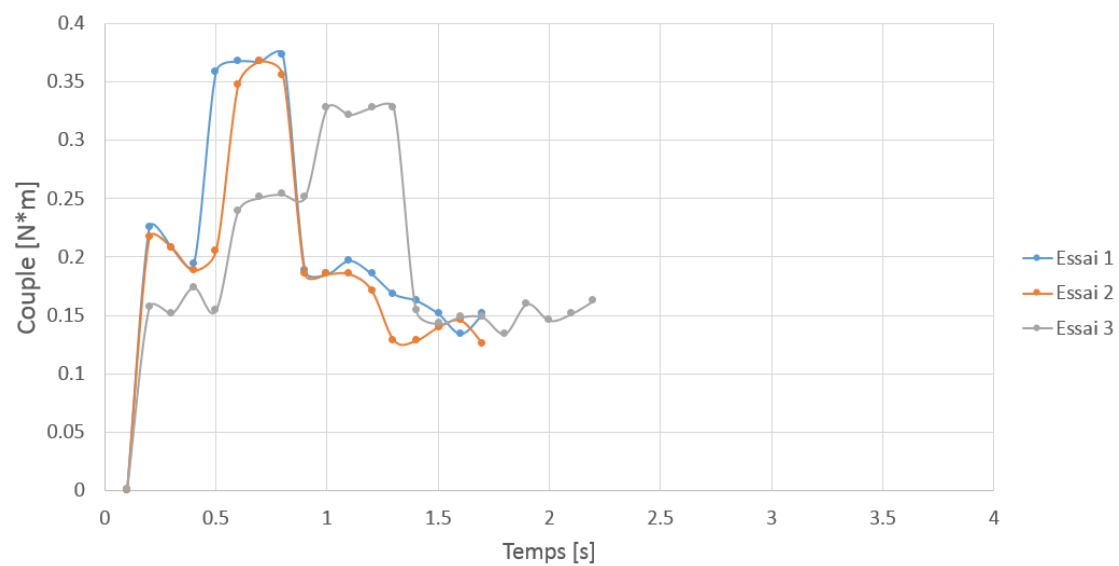


FIGURE 5.20 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7781 orienté à 0/90°

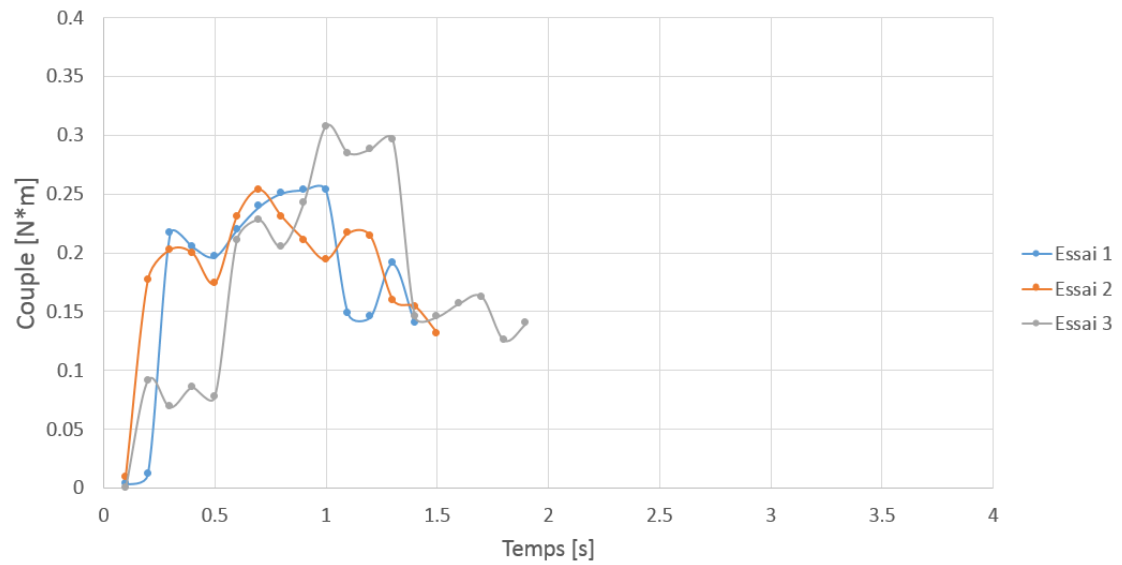


FIGURE 5.21 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu sergé de carbone style 1040 orienté à 0/90°

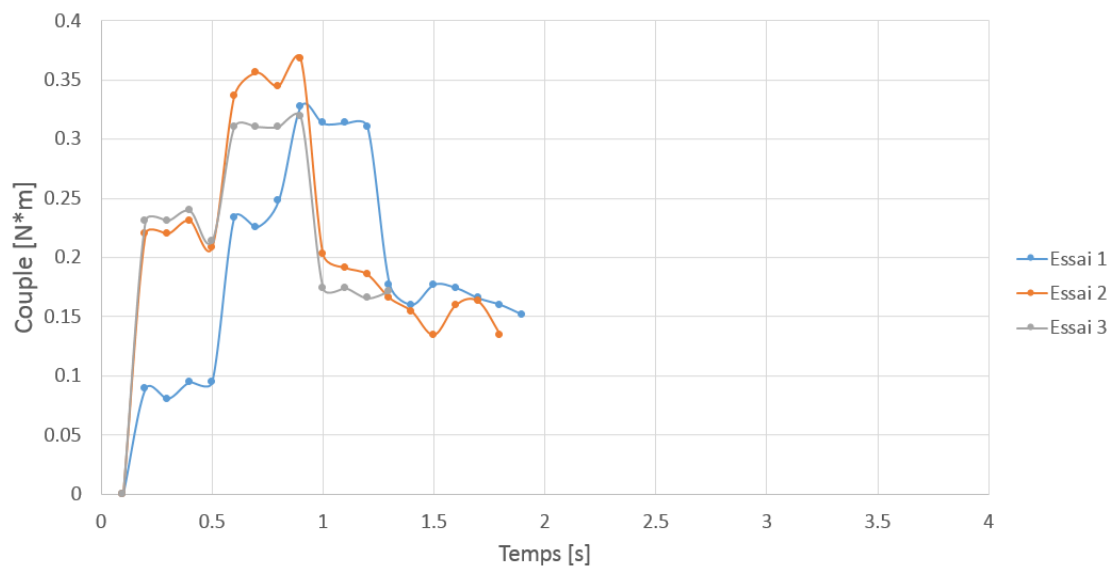


FIGURE 5.22 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu satin 5 carbone style 4540 orienté à 0/90°

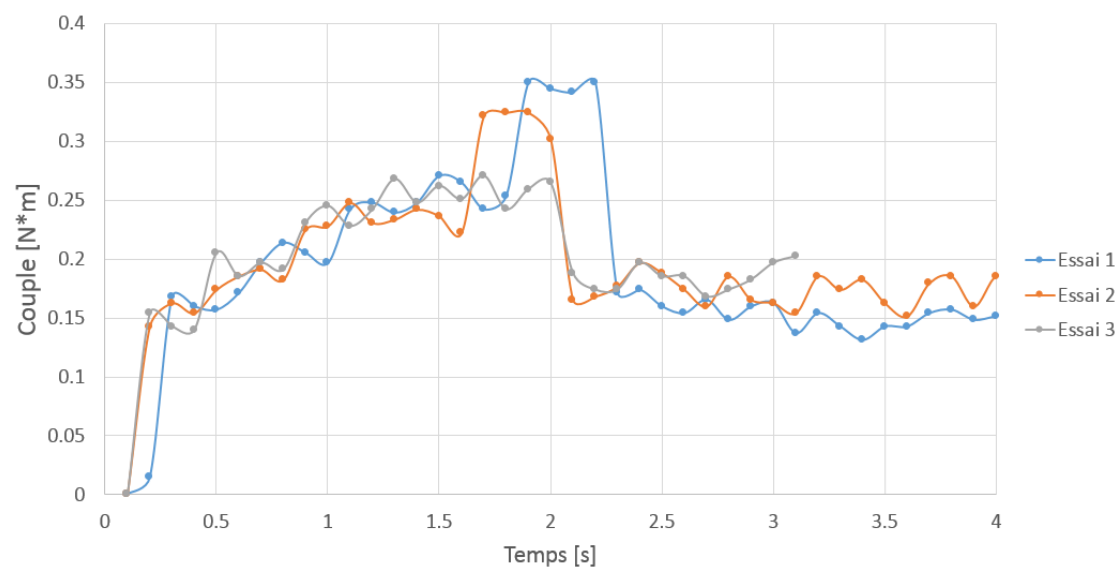


FIGURE 5.23 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7500 orienté à $\pm 45^\circ$

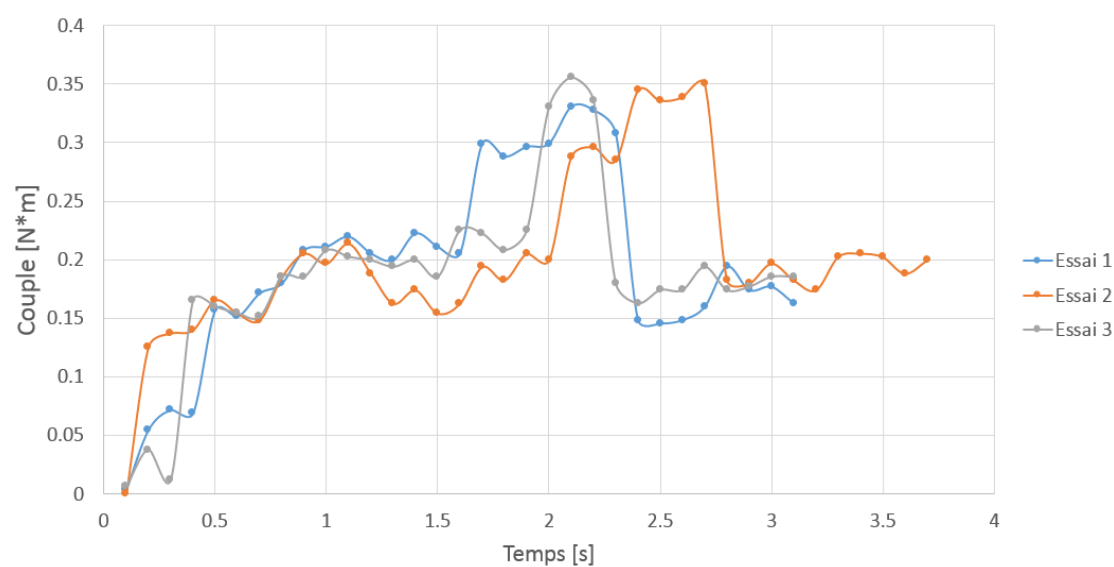


FIGURE 5.24 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu toile de verre style 7781 orienté à $\pm 45^\circ$

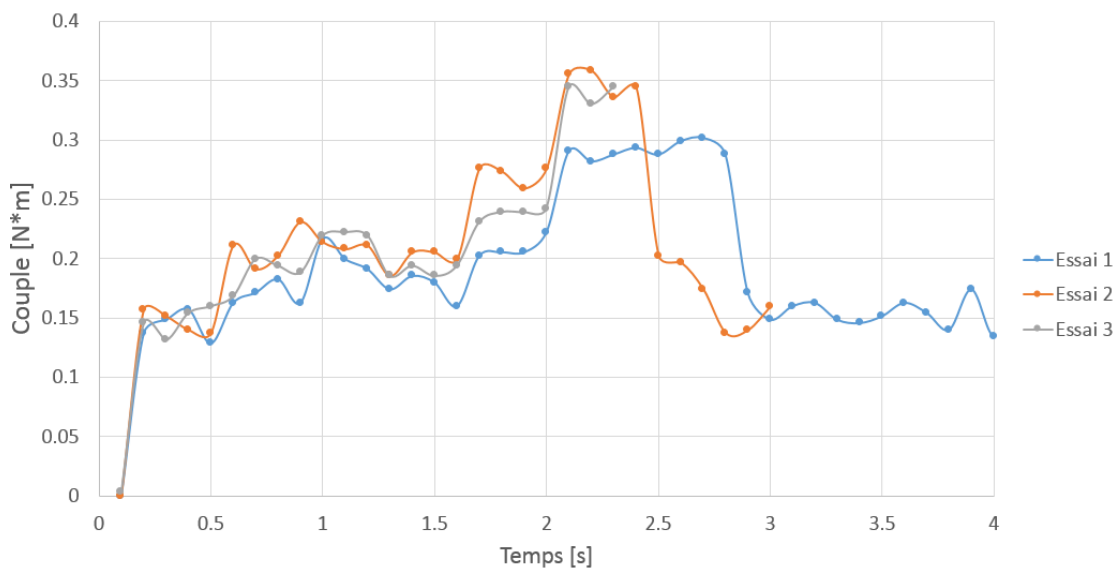


FIGURE 5.25 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu sergé de carbone style 1040 orienté à $\pm 45^\circ$

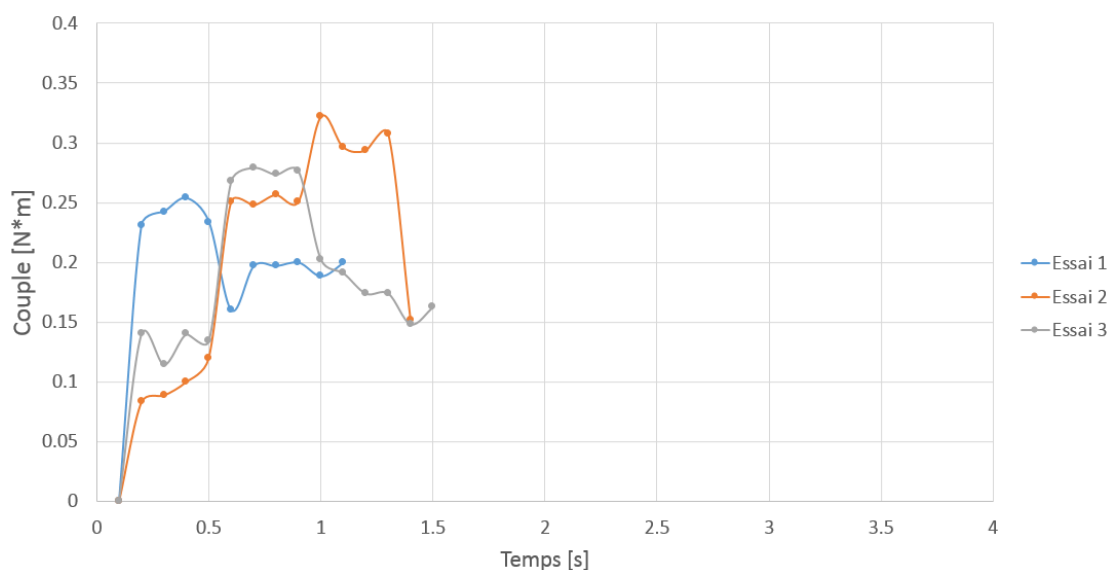


FIGURE 5.26 – Résultats des essais de résistance aux goupilles pour le tissu satin 5 carbone style 4540 orienté à $\pm 45^\circ$

Le Tableau 5.6 présente les résultats de la résistance aux goupilles pour chaque tissu. Avec les orientations de fibres à $0/90^\circ$, le tissu toile de verre style 7500 et le sergé de carbone style 1040 présentent des résistances équivalentes et supérieures à celles des deux autres tissus analysés. En général, la résistance aux goupilles est supérieure lorsque les fibres sont orientées à $\pm 45^\circ$. Ce phénomène est principale-

ment dû au cisaillement induit dans les tissus avant le décrochement de la goupille. Avec les mèches de chaîne et de trame orientées à $\pm 45^\circ$, le tissu satin 8 de verre style 7781 et le sergé de carbone style 1040 ont une résistance aux goupilles équivalente et supérieure aux deux autres tissus. Le satin 5 de carbone style 4540 a un cisaillement très faible, donc il n'y a aucun changement entre sa résistance à $0/90^\circ$ et $\pm 45^\circ$.

Tableau 5.6 – Résultat Goupilles

Tissu	Fibre	Architecture	Temps de décrochage des goupilles $0/90^\circ [s]$	Écart type $[s]$	Temps de décrochage des goupilles $\pm 45^\circ [s]$	Écart type $[s]$
7500	Verre	Toile	0.9	0.15	1.9	0.12
7781	Verre	Satin 8	0.7	0.12	2.2	0.26
1040	Carbone	Sergé	0.9	0.25	2.2	0.31
4540	Carbone	Satin 5	0.7	0.17	0.7	0.40

5.5 Analyse comparative

Ayant des valeurs quantifiées pour chacune des caractéristiques, un tableau comparatif peut être construit. La Figure 5.27 montre les méthodes utilisées pour la caractérisation de chacun des paramètres tel qu'expliqué dans les sections précédentes. Les méthodes de caractérisation sont rapides et représentent les enjeux réels liés au drapage chez Hutchinson.

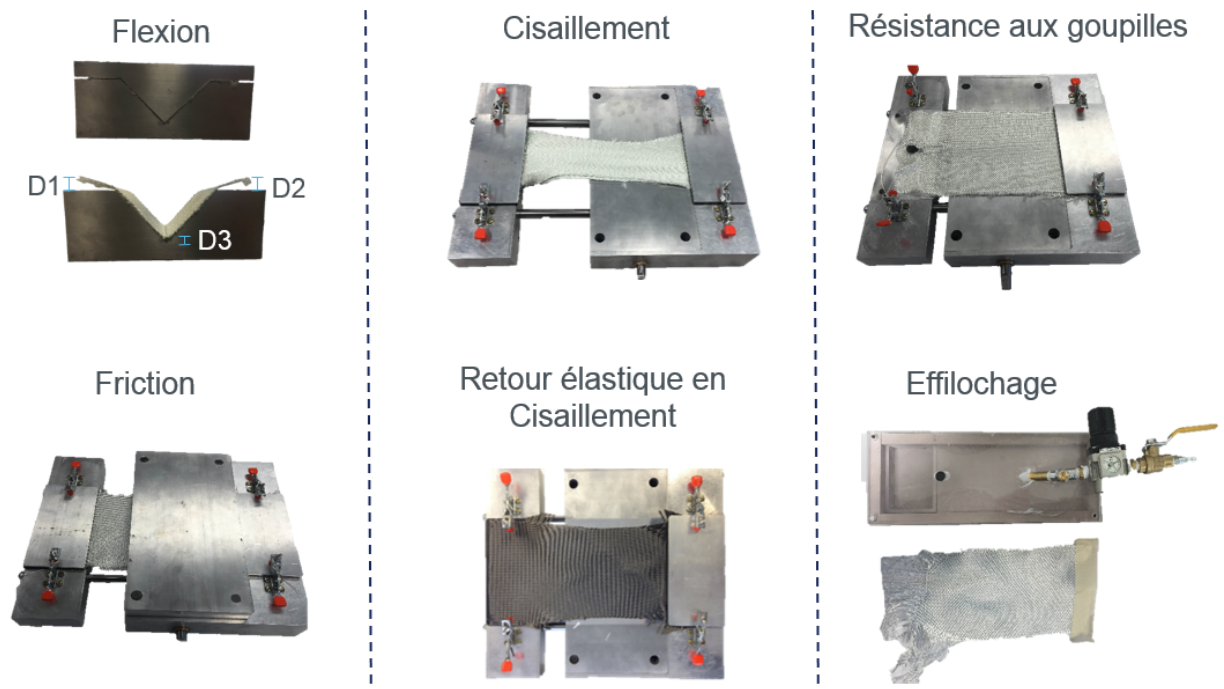


FIGURE 5.27 – Résumé des caractérisations des tissus

Le Tableau 5.7 présente les caractéristiques de drapabilité pour les 4 tissus analysés. Ces caractéristiques sont quantifiées à l'aide des instruments de caractérisation illustrés à la Figure 5.27. La friction avec le moule n'est pas représenté sur ce tableau compte tenu du faible écart entre les tissus et du peu d'impact sur le drapage.

Tableau 5.7 – Tableau résumé de la drapabilité avec valeurs quantifiées

Tissus	Cisaillage	Retour Cisaillage	Flexion coin		Flexion bord		Friction entre les plis	Effilochement		Stabilité des goupilles	
			[0-90]	[+45]	[0-90]	[+45]		[0-90]	[+45]	[0-90]	[+45]
Toile verre 7500	2,2	0,47	0,5	0,4	0,7	0,6	24,62	33,5	57,8	0,9	1,9
Satin 8 verre 7781	1,4	4,7	0,5	0,5	0,9	1,4	7,9	17,3	30,4	0,7	2,2
Sergé carbone 1040	1,6	6,38	4	4	3,4	2,7	9,57	9,5	31,5	0,9	2,2
Satin 5 carbone 4540	1,5	9,7	4	4	3,8	3,6	14,67	7,1	16,1	0,7	0,7
Échelle pour base 10											
Valeur maximale	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2
Valeur minimale	3,5	12	4	4	4	4	30	40,8	69,6	1,5	5

Les valeurs quantifiées pour chaque tissu sont transposées sur une échelle de 1 à 10, 10 représentant une bonne performance et 1 une mauvaise performance pour la caractéristique en question. Le Tableau 5.8 quantifie le comportement de chaque tissu sur une échelle de 1 à 10. Les échelles établies suivent une fonction linéaire pour toutes les caractéristiques, excepté pour la flexion dans un coin et sur les bords, qui suivent une fonction logarithmique. Les valeurs résultant des essais de flexion ne permettaient pas de différencier les tissus étant donné les grands écarts des résultats. Cette échelle permet donc de différencier les tissus ayant une très bonne capacité en flexion et ceux ayant une capacité en flexion moindre. Les échelles ont été établies avec les valeurs minimales et maximales illustrés dans le Tableau 5.7.

Tableau 5.8 – Tableau résumé de la drapabilité sur une échelle de 1 à 10

Tissus	Cisaillage [10 = haut cisaillage]	Retour Cisaillage [10 = faible retour]	Flexion coin [10 = haute flexion]		SB Flexion bord [10 = haute flexion]		Friction plis [10 = haute friction]		Effilochement [10 = faible effilochement]		Stabilité goupilles [10 = haute stabilité]	
			[0/90]	[+/-45]	[0/90]	[+/-45]	[0/90]	[+/-45]	[0/90]	[+/-45]	[0/90]	[+/-45]
Toile verre 7500	6	8	7	8	6	7	8	8	2	2	5	7
Satin 8 verre 7781	4	6	7	7	5	4	3	6	6	6	4	8
Sergé carbone 1040	5	5	1	1	1	2	3	8	5	5	5	8
Satin 5 carbone 4540	4	2	1	1	1	1	5	8	8	8	4	2

Chapitre 6

Évaluation des Géométries de Base

Ce chapitre met en évidence le concept de base de données pour les géométries de base. Tout d'abord, plusieurs moules ont été identifiés chez Hutchinson et les géométries de base ont été déterminées à partir de ceux-ci. Les paramètres des géométries de base influençant le drapage ont été identifiés selon les variations de ceux-ci sur les moules réels. Les géométries de base sont donc adaptées aux moules disponibles chez Hutchinson. La méthode de décomposition est expliquée et plusieurs géométries sont quantifiées. Ensuite, les géométries de base de chaque moule ont été caractérisées et présentées dans le tableau de caractérisation des tissus. La difficulté de draper les géométries de base est déterminée suite au drapage de différents tissus, en comparant la capacité de drapage de chaque tissu (Tableau 5.8) avec le résultat du drapage obtenu.

6.1 Géométries de base

Les géométries de base ont été déterminées à partir d'une banque de géométries de moules disponibles chez Hutchinson. Les Figures 6.1 et 6.2 illustrent les 10 moules qui ont été analysés afin d'identifier les géométries de base et leurs paramètres. Parmi ces 10 géométries, 5 ont été sélectionnées selon la disponibilité de ceux-ci vis-à-vis la production afin d'effectuer une caractérisation de leurs géométries de base (M02772, M04603, M04607, M04632 et M04624). Des détails de ces géométries complexes ce retrouvent à l'Annexe C.

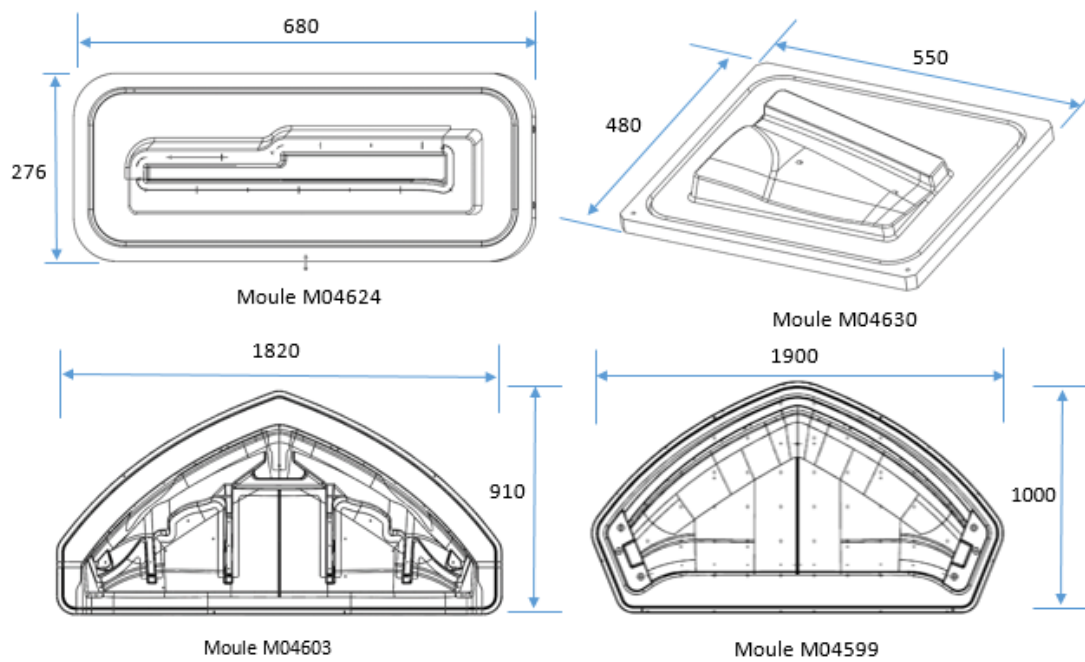


FIGURE 6.1 – Première série des géométries des moules étudiés chez Hutchinson (dimensions en mm)

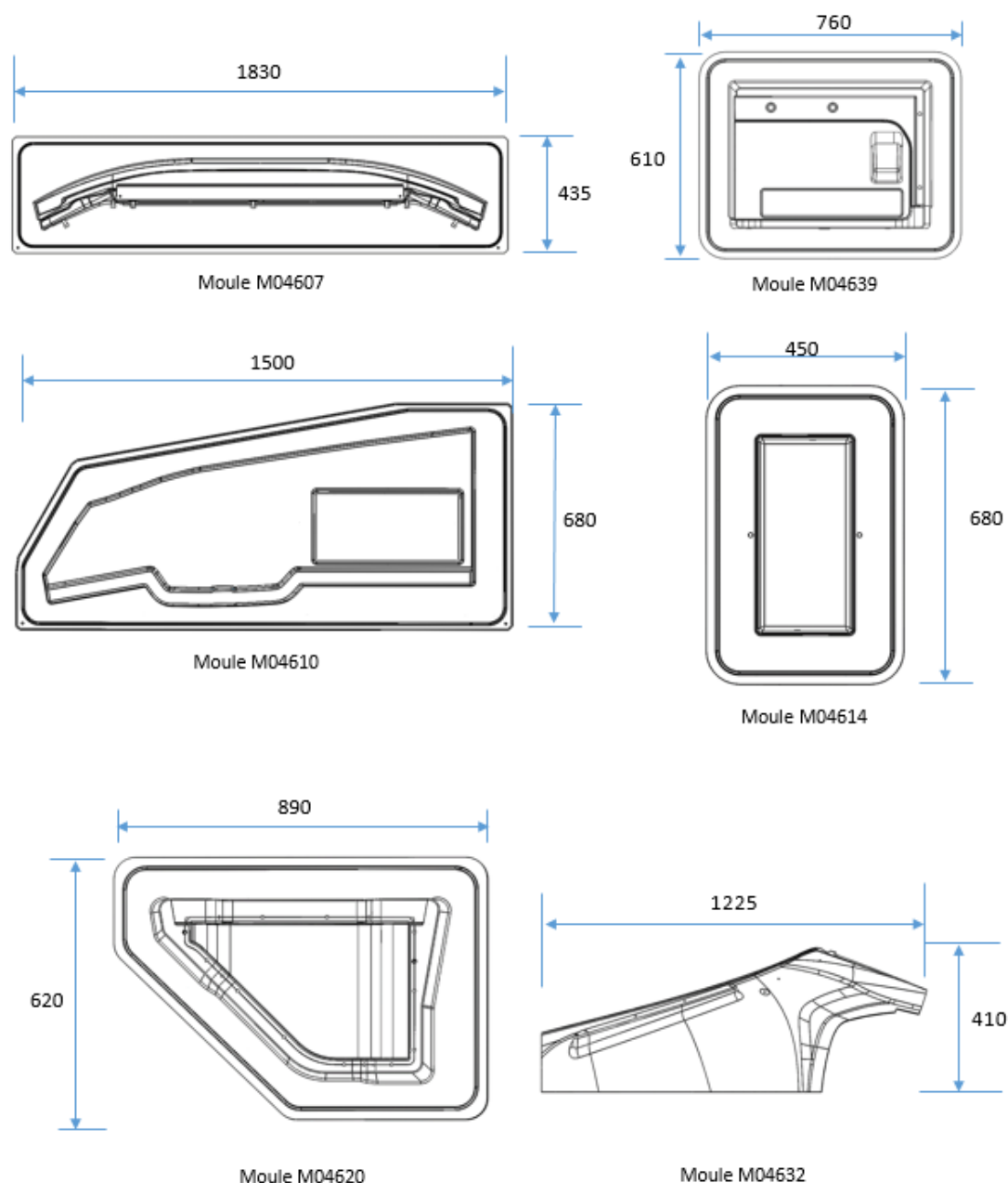


FIGURE 6.2 – Deuxième série des géométries des moules étudiés chez Hutchinson (dimensions en mm)

Suite à plusieurs essais de drapage préliminaires faits sur différents moules, les géométries de base ont été quantifiées selon plusieurs paramètres influençant le drapage. La Figure 6.3 illustre les géométries de base retenues ainsi que leurs paramètres tels que repérés sur les 10 moules de Hutchinson.

Les paramètres illustrés à la Figure 6.3 ont été sélectionnés pour cette première

étude en fonction des variations de ceux-ci dans les moules. Certains paramètres pourraient avoir une influence importante sur le drapage, mais les variations réelles de ces paramètres dans les moules chez Hutchinson étaient négligeables.

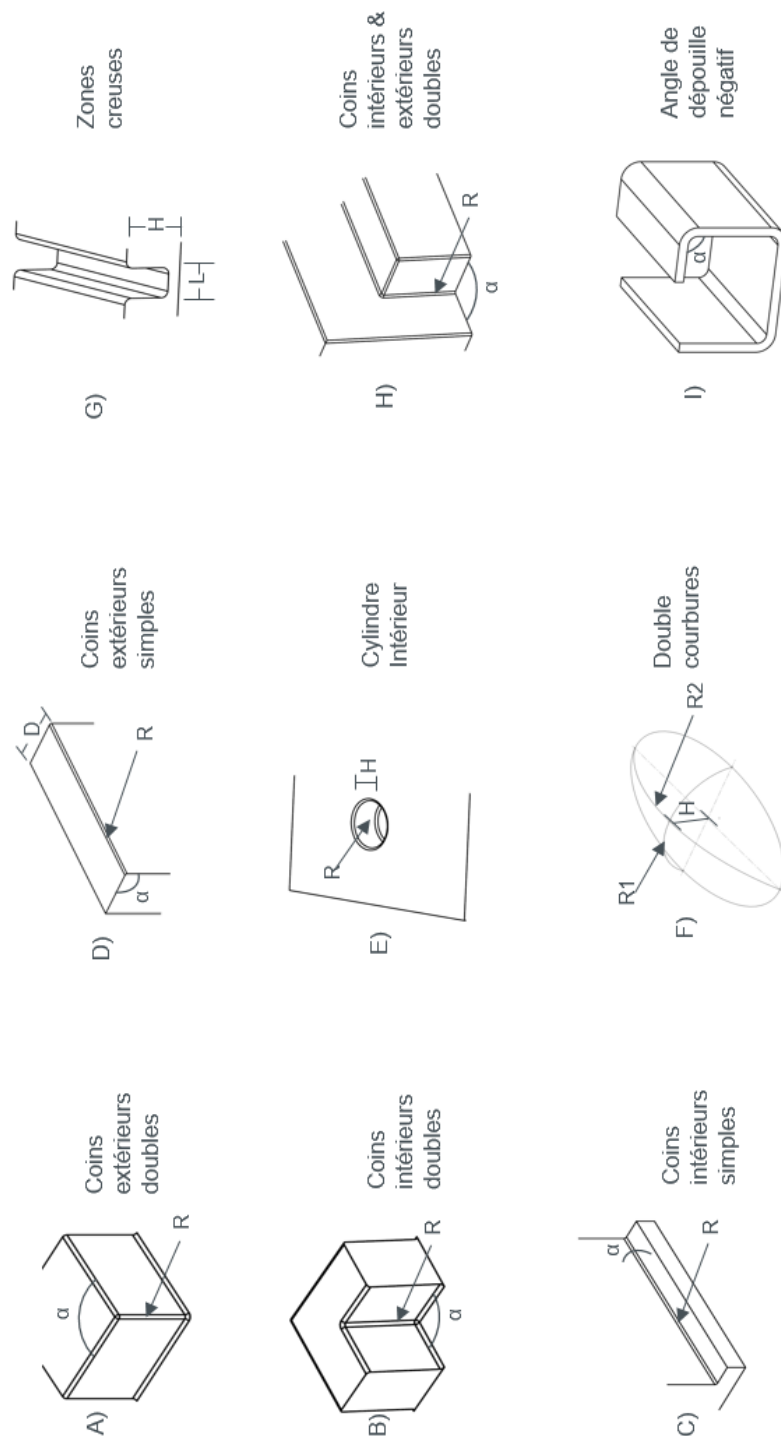


FIGURE 6.3 – Énumération des géométries de base et paramètres définissant chacune

Les géométries de base ont été déterminées de façon à ce que n'importe quelles géométries complexes puissent être reconstruites à partir de ces géométries de base. Inversement, une géométrie complexe peut donc être décomposée en plusieurs géométries de base (décomposition d'une géométrie complexe).

Les coins extérieurs et intérieurs doubles (géométrie A et B) sont les géométries de base les plus fréquentes dans les moules de Hutchinson. Ces géométries peuvent présenter différents niveaux de difficultés au niveau du drapage. Les paramètres les plus influents observés sont le rayon du coin et l'angle entre les deux parois verticales, tel qu'expliqué précédemment.

Les coins intérieurs et extérieurs simples (géométrie C et D) sont également des géométries de base très présentes, mais généralement moins problématiques. Par contre, un certain temps de drapage est associé à ces géométries et celles-ci doivent donc être prises en compte lors des décompositions. Le paramètre principal influençant le drapage de ces coins simples est leur rayon de courbure. L'angle entre la paroi verticale et la paroi horizontale est aussi influent, mais cet angle varie très peu sur les moules de Hutchinson.

Les cylindres intérieurs (géométrie E) se retrouvent rarement sur les moules de Hutchinson. Seulement 2 cas ont été repérés, les paramètres sont le rayon et la hauteur du cylindre.

Plusieurs moules possèdent une double courbure (géométrie F) sur l'ensemble de la géométrie complexe. Par exemple, le moule M04603 contient une légère double courbure sur toute la géométrie, ce qui augmente la difficulté globale du drapage.

Les zones creuses (géométrie G) sont des géométries pouvant être problématiques sur plusieurs moules. Celles-ci sont considérées seulement lorsque leur largeur est inférieure à 5 cm. Cette largeur de 5 cm a été déterminée avec les techniciens qui réalisent le drapage des moules de Hutchinson ; cette largeur représente la dimension entre deux coins intérieurs simples où le drapage commence à être problématique. Lors de la décomposition, si la zone creuses est prise en considération, les coins intérieurs et extérieurs simples ne doivent pas être considérés afin de ne pas doubler la difficulté du drapage.

Les coins intérieurs & extérieurs doubles (géométrie H) sont des géométries de base très problématiques où trois plans se croisent en un même point. Les paramètres influant observés sur les moules de Hutchinson sont le rayon et l'angle entre les deux parois verticales.

Finalement, les angles de dépouille négatifs ("undercuts") (géométrie I) ajoutent des difficultés aux géométries de base. Ceux-ci peuvent être combinés à n'importe quelle autre géométrie de base et la difficulté de drapage s'en trouve largement augmentée. Les angles de dépouille négatifs ("undercuts") sont présents lorsque les patrons doivent être drapés contre l'effet de la gravité et sont quantifiés selon l'angle auquel la géométrie de base est par rapport au plan horizontal.

6.2 Décomposition

Les géométries de base des moules de Hutchinson ont été quantifiées. Les moules illustrés aux Figures 6.1 et 6.2 ont été décomposés en géométries de base. La Figure

6.4 illustre la décomposition en géométries pour le moule M04603 (voir annexe D pour autres géométries).

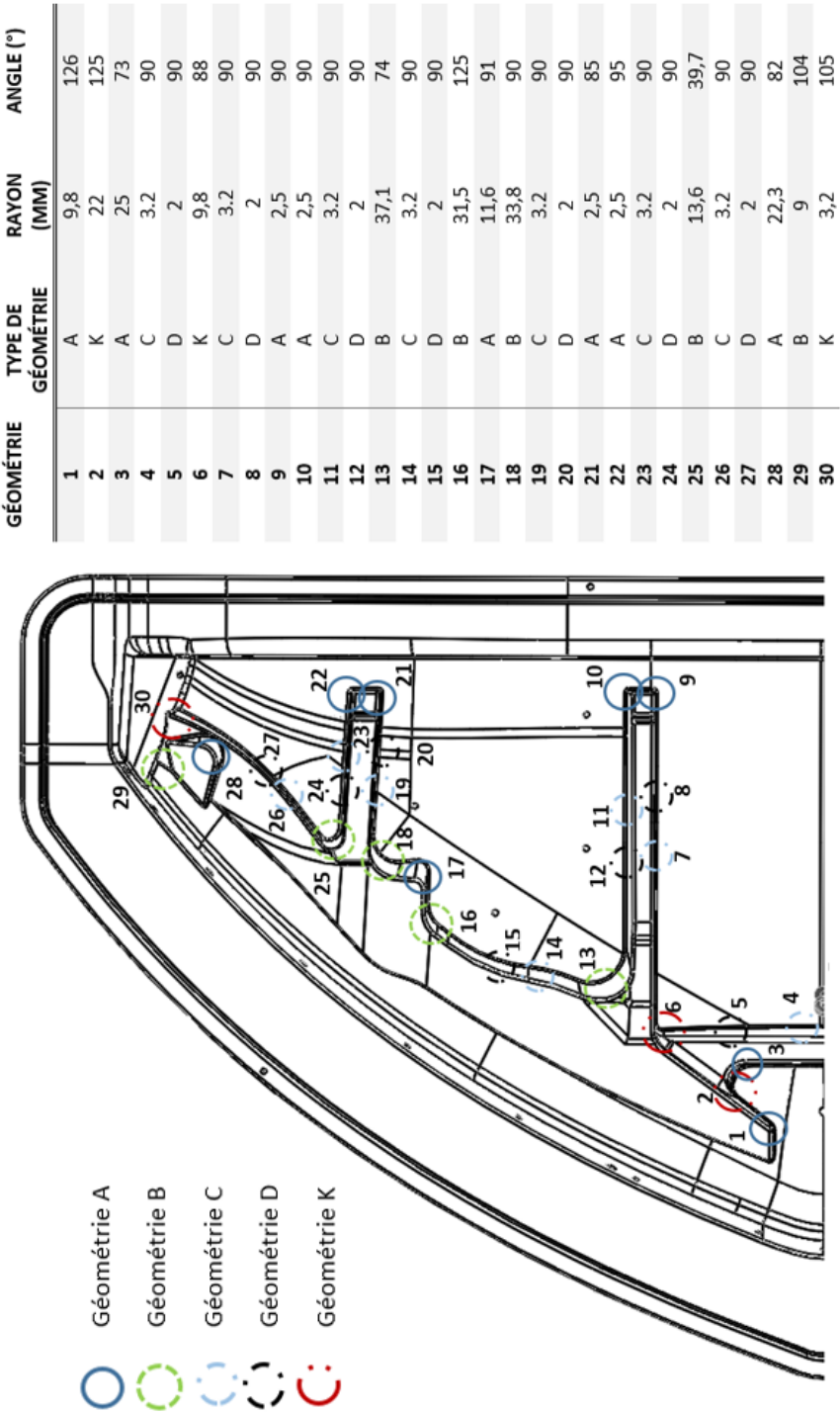


FIGURE 6.4 – Décomposition du moule M04603

Le moule M04603, montrée à la Figure 6.4, contient 5 des 9 géométries de base identifiées, soit les géométries A, B, C, D et K, Figure 6.3. Étant donné que ce

le moule est symétrique, seulement la moitié du moule a été décomposée en géométries de base. Cette moitié de moule a été décomposée en 30 géométries de base, donc un total de 60 géométries de base sont présentes sur ce moule. Chacune des géométries a été quantifiée par deux paramètres influents.

La décomposition se fait directement à partir du fichier CAO, où les géométries de base peuvent être quantifiées. La Figure 6.5 illustre un exemple de quantification de géométries de base. Dans cet exemple, un coin extérieur double et deux coins intérieurs doubles sont quantifiés. Les trois géométries ont des rayons et angles différents.

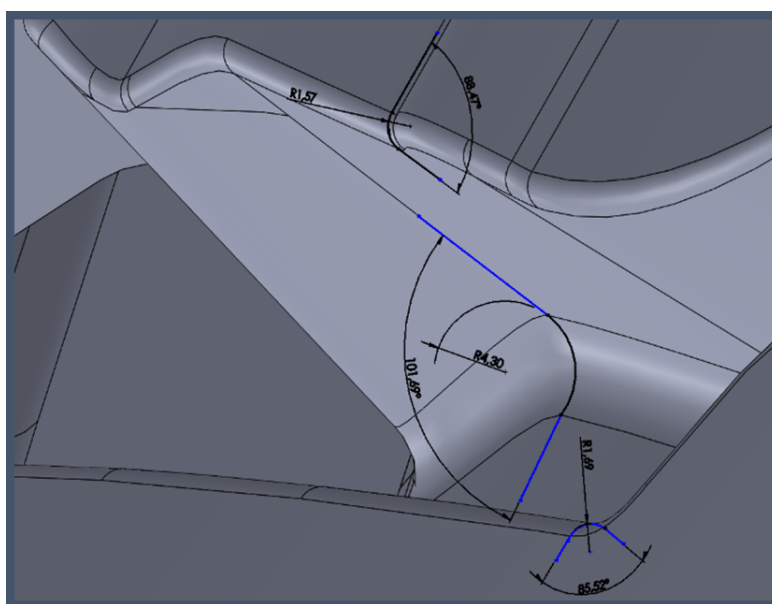


FIGURE 6.5 – Décomposition sur le fichier CAO pour le moule M04603

6.3 Caractérisation

L'étape de caractérisation des géométries est effectuée une seule fois. Cinq moules ont été choisis afin de les caractériser en géométries de base selon différents paramètres ; M02772, M02788, M04102, M04603 et M04607 (Figures 6.1 et 6.2). Des

essais de drapage sur chaque géométrie de base ont été effectués afin de quantifier la difficulté liée aux caractéristiques analysées soit le cisaillement, la flexion, la friction et la stabilité (effilochement et résistance aux goupilles). Les caractéristiques de cisaillement et de flexion sont quantifiables avec des outils de mesure. Concernant la friction (entre les plis et avec le moule) et la stabilité (effilochement et résistance aux goupilles), ces paramètres sont difficilement quantifiables sur une géométrie de base et seront donc considérés comme étant des paramètres globaux, affectant la difficulté de drapage d'une géométrie complexe en général. Une difficulté en cisaillement et en flexion va être attribuée pour chaque géométrie de base locale (individuellement), contrairement aux difficultés reliées à la friction et à la stabilité, qui seront définies comme étant des difficultés globales, affectant le drapage de la géométrie complexe. Les détails concernant l'utilisation des paramètres locaux et globaux dans l'outil prédictif sont expliqués au Chapitre 7.

6.3.1 Évaluation du cisaillement des géométries de base

La difficulté à cisainer chaque géométrie de base est quantifiée selon les résultats d'essais de drapage avec différents tissus. La colonne cisaillement du Tableau 5.8 montre des capacités en cisaillement différents pour les 4 tissus, variant de 4 à 6. Un essai de drapage de chaque géométrie de base est effectué avec chaque tissu. Si le satin 8 de verre style 7781 (cisaillement = 4/10) peut draper une géométrie de base sans problème, alors cette géométrie de base est associée à une difficulté en cisaillement inférieure à 4/10. Inversement, si le drapage d'une géométrie de base avec le tissu toile de verre style 7500 (6/10) forme un pli lors du drapage, la

difficulté associée au cisaillement de la géométrie de base est supérieure à 6/10. Si le tissu toile de verre style 7500 (6/10) peut draper une géométrie de base donnée sans problème mais le sergé de carbone style 1040 (5/10) ne peut pas draper cette même géométrie sans former un pli, alors la géométrie de base a une difficulté associée au cisaillement de 6/10. Donc, afin de permettre un drapage approprié de cette géométrie, un tissu ayant une capacité en cisaillement supérieure ou égale à 6/10 doit être sélectionné.

Dans le cas où la difficulté en cisaillement d'une géométrie de base est supérieure à 6 ou inférieure à 4, une mesure de cisaillement est effectuée via un essai de drapage sur les géométries de base. Les essais de drapage sur les géométries de base sont effectués avec des tissus marqués avec des traits tracés au crayon et quadrillés tel qu'illustré à la Figure 6.6.

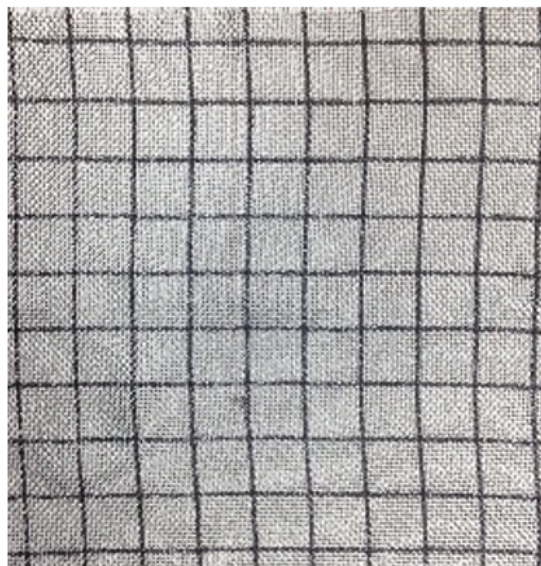


FIGURE 6.6 – Tissu quadrillé

Lorsque le tissu subit une déformation suite à un cisaillement, les carrés tracés au crayon prennent la forme de losanges. La mesure de la plus petite diagonale du losange permet de connaître l'ampleur du cisaillement.

6.3.2 Évaluation de la flexion sur les géométries de base

La flexion est mesurée à l'aide d'une tige en métal graduée. Les graduations permettent d'évaluer la flexion sur une échelle de 0 à 5. L'outil de mesure est illustré à la Figure 6.7. Une note de 0 indique une difficulté en flexion faible et une note de 5 indique une difficulté en flexion très élevée pour une géométrie de base donnée. Si l'outil touche directement le moule, alors la note attribuée est 0. Dans le cas contraire, si l'outil peut passer à travers le tissu et que toutes les graduations sont cachées par le tissu, alors une note de 5 est donnée. Chacune des graduations au bout de la tige est d'une hauteur de 1.5 mm. Les résultats des difficultés en flexion de chaque géométrie de base pourront être comparés avec les résultats des capacités des tissus en flexion (Tableau 5.8) et ainsi déterminer quels tissus pourront se conformer à la géométrie de base donnée.



FIGURE 6.7 – Outil de mesure pour la flexion des géométries de base

6.3.3 Procédures

1. Avant tout travail manuel, la géométrie complexe doit être décomposée en géométries de base à partir du fichier CAO tel que montré à la Figure 6.4. Un tableau des géométries de base doit être construit afin de pouvoir entrer les valeurs des difficultés en cisaillement et en flexion, avec 1 pli et avec 4 plis. Les essais pour la caractérisation des géométries de base ont une faible reproductibilité. Il est donc préférable que deux personnes réalisent cette caractérisation en conduisant les mêmes drapages, afin de minimiser les erreurs potentielles de manipulation. Le Tableau 6.1 illustre un exemple de tableau pour l'acquisition des données. Le tissu sergé de carbone style 1040 est limité en terme de quantité et dispendieux et n'a donc pas été utilisé pour la caractérisation des géométries de base.
2. Des échantillons carrés de chaque tissu mesurant 30.5 x 30.5 cm (1x1') marqués selon la chaîne et la trame à chaque 2.54 cm (1") sont découpés sur la machine de découpe, Figure 6.6. Cinq pièces carrées par tissu doivent être découpées afin d'obtenir un échantillon d'un pli et un empilement de 4 plis.
3. Une fois tous les échantillons découpés, le drapage des géométries de base commence. Les opérateurs doivent avoir en main le tableau des géométries de base du moule en question, avec une image du fichier CAO indiquant les géométries de base tel qu'illustré à la Figure 6.4. Les opérateurs doivent draper chaque géométrie de base avec tous les tissus découpés. Afin d'évaluer la difficulté en cisaillement des géométries de base, l'opérateur doit inscrire quel tissu forme des plis lors du drapage. Dans le cas où tous les tissus forment des plis, ou que tous les tissus ne forment pas de plis, la diagonale

la plus longue des losanges marqués est mesurée et notée dans le tableau, tel qu'illustré à la Figure 6.9. Les essais de drapage sont effectués avec un seul pli et avec un empilement de 4 plis pour chaque tissu. La Figure 6.8 illustre des zones où la mesure du cisaillement doit être faite (carrés vert). Ces carrés vert illustrent la zone où la mesure du cisaillement doit être prise.

4. Une fois la mesure de cisaillement notée, l'opérateur doit s'assurer que le tissu demeure bien drapé sur la géométrie de base afin de mesurer la flexion. L'opérateur doit insérer doucement l'aiguille de flexion dans le tissu en effectuant de légères rotations. La note à indiquer dans le tableau est basée sur le nombre de graduation cachées par le tissu, allant de 0 à 5. La Figure 6.10 montre un exemple de caractérisation de la flexion sur un coin intérieur double. Les zones de flexion à mesurer sont illustrées avec des points rouge sur la Figure 6.8. Lorsqu'il y a plusieurs endroits où prendre la mesure, la flexion la plus élevée seulement doit être inscrit dans le tableau.
5. Finalement, la différence des difficultés observées pour 1 pli et 4 plis est exprimée par une note allant de 0 à 5, où 0 représente une différence nulle et 5 une différence importante.

Tableau 6.1 – Tableau pour la caractérisation des géométries de base

Géométries de base				Difficulté 1 vs 4 plis [note/5]				Cisaillage [apparition de plis ou non & mesure de la diagonale]				Flexion [# de graduations]	
#	Type	Nombre de plis	Tissu	Personne 1	Personne 2	Personne 1	Personne 2	Personne 1	Personne 2	Personne 1	Personne 2	Personne 1	Personne 2
1	A	1 pli	Toile de verre 7500										
			Satin 8 de verre 7781										
			Satin 5 carbone 4540										
		4 plis	Toile de verre 7500										
			Satin 8 de verre 7781										
			Satin 5 carbone 4540										
2	B	1 pli	Toile de verre 7500										
			Satin 8 de verre 7781										
			Satin 5 carbone 4540										
		4 plis	Toile de verre 7500										
			Satin 8 de verre 7781										
			Satin 5 carbone 4540										
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	

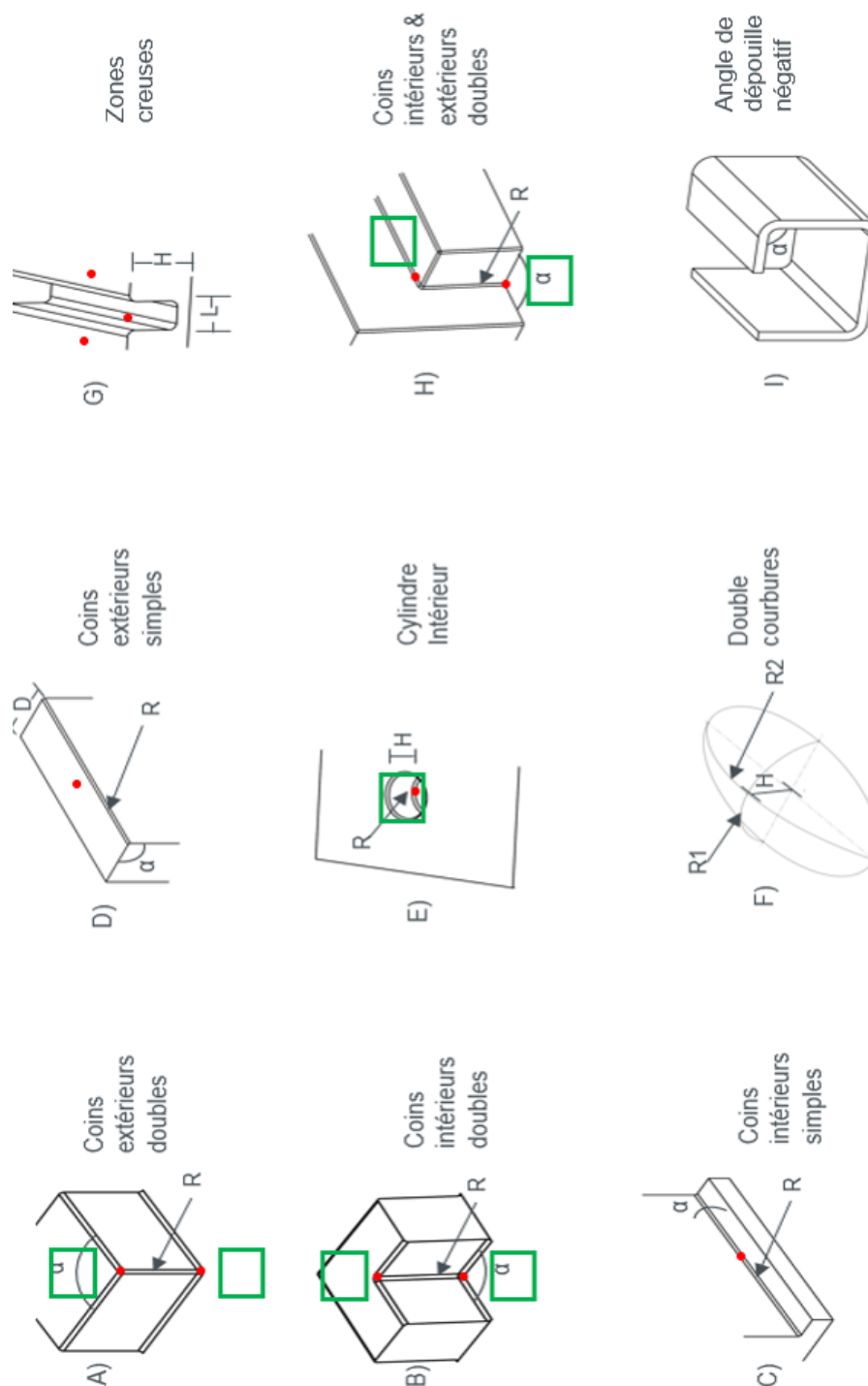


FIGURE 6.8 – Zones de caractérisation pour chaque géométrie de base

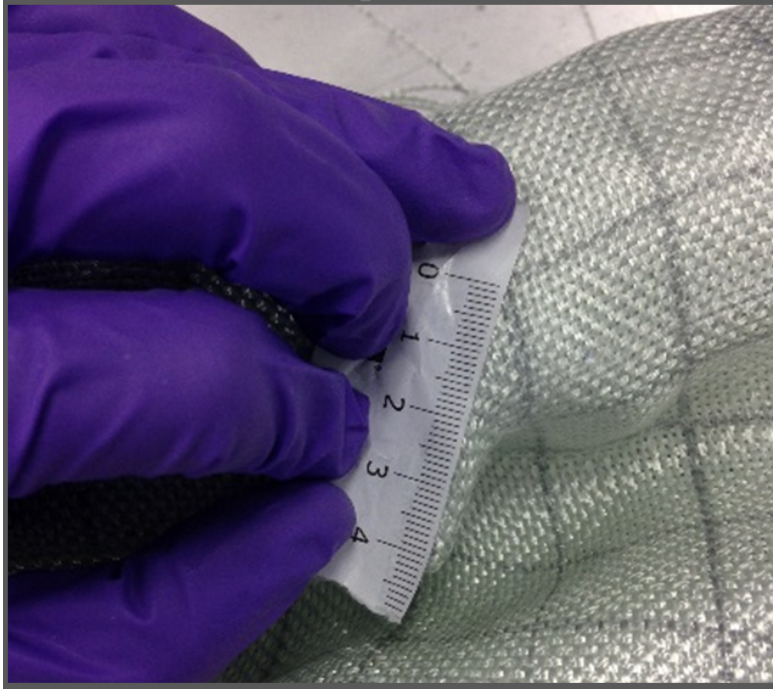


FIGURE 6.9 – Mesure du cisaillement dans les moules

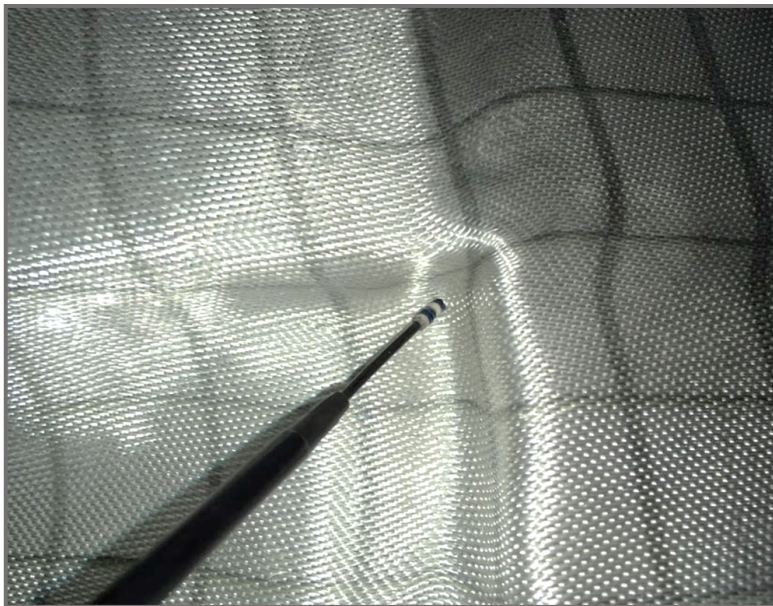


FIGURE 6.10 – Caractérisation d'une géométrie de base en flexion

6.4 Résultats

Les résultats suivant la caractérisation des 5 moules avec 3 tissus ont été rassemblés aux Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4 où les valeurs ont été rapportées linéairement sur une échelle de 10 afin de faciliter les comparaisons. Chacune des géométries a été quantifiée selon leurs paramètres respectifs. Le Tableau 6.2 montre la caractérisation des coins intérieurs et extérieurs doubles. Afin de réduire le nombre d'essais nécessaire pour la caractérisation complète, des valeurs minimales et maximales ont été déterminées pour chaque paramètre. Un rayon d'un coin extérieur double de 4 mm se retrouve dans l'une des 4 premières lignes du Tableau 6.2. Par exemple, pour les coins extérieurs doubles, lorsque le paramètre 1 (rayon) se retrouve entre 0 et 6 mm et le paramètre 2 (angle) entre 0 et 40°, alors la difficulté en cisaillement est égale à 7 et la difficulté en flexion 5 (voir première ligne). Ces valeurs de difficulté ont été établies selon les résultats de la caractérisation des géométries de base en fonction des 3 tissus (tissu toile de verre 7500, satin 8 de verre 7781 et satin 5 carbone 4540). Les difficultés des géométries ont été déterminées connaissant la capacité des tissus (Tableau 5.8) et sachant si le tissu donné cause des problèmes au niveau du cisaillement ou de la flexion lors du drapage des géométries de base.

Un total d'environ 75 géométries de base ont été quantifiées sur les 5 moules analysés (M02772, M04603, M04607, M04639 et M04624). Parmi ces géométries, plusieurs avaient les mêmes paramètres et donc la quantité de géométries de base avec des paramètres différentes était limitée. Chacune de ces géométries a été décomposée en géométries de base (Annexe D) et leurs géométries ont été caractérisées.

Les zones creuses et les doubles courbures étaient très peu présentes sur les moules analysés. Ces deux géométries ont donc été retirées de l'analyse dans le cadre de cette thèse. Les Tableaux 6.2, 6.3 et 6.4 montrent les résultats de caractérisation pour les géométries de base présentes sur les 5 moules analysés. Cette base de données inclut une valeur quantifiée des caractéristiques établies sur une échelle de 1 à 10 où 10 représente une géométrie ayant une haute difficulté de cisaillement et 1 une faible difficulté en cisaillement. Étant donné que le nombre de combinaisons des paramètres des différentes géométries de base sur les moules est limité, une interpolation doit être effectuée afin d'avoir un tableau complet. Les valeurs sur-lignées en rouge présentent les résultats des essais de caractérisation et les autres valeurs les résultats obtenus par une interpolation suivant une tendance linéaire.

Géométries de base	R1 (mm)		α (°)		Cisaillement [10 = haut cisaillement]	Flexion [10 = faible flexion]
	Min	Max	Min	Max		
A) Coin extérieur double	0	6	0	40	7	5
	0	6	40	80	6	4
	0	6	80	120	5	4
	0	6	120	180	4	3
	6	12	0	40	6	5
	6	12	40	80	5	4
	6	12	80	120	3	2
	6	12	120	180	2	4
	12	18	0	40	6	5
	12	18	40	80	4	3
	12	18	80	120	2	2
	12	18	120	180	1	2
	18	999	0	40	5	4
	18	999	40	80	2	2
	18	999	80	120	3	2
	18	999	120	180	0	0
B) Coin intérieur double	0	6	0	40	8	8
	0	6	40	80	6	8
	0	6	80	120	5	6
	0	6	120	180	4	4
	6	12	0	40	6	6
	6	12	40	80	4	4
	6	12	80	120	2	2
	6	12	120	180	1	1
	12	18	0	40	6	4
	12	18	40	80	5	3
	12	18	80	120	4	2
	12	18	120	180	3	2
	18	999	0	40	6	4
	18	999	40	80	4	3
	18	999	80	120	4	2
	18	999	120	180	2	2

Tableau 6.2 – Résultats de caractérisation des géométries de base pour les coins extérieurs et coins intérieurs doubles

Géométries de base	R1 (mm)		α (°)		Cisaillement [1 = haut cisaillement]	Flexion [1 = faible flexion]
	Min	Max	Min	Max		
C) Coin intérieur simples	0	6	0	40	0	7
	0	6	40	80	0	6
	0	6	80	120	0	4
	0	6	120	180	0	3
	6	12	0	40	0	6
	6	12	40	80	0	5
	6	12	80	120	0	3
	6	12	120	180	0	3
	12	18	0	40	0	5
	12	18	40	80	0	4
	12	18	80	120	0	3
	12	18	120	180	0	2
	18	999	0	40	0	4
	18	999	40	80	0	3
	18	999	80	120	0	2
	18	999	120	180	0	1
D) Coin extérieur simple	0	6	0	40	0	6
	0	6	40	80	0	5
	0	6	80	120	0	3
	0	6	120	180	0	2
	6	12	0	40	0	5
	6	12	40	80	0	4
	6	12	80	120	0	2
	6	12	120	180	0	2
	12	18	0	40	0	4
	12	18	40	80	0	3
	12	18	80	120	0	2
	12	18	120	180	0	1
	18	999	0	40	0	3
	18	999	40	80	0	2
	18	999	80	120	0	1
	18	999	120	180	0	0

Tableau 6.3 – Résultats de caractérisation des géométries de base pour les coins extérieurs et coins intérieurs simples

Géométries de base	R1 (mm)		α (°)		Cisaillement [1 = haut cisaillement]	Flexion [1 = faible flexion]
	Min	Max	Min	Max		
E) Cylindre intérieur	0	6	N/A		5	8
	6	12			5	7
	12	18			5	6
	18	999			5	5
H) Coin intérieur & extérieur double	0	6	0	40	9	8
	0	6	40	80	8	7
	0	6	80	120	6	6
	0	6	120	180	4	5
	6	12	0	40	8	6
	6	12	40	80	7	5
	6	12	80	120	6	4
	6	12	120	180	4	3
	12	18	0	40	6	6
	12	18	40	80	5	5
	12	18	80	120	4	4
	12	18	120	180	3	3
	18	999	0	40	5	5
	18	999	40	80	4	4
	18	999	80	120	3	3
	18	999	120	180	1	2

Tableau 6.4 – Résultats de caractérisation des géométries de base pour les cylindre intérieurs et les coins extérieurs & intérieurs double

Chapitre 7

Outil Prédicatif du Drapage

Ce chapitre explique tout d'abord le principe de l'outil prédictif de drapage développé dans cette thèse. Les formules mathématiques et les hypothèses pour la réalisation de l'outil prédictif sont mises en évidence et détaillées. La construction de l'outil est détaillée et chaque étape est montrée. Le processus d'itération pour la détermination des différents coefficients pour le calcul des difficultés est expliqué en détail. Finalement, les résultats de la prédiction des temps de drapage provenant de l'outil prédictif sont ensuite montrés et analysés.

7.1 Contexte

7.1.1 Logiciels de dépliage 2D actuels

Les logiciels actuels (exemple Catia Composite) pour la fabrication des patrons de découpe existant sur le marché permettent de définir une forme à plat pour la

découpe du tissu à partir d'une géométrie 3D. Dans la majorité des logiciels, une géométrie 3D complexe ne peut pas être dépliée en une seule pièce de tissu dû au comportement du tissu qui est modélisé dans ces logiciels et qui doit, en principe, correspondre au comportement physique réel des tissus. Certaines géométries comportant par exemple un angle de dépouille négatif (undercut) fonctionnent rarement pour la mise à plat 2D. Aussi, dans la majorité des cas de pièces complexes, plusieurs patrons doivent être utilisés afin de bien couvrir ces géométries et des coupes doivent être effectuées afin d'impartir une certaine mobilité aux mèches du tissu drapé. De plus, chez Hutchinson, des goupilles de localisation sont utilisées afin de faciliter et d'accélérer le processus de drapage. Le concepteur d'une préforme doit donc déterminer où et comment séparer les différents patrons, où insérer les coupes dans les patrons, et où localiser les goupilles. Déterminer ces paramètres de drapage requiert un haut niveau d'expérience afin d'obtenir un résultat de bonne qualité.

7.1.2 Outil de prédiction du drapage

Utilité de l'outil

Afin de faciliter, d'accélérer et d'augmenter l'efficacité des logiciels de dépliage de patron actuels, un outil de prédiction du drapage est développé afin de connaître le comportement du drapage en fonction de la géométrie et du tissu utilisé. La Figure 7.1 illustre un organigramme représentant l'utilité de cet outil prédictif.

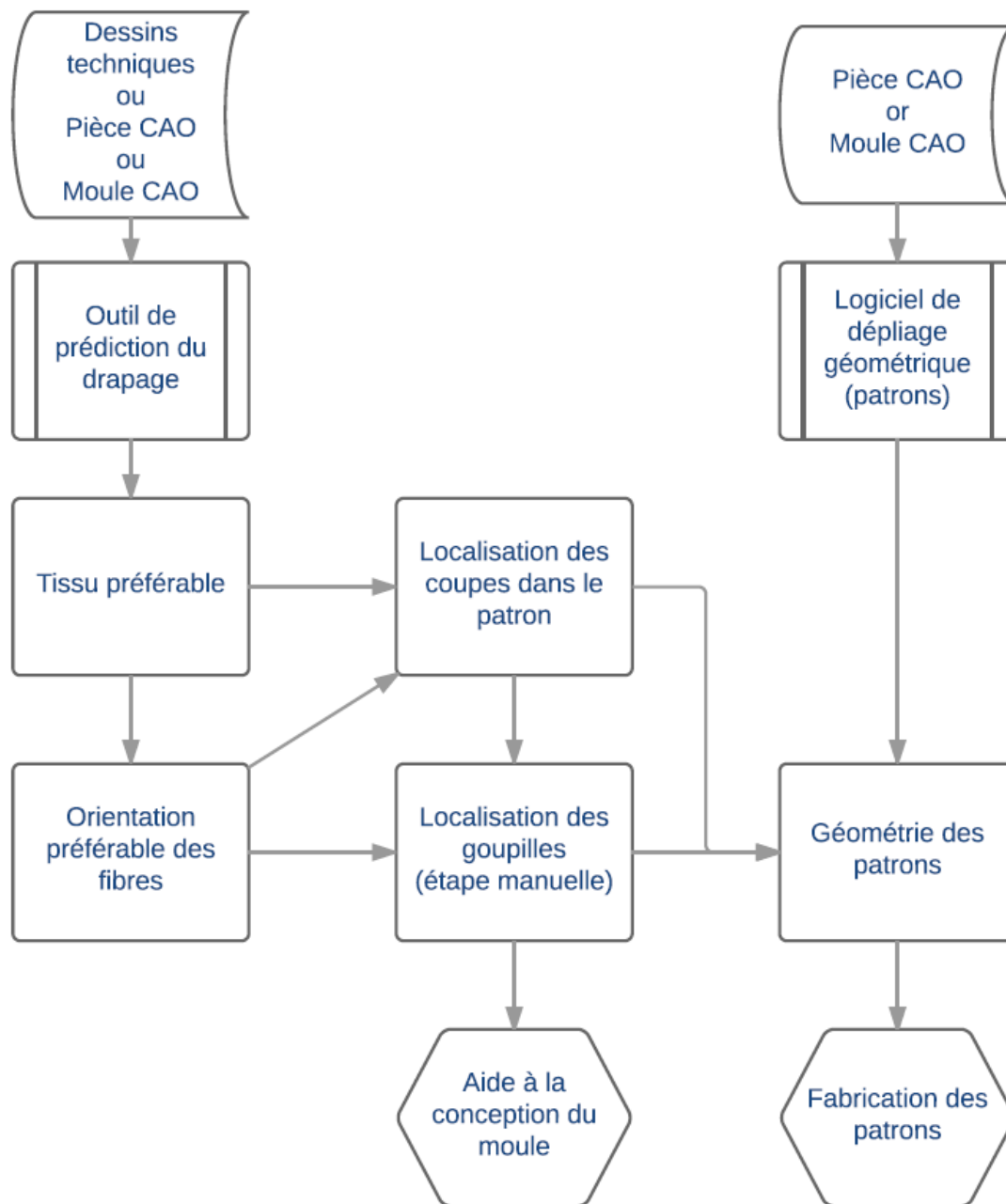


FIGURE 7.1 – Utilité de l'outil de prédiction du drapage

Globalement, l'outil de prédiction du drapage utilise comme données d'entrée la définition de la géométrie complexe à draper, soit des dessins techniques, les fichiers CAO de la pièce ou du moule correspondant. L'outil va effectuer ces calculs en considérant tous les tissus de la base de données. Ensuite, l'outil va spécifier quelle orientation des fibres est préférable pour le drapage. L'orientation des fibres est déterminée pour la géométrie globale en prenant en compte l'addition de cha-

cune des difficultés des géométries de base en fonction des orientations. L'outil sélectionne ensuite une orientation globale seulement. Les localisations des coupes et des joints sont ensuite déterminées pour finir avec la localisation des goupilles. Les localisations des coupes sont déterminées où les zones de cisaillement d'une géométrie de base pour un tissu donnée sont trop élevé. Les localisations des joints sont déterminées où les zones de cisaillement des liens entre les géométries sont trop élevé pour le tissu donnée. Toutes ces informations vont non seulement soutenir le développement des patrons permettant un drapage efficace, mais peuvent aussi aider à la conception des moules en identifiant les régions difficiles à couvrir avec le tissu. L'outil de prédiction du drapage va permettre de faciliter le drapage en sélectionnant le tissu le plus approprié pour une géométrie donnée en plus de permettre la diminution des temps de conception et de fabrication des patrons. Les résultats de l'outil prédictif serviront de données d'entrée pour un logiciel de dépliage.

Positionnement de l'outil

L'utilisation de l'outil se doit d'être simple afin de pouvoir être utilisé facilement en industrie. La caractérisation des tissus et des géométries de base doit être complétée lors d'étapes antérieurs à l'utilisation de l'outil prédictif. Une fois que toutes ces caractérisations sont effectuées, les données sont entrées dans les bases de données de l'outil prédictif. L'outil prédictif contient deux bases de données : 1) la première contient les résultats de la caractérisation des tissus (base de données Y) et 2) la deuxième contient les résultats de la caractérisation des géométries de base (base de données Z). L'outil va comparer les capacités de chaque tissu (base de

données Y) avec les difficultés de chaque géométrie de base (base de données Z) de la géométrie complexe à analyser. Lors de l'analyse de cette géométrie complexe, l'utilisateur de l'outil doit décomposer la géométrie complexe en géométries de base pour ensuite quantifier chacune de ces géométries de base. Une fois cette étape terminée, l'outil de prédiction interagit avec les bases de données (tissu + géométries de base) afin de déterminer une difficulté de drapage pour chaque géométrie de base en fonction du tissu. Un calcul est ensuite effectué suivant une formule développée afin de lier les bases de données, expliqué en détail à la section 7.3. Cette comparaison des bases de données permet de sélectionner le tissu se conformant le mieux à la géométrie, son orientation de fibre préférable ainsi que la localisation des coupes, des joints et des goupilles.

La Figure 7.2 illustre un organigramme démontrant les étapes de fonctionnement de l'outil prédictif en supposant une base de données incluant trois tissus. Les boîtes bleues représentent les étapes que l'utilisateur doit effectuer, et les boîtes oranges représentent les étapes effectuées par l'outil prédictif de drapage.

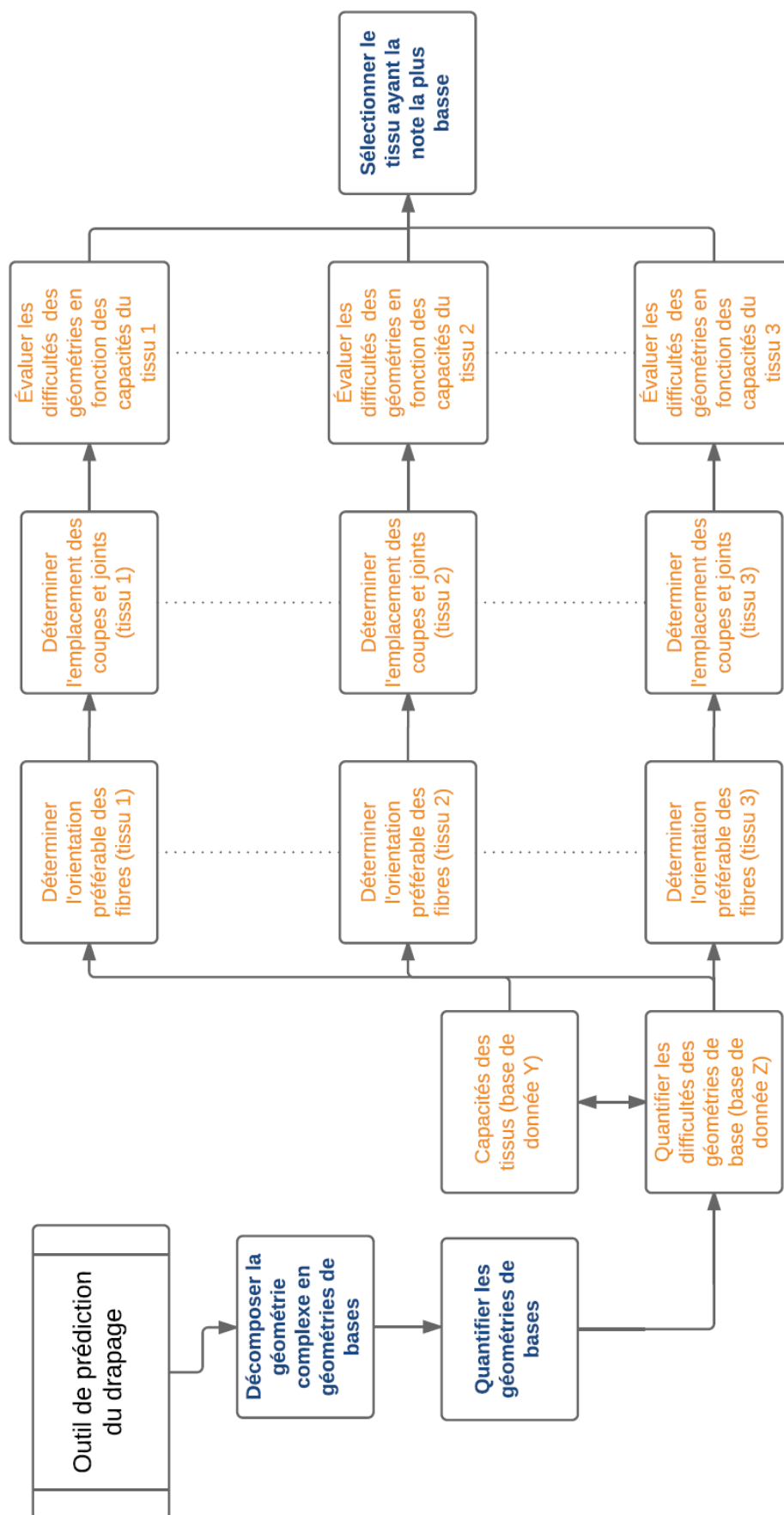


FIGURE 7.2 – Étapes pour l'utilisation de l'outil de prédiction du drapage

Avant d'utiliser l'outil prédictif, l'utilisateur doit décomposer la géométrie complexe à analyser en différentes géométries de base. Toutes ces géométries de base doivent être quantifiées en fonction des paramètres représenté à la Figure 6.3.

Ayant les géométries de base quantifiées, l'outil prédictif commence par énumérer les difficultés de chaque géométrie de base en fonctions de la base de données Z. Ayant les difficultés de chaque géométrie de base (base de données Z) ainsi que les capacités de chaque tissu (base de données Y), l'outil commence l'analyse de drapage en comparant ces deux bases de données. Pour chaque tissu, l'outil détermine l'orientation préférable des fibres locale pour draper chaque géométrie de base, pour ensuite déterminer l'orientation des fibres globales. La base de données Y inclut des différences pour certaines caractéristiques en fonction de l'orientation des mèches de chaîne et de trame. L'outil prédictif va donc effectuer une somme des difficultés en comparant les deux bases de données Y et Z. L'orientation des fibres générant la plus petite difficulté globale est sélectionnée. Dans le cadre de cette thèse, seulement les orientations de fibres à $0/90^\circ$ et $\pm 45^\circ$ ont été considérées. Si nécessaire, des coupes et des joints sont introduits aux endroits où le tissu en question ne peut pas se conformer à une géométrie donnée. Chaque tissu se comporte différemment et donc la localisation des coupes et joints peuvent différer selon le tissu. Les emplacements pour les goupilles de localisation sont ensuite déterminés considérant l'orientation des fibres et la position des coupes et joints. La localisation des goupilles doit être effectuée en s'assurant que deux goupilles ne suivent pas une même mèche de fibre. La localisation des goupilles est fait manuellement par l'utilisateur. Ayant tous ces paramètres pour chacun des tissus analysés, l'outil effectue un calcul permettant de comparer la quantification des

capacités des tissus (base de données Y) en fonction des difficultés des géométries de base (base de données Z) tout en considérant l'ajout de difficulté lors que des coupes et des joints sont nécessaire. Une fois que la géométrie complexe a été analysée dans l'outil prédictif, l'emplacement des coupes et des joints sont spécifiés. L'utilisateur doit ensuite prendre les résultats de l'outil prédictif (tissu à utiliser, orientation des fibres et localisation des coupes et des joints) comme étant des données d'entrées pour un logiciel de dépliage.

La Figure 7.3 illustre un résumé du concept général de l'outil géométrique incluant les bases de données effectuées en amont et l'interaction avec le logiciel de dépliage 2D.

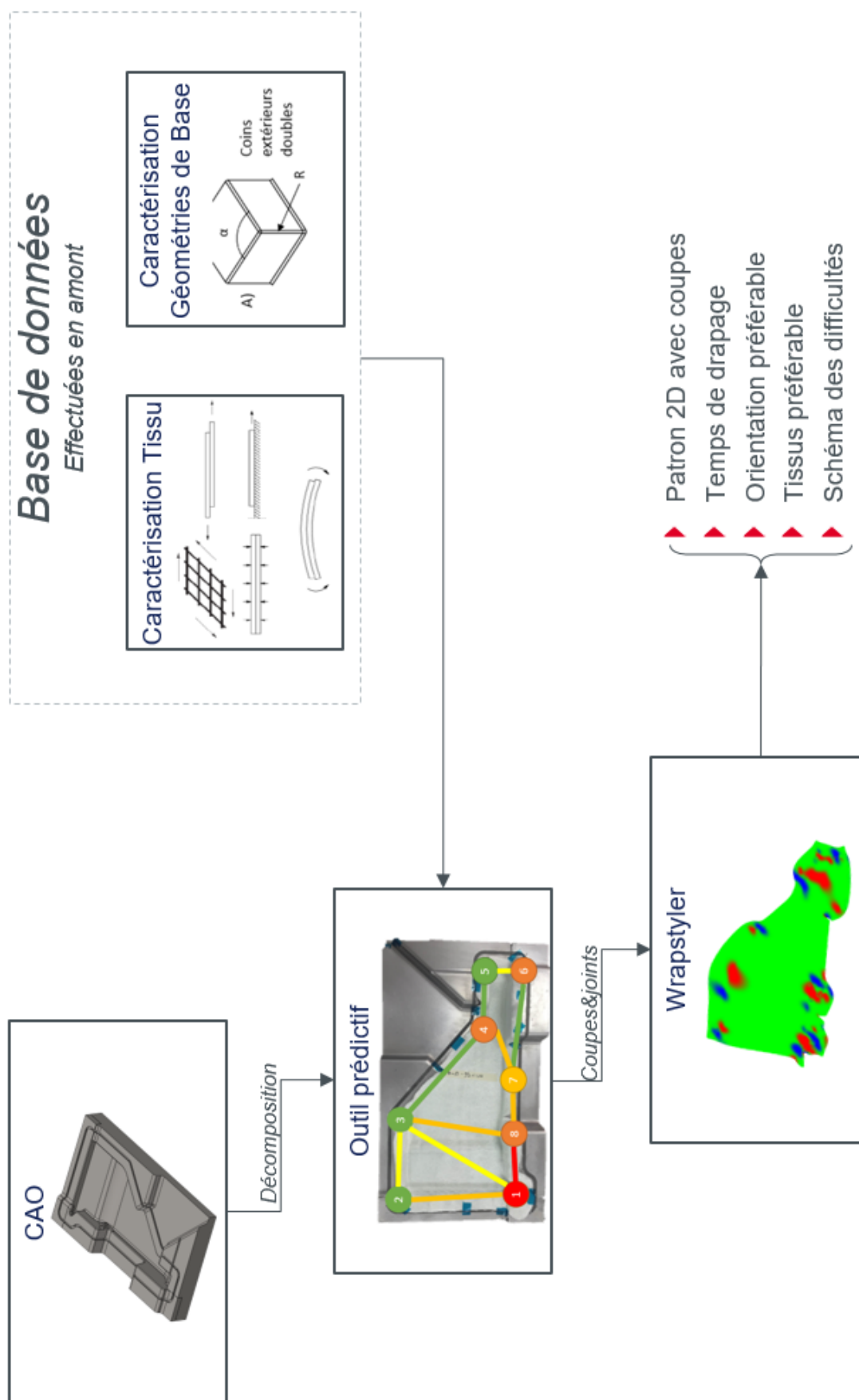


FIGURE 7.3 – Fonctionnement de l'outil prédictif

7.2 Algorithme général

L'étape de décomposition de la géométrie complexe en géométrie de base est expliquée en détails au Chapitre 6. La décomposition illustrée dans les pages suivantes montre la décomposition du moule M02772 et montre la façon d'adapter la décomposition pour l'outil de prédiction du drapage.

Avant l'utilisation de l'outil prédictif, les géométries de base composant la géométrie complexe doivent être repérées, tel qu'illustré à la Figure 7.4.

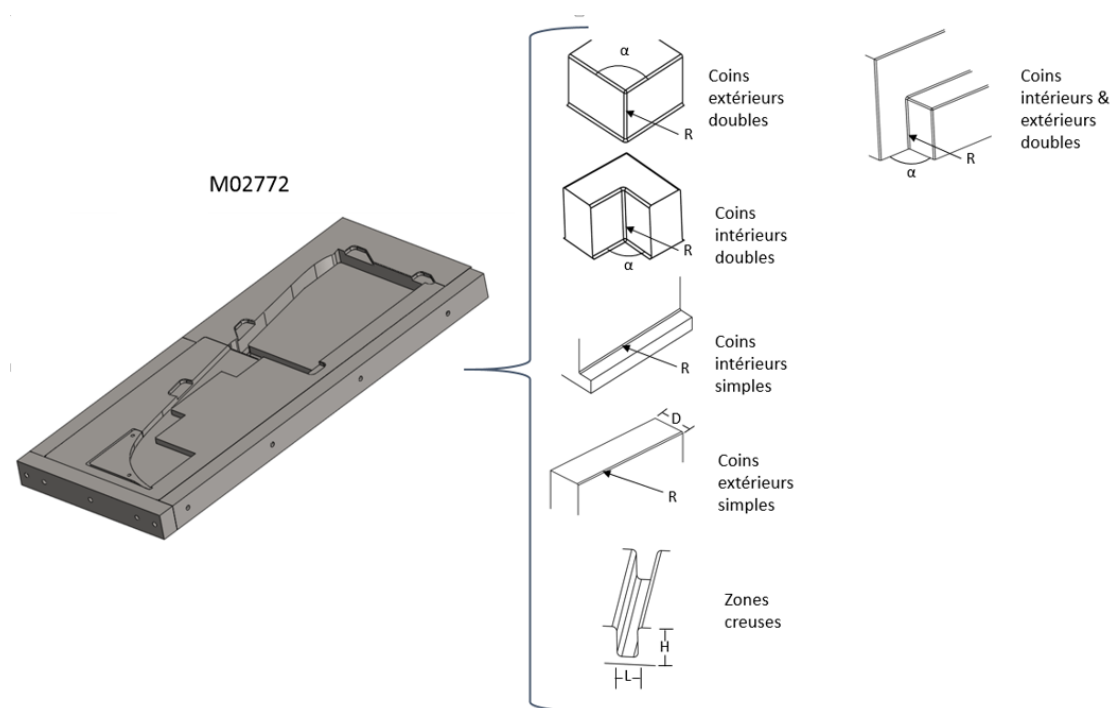


FIGURE 7.4 – Décomposition du moule M02772 en géométries de base

Ensuite, ces géométries sont identifiées sur un dessin 2D du moule. Cette étape donne un aspect visuel global des géométries de base et facilite l'entrée de celles-ci dans l'outil prédictif, tel qu'illustré à la Figure 7.5.

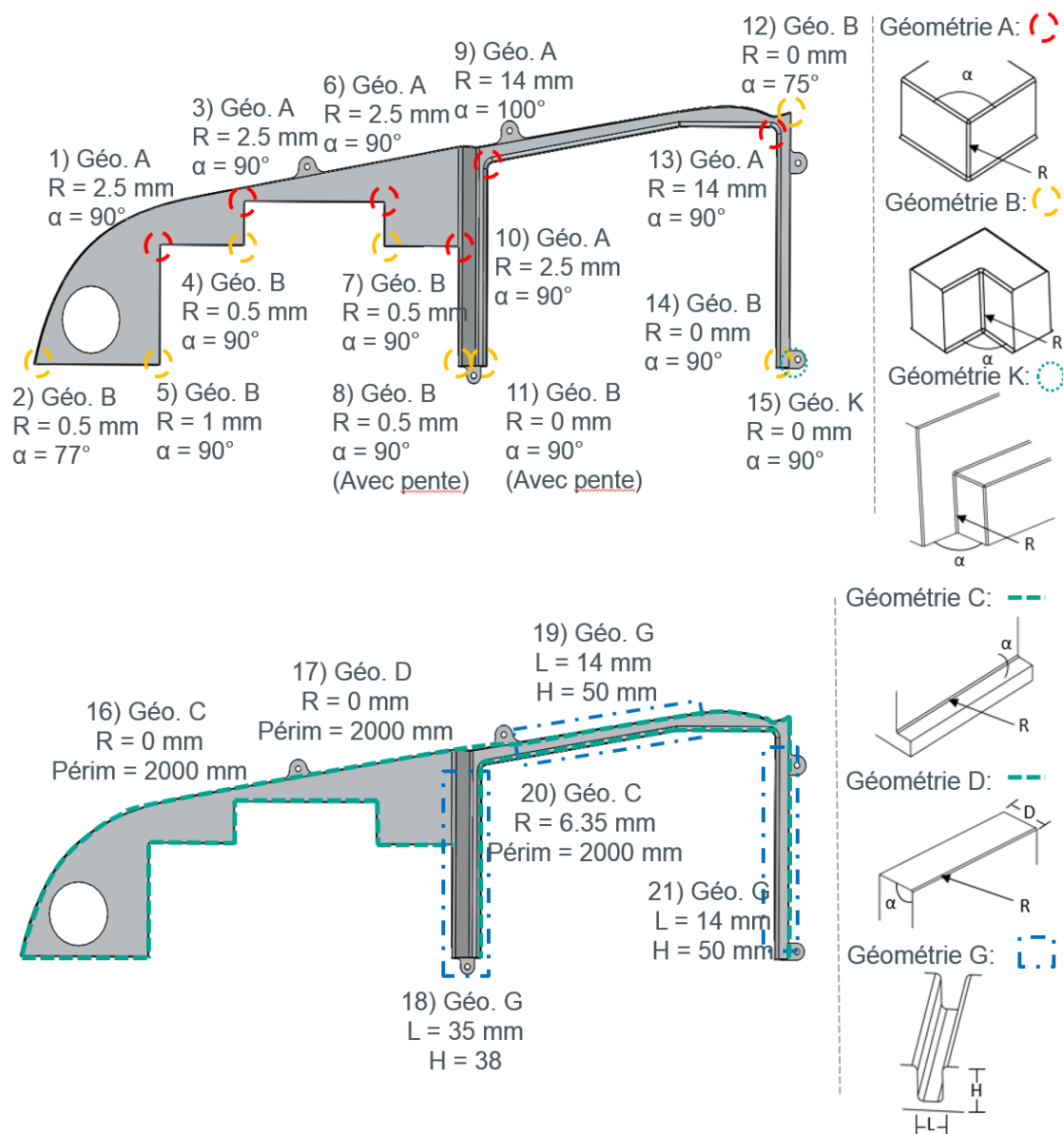


FIGURE 7.5 – Identification des géométries de base du moule M02772

Les géométries de base sont ensuite quantifiées automatiquement sur une échelle de 1 à 10 tel qu'illustré au Tableau 6.2(D1 à D10). L'outil prédictif associe automatiquement chaque géométrie de base aux difficultés en cisaillement et en flexion. Suite à cette étape, l'outil prédictif associe des difficultés aux géométries de base, tel qu'illustré à la Figure 7.6, D10 étant le plus difficile à former et D1 le plus facile. Cette figure illustre un exemple seulement de ce que pourrait ressembler une décomposition au long. La décomposition de cette géométrie avec l'outil prédictif

ce retrouve à l'Annexe D

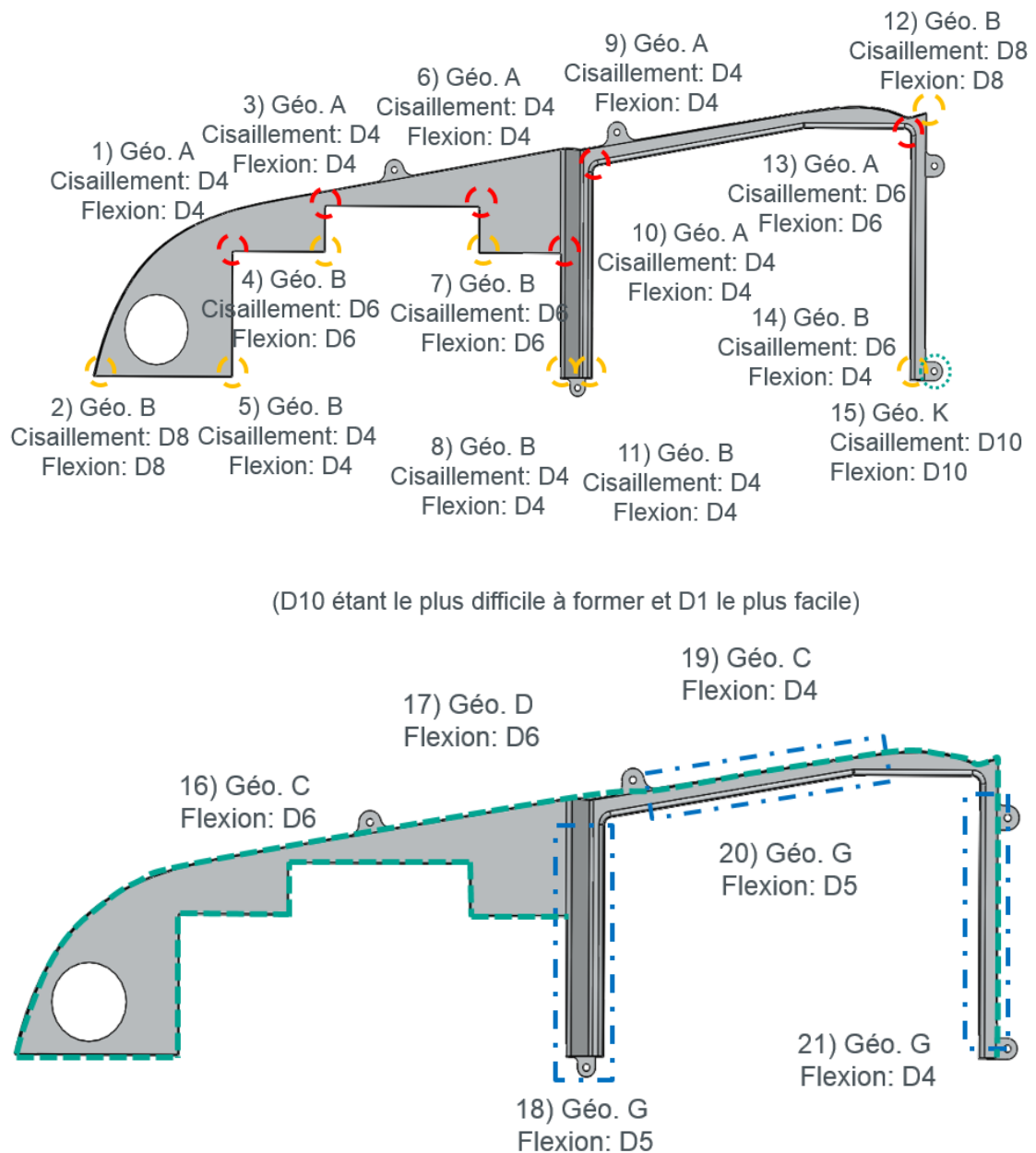


FIGURE 7.6 – Quantification des géométries de base sur le moule M02772

Le tissu le plus adapté pour le drapage de la géométrie complexe est sélectionné à partir de calculs. Ces calculs sont basés sur la comparaison des difficultés des géométries de base avec les capacités des tissus, ce qui permet d'évaluer le comportement en drapage de chaque tissu sur la géométrie complexe, basé sur les caractéristiques analysées au à la Section 4.2.

Au-delà de la sélection du tissu le plus adéquat, l'outil prédictif permet de sélectionner l'angle auquel il est plus facile de draper le tissu, soit à $0/90^\circ$ ou $+/-45^\circ$. De plus, basé sur la difficulté globale de la géométrie complexe, l'outil permet d'estimer le temps de drapage requis pour la pièce. Les calculs, le processus et le fonctionnement du chiffrier Excel sont expliqués dans les sections suivantes.

7.3 Formules mathématiques et hypothèses

Les formules mathématiques supportant l'évaluation du drapage ont été séparées en trois sections ; les difficultés locales, les difficultés des liens géométriques, ainsi que les difficultés globales. Les difficultés locales sont associées au cisaillement et à la flexion sur les géométries de base. Les difficultés des liens géométriques sont définies par l'angle et la distance séparant les différentes géométries de base. Finalement, les difficultés globales sont définies par les autres caractéristiques, soit la friction et la stabilité.

7.3.1 Difficultés locales

La difficulté de drapage d'une géométrie de base dépend à la fois des valeurs des paramètres géométriques associés à la géométrie, par exemple le rayon et l'angle d'un coin double, mais également de la capacité des caractéristiques en cisaillement - standard et retour élastique - et en flexion - coin et bord - du tissu utilisé pour le drapage.

$$D_{Local} = K \left(\frac{D_{Cis}}{K_1 \cdot C_{Cis} + (1 - K_1) \cdot C_{SBCis}} \right) + (1 - K) \left(\frac{D_{Flex}}{K_2 \cdot C_{FlexCoin} + (1 - K_2) \cdot C_{FlexBord}} \right) \quad (7.1)$$

La difficulté d'une géométrie de base uniquement est définie comme étant une difficulté locale, et elle est régie par l'Équation 7.1 où D_{Local} représente la difficulté de la géométrie de base, D_{Cis} ou D_{Flex} la difficulté en cisaillement ou en flexion de la géométrie de base, C_{Cis} ou C_{SBCis} ou $C_{FlexCoin}$ ou $C_{FlexBord}$ la capacité du tissu en cisaillement, en retour élastique en cisaillement, en flexion coin ou en flexion bord, K_1 le facteur de pondération entre le cisaillement et le retour élastique en cisaillement, K_2 le facteur de pondération entre la flexion coin et la flexion bord et finalement K le facteur de pondération entre le cisaillement et la flexion.

Les valeurs des difficultés en cisaillement et en flexion sont présentées dans le tableau des résultats de caractérisation des géométries de base, Tableau 6.2, tandis que les valeurs des capacités des tissus pour les mêmes caractéristiques sont déterminées dans le tableau des résultats de caractérisation tissu, Tableau 5.8. Les facteurs K , K_1 , et K_2 sont expliqués en parallèle avec les hypothèses suivantes.

Plusieurs hypothèses ont été posées dans l'élaboration de cette équation :

1. La difficulté locale est la somme pondérée des difficultés en cisaillement et en flexion. Le cisaillement et la flexion sont donc considérés indépendants, n'ayant pas de relations l'un à l'autre. L'expérience montre que cette hypothèse est réaliste. Lors de la compararaison d'un coin extérieur simple et d'un coin intérieur simple, on remarque qu'il n'y a pas de cisaillement pour

ces géométries, mais que leur comportement en flexion est différent (0 pour le coin extérieur simple et > 2 pour le coin intérieur simple). De la même façon, en comparant un coin intérieur simple à un coin extérieur double ayant le même rayon et le même angle, la flexion présente un comportement très similaire sur les deux géométries. Par contre, le coin extérieur double génère du cisaillement dans le tissu tandis que le coin simple ne génère généralement aucun cisaillement. Cette réflexion tend à indiquer que la flexion et le cisaillement peuvent être considérés indépendants en première approximation et que la difficulté associée à la géométrie locale peut être quantifiée par une somme pondérée de comportements en cisaillement et en flexion ;

2. La difficulté locale est quantifiée par le rapport des difficultés géométriques (Tableau 6.2) à la capacité du tissu (Tableau 5.8) ($\frac{DG}{CT}$) ;
3. Pour chaque géométrie, la pondération entre le cisaillement et la flexion (facteur K) est évaluée arbitrairement par rapport à une réalité expérimentale. Pour les géométries sollicitant du cisaillement et de la flexion, le facteur K est équivalent à 0.5 afin que l'influence du cisaillement et la flexion présentent des pondérations équivalentes. Dans le cas où une géométrie ne présente aucune difficulté en cisaillement (aucune double courbure), le facteur K est équivalent à 0 et dans le cas contraire où une géométrie ne présente aucune difficulté en flexion, le facteur K est équivalent à 1 (situation très rare) ;
4. Les facteurs K_1 et K_2 sont évalués arbitrairement et validés indépendamment suivant l'expérience de techniciens expérimentés pour chaque géométrie afin de pondérer soit :
 - (a) l'importance du cisaillement par rapport au retour élastique en cisaille-

ment (K_1) , ou

(b) l'importance de la flexion coin par rapport à la flexion bord (K_2) .

Pour les analyses dans le cadre de cette thèse, le facteur K_1 est équivalent à 0.5 afin que l'influence du cisaillement et du retour élastique en cisaillement présentent des pondérations équivalentes. Pour ce qui en est du facteur K_2 , les coins intérieurs sollicitent seulement la flexion coin ($K_2=1$) et les coins extérieurs la flexion bord ($K_2=0$).

Toutes ces hypothèses constituent une quantification empirique de la réalité expérimentale lors des essais de drapage avec des techniciens expérimentés, combinés avec la théorie du comportement des tissus sur une géométrie donnée. Les difficultés des géométries de base ainsi que les capacités des tissus sont déterminées expérimentalement, tel qu'expliqué aux Chapitres 5 et 6.

7.3.2 Difficultés des liens géométriques

La difficulté d'un lien géométrique est définie comme la difficulté associée à la distance entre deux géométries de base et leur orientation relative, notamment lorsque deux géométries de base sont dans une même ligne d'une mèche du tissu.

$$D_{Lien} = K_{Lien} \left(2 - \min\left(\frac{|D|}{50}, 1\right) - \min\left(\frac{|\alpha|}{2.5}, 1\right) \right) \cdot (D_{Local1} + D_{Local2}) \quad (7.2)$$

La difficulté d'un lien géométrique est régie par l'Équation 7.2, où D_{Lien} représente

la difficulté du lien géométrique, K_{Lien} est une constante d'ajustement, D est la distance entre les deux géométries de base en question, α est l'angle relatif entre ces deux géométries de base et l'orientation des fibres, et D_{local1} ou 2 sont les difficultés locales des géométries de base.

Tout comme l'équation de la difficulté locale, cette équation s'appuie sur des hypothèses :

1. La difficulté du lien est fonction de la somme pondérée des difficultés locales des géométries de base concernées ;
2. La difficulté dépend de la distance D et de l'angle α entre les géométries de base concernées.

La distance D est déterminée expérimentalement comme étant la distance à partir de laquelle le cisaillement dû au lien entre deux géométries de base devient minime. Selon des essais expérimentaux sur les moules de Hutchinson, cette distance correspond à la limite au-delà de laquelle deux géométries ne sont plus liées. Lors des essais sur les moules, des quadrillages étaient dessinés sur le tissu. Ces quadrillages ont aidé à déterminer la distance D avec le support visuel permettant de déterminer rapidement si des tensions ou des cisaillements sont présents dans le tissu. À partir d'une distance D de 50 mm, les échantillons de tissu ne démontraient pratiquement plus de tension, ni de cisaillement entre les deux géométries de base en question.

L'angle α a été déterminé basé avec cette distance D . Cet angle correspond à l'angle de décalage d'une même mèche de fibre par rapport à la droite entre les géométries (Figure 7.7) et correspond à l'angle auquel le cisaillement prend avan-

tage sur le lien entre les deux géométries de base. Les essais expérimentaux effectués sur les moules de Hutchinson montrent que lorsqu'un angle est au-delà de 2.5° , l'effet du cisaillement permet de pouvoir négliger le lien entre les géométries de base. Ces données sont des approximations et sont empiriques.

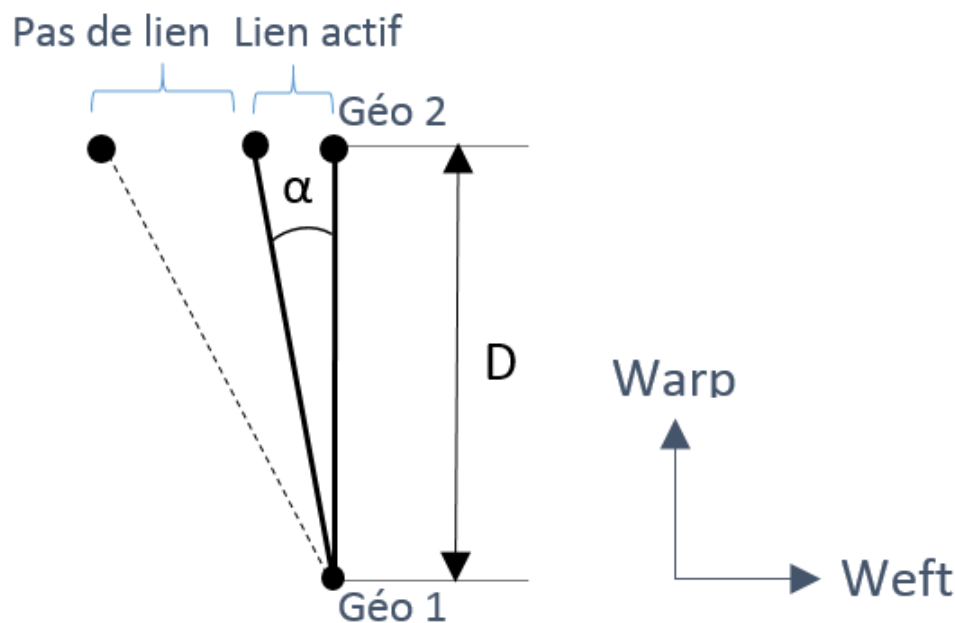


FIGURE 7.7 – Détermination de l'angle pour l'équation des liens

Afin de pouvoir quantifier la difficulté associée à la distance et l'angle du lien, une distance maximale et un angle maximal sont définis, soient 50 mm et 2.5° respectivement. De 0 à 50 mm ou de 0 à 2.5° , la difficulté décroît ; plus la distance et/ou l'angle sont faibles, plus la difficulté est élevée. Lorsque les valeurs limites de la distance et/ou de l'angle sont atteintes, la contribution à la difficulté devient nulle.

Le cas le plus défavorable est lorsque $D = 0$ et $\alpha = 0$. Toutefois, ce cas est impossible puisque 2 géométries ne peuvent pas se superposer. La difficulté théorique du lien est maximale et correspond à la moyenne des difficultés locales. Le cas le plus favorable, à savoir $D \geq 50$ et $\alpha \geq 2.5$, correspond à une difficulté du lien nulle.

Les valeurs de D et de α ont été choisies arbitrairement, à partir d'essais. La

quatification de ces valeurs devra être développée ultérieurement en faisant des essais de drapage sur des géométries de base en variant D et/ou α . Ce type d'essai pourra être effectué par des drapages sur des géométries imprimées en 3D sur un montage permettant de modifier les deux paramètres D et α . Les temps de drapage de ces géométries liées pourront être déterminés. Ces essais de drapage permettront de valider les équations des liens et la formulation des difficultés locales.

K_{lien} est une constante définie empiriquement de manière à borner la difficulté du lien. En effet, sa valeur est déterminée pour que dans le cas hypothétique le plus défavorable (c'est-à-dire lorsque $D = 0$ et $a = 0$), la difficulté du lien soit égale à la moyenne des difficultés locales. K_{lien} est donc égale à 0.25.

7.3.3 Difficultés globales

La difficulté de drapage d'une pièce est la valeur de sortie de l'outil prédictif. Elle dépend des difficultés locales, des difficultés des liens géométriques en plus d'inclure les difficultés globales telles que la friction et la stabilité.

$$D_{global} = 2 + \left[\sum_{i=1}^{nb_{geom}} D_{local.i} + \sum_{j=1}^{nb_{lien}} D_{lien.j} \right] \sum_{k=1}^4 g_k + (g_5 S_{DC} + g_6 S_{piece}) \quad (7.3)$$

et

$$\sum_{k=1}^4 g_k = \frac{(nb_{pli} - 1)/nb_{pli} \cdot g_4}{C_{Fric}} + \frac{g_1}{C_{eff}} + \frac{g_2}{C_{pine}} + \frac{g_3}{C_{StabCis}} \quad (7.4)$$

La difficulté globale est régie par l'Équation 7.3 où D_{global} représente la difficulté globale, $D_{local.i}$ est la difficulté locale de la géométrie i , $D_{lien.j}$ est la difficulté du lien j , S_{piece} est la surface de la pièce présentant une double courbure (mm^2) et g représente les coefficients globaux énumérés aux pages suivantes.

Les coefficients globaux sont définis afin de représenter l'influence des phénomènes physiques que sont l'effilochement (g_1), la résistance aux goupilles (g_2), la stabilité en cisaillement l'inverse du cisaillement, (g_3) et la friction entre les plis (g_4) sur le temps de drapage.

Deux autres coefficients globaux sont définis représentant la double courbure d'une surface (g_5) et l'influence de la dimension du moule à draper (g_6) qui ont également une influence sur le temps de drapage. Le coefficient global de dimension est utilisé afin de prendre en compte la difficulté croissante à draper une pièce lorsque sa surface globale augmente. Il devient plus complexe de draper une pièce lorsque toutes les géométries ne sont plus à portée de main. La manipulation du tissu pour draper une géométrie peut défaire le travail de drapage d'une géométrie située à l'opposé de la pièce et cette difficulté doit être prise en considération.

Les tissus ont une capacité pour tous ces phénomènes et les coefficients globaux permettent de pondérer les capacités des tissus, ou les paramètres globaux géométriques par rapport au temps de drapage (ou difficulté globale) calculé par l'outil.

À l'aide des temps de drapage réels récupérés sur le plancher, les valeurs de ces coefficients sont déterminées par une programmation macro Excel mathématique détaillée à la Section 7.5.

En plus de s'appuyer sur les même hypothèse que les Équations 7.1 et 7.2, cette équation s'appuie sur les hypothèses suivantes :

1. La difficulté globale est le produit de la somme des difficultés locales et liens, et de la somme des coefficients globaux. La notion de somme des coefficients globaux implique une indépendance des phénomènes physiques, donc par exemple que la friction entre les plis n'a pas d'influence sur la stabilité ;
2. Quatre coefficients globaux (g_1, g_2, g_3, g_4) sont appliqués à chaque géométrie et à chaque lien, et induisent une difficulté supplémentaire liée aux caractéristiques du tissu. Selon le type de moule à draper, certains coefficients sont nuls parce que les phénomènes physiques qu'ils représentent ne sont pas impliqués dans certains types de drapage, par exemple la présence de goupilles ou la nécessité d'une pièce demandant, par exemple, un meilleur fini sur les bords sans opération de découpe post-démoulage ;

La caractérisation des doubles courbures n'a pas été effectuée dans le cadre de cette thèse, par manque de géométrie de base à caractériser. De plus, l'analyse expérimentale nécessite la mise en place d'une méthodologie de caractérisation pour ce type de géométries. Afin d'assurer que cette géométrie soit prise en considération, la double courbure est prise en compte par le biais d'un coefficient global (g_5). Ce coefficient considère l'approximation de l'utilisation d'un tel coefficient est fonction de la surface (mm^2) contenant la double courbure.

Tous les paramètres globaux nécessitent une initialisation. Afin de pouvoir vérifier que la mise en équation ainsi que les hypothèses suscitées sont cohérentes, les résultats de l'outil prédictif doivent être comparés avec les temps réels de dra-

page. La section suivante explique l'architecture de l'outil créé sous Excel en plus d'expliquer les étapes préalables nécessaires à son utilisation.

7.4 Construction du chiffier

Le chiffrier Excel a été conçu de façon à être facile d'utilisation en plus de pouvoir facilement être automatisé. Le chiffrier inclut une section pour les données d'entrée, une section permettant le calcul automatique des difficultés locales, des difficultés des liens et des difficultés globales en plus d'une section résultat présentant les difficultés de chaque géométrie, la difficulté globale et un graphique visuel des difficultés.

7.4.1 Vue d'ensemble

La Figure 7.9 illustre le chiffier Excel de l'outil prédictif. L'utilisateur doit entrer le nombre de plis à utiliser ainsi que le nombre de géométries de base de la pièce. L'utilisateur doit ensuite décomposer la géométrie complexe en géométries de base en indiquant les paramètres de chaque géométrie ainsi que les coordonnées cartésiennes de celles-ci. Ensuite, l'outil calcule la difficulté de chaque géométrie de base ainsi que des liens entre ces géométries. Les difficultés des géométries de base suivent un code couleur allant de rouge - très difficile - à vert - très facile -. Ces difficultés sont quantifiées avec la base de données de la caractérisation des géométries de base, Tableau 6.2. Ensuite, ces difficultés sont comparées avec les capacités de chaque tissu extraites de la base de données tissu, Tableau 5.8, et

les tissus sont classés en ordre du meilleur au plus faible pour la drapabilité de la géométrie complexe donnée. L'orientation préférable - soit $0/90^\circ$ ou $\pm 45^\circ$ - est suggérée pour chaque tissu, avec la localisation des coupes et des joints. Les temps de drapage pour chacun sont aussi mis en évidence.

L'orientation préférable du tissu ($0/90$ ou ± 45) est suggérée par l'outil. Compte tenu de l'orientation de drapage globale d'une pièce, et de l'orientation des géométries de base ($0/90$ ou ± 45 également), l'outil détermine quelle orientation globale permet de draper plus facilement toutes les géométries, autrement dit, de diminuer le temps de drapage. Les orientations des géométries de base sont donc également prises en compte par rapport à l'orientation globale. Pour une géométrie orientée à ± 45 et une orientation globale de drapage à ± 45 , l'outil considère que la géométrie de base est drapée à $0/90$.

En résumé, l'outil permet de calculer le temps de drapage selon les deux directions, et donc déterminer quelle direction de drapage représente un temps moindre, donc un coût de drapage plus faible. Cette version empirique de l'outil prédictif de drapage considère seulement ces deux orientations. Un projet à long terme pourra considérer d'autres orientations afin d'améliorer encore le drapage.

L'outil est également utilisé afin de prédire l'emplacement des coupes et des joints dans les patrons. La difficulté à draper une géométrie est déterminée par ses paramètres géométriques dans la base de données Z des géométries de base (Figure 6.2). Lorsque la difficulté en cisaillement pour le drapage de cette géométrie est supérieure à la capacité de cisaillement du tissu (base de données Y, Figure 5.8), alors, une coupe est nécessaire à l'endroit de cette géométrie de base. Il est possible

d'effectuer virtuellement cette coupe sur l'outil prédictif. Ceci modifie la contribution en cisaillement à la difficulté locale, qui est divisée par 10 (voir Équation 7.1). Lorsqu'une coupe est insérée dans un patron, celle-ci permet de retirer, voir éliminer, le cisaillement à cet endroit. Par contre, la complexité de la pièce augmente puisqu'une coupe engendre un recouvrement qui nécessite du temps de main d'oeuvre, estimé à 15 secondes selon un retour de production.

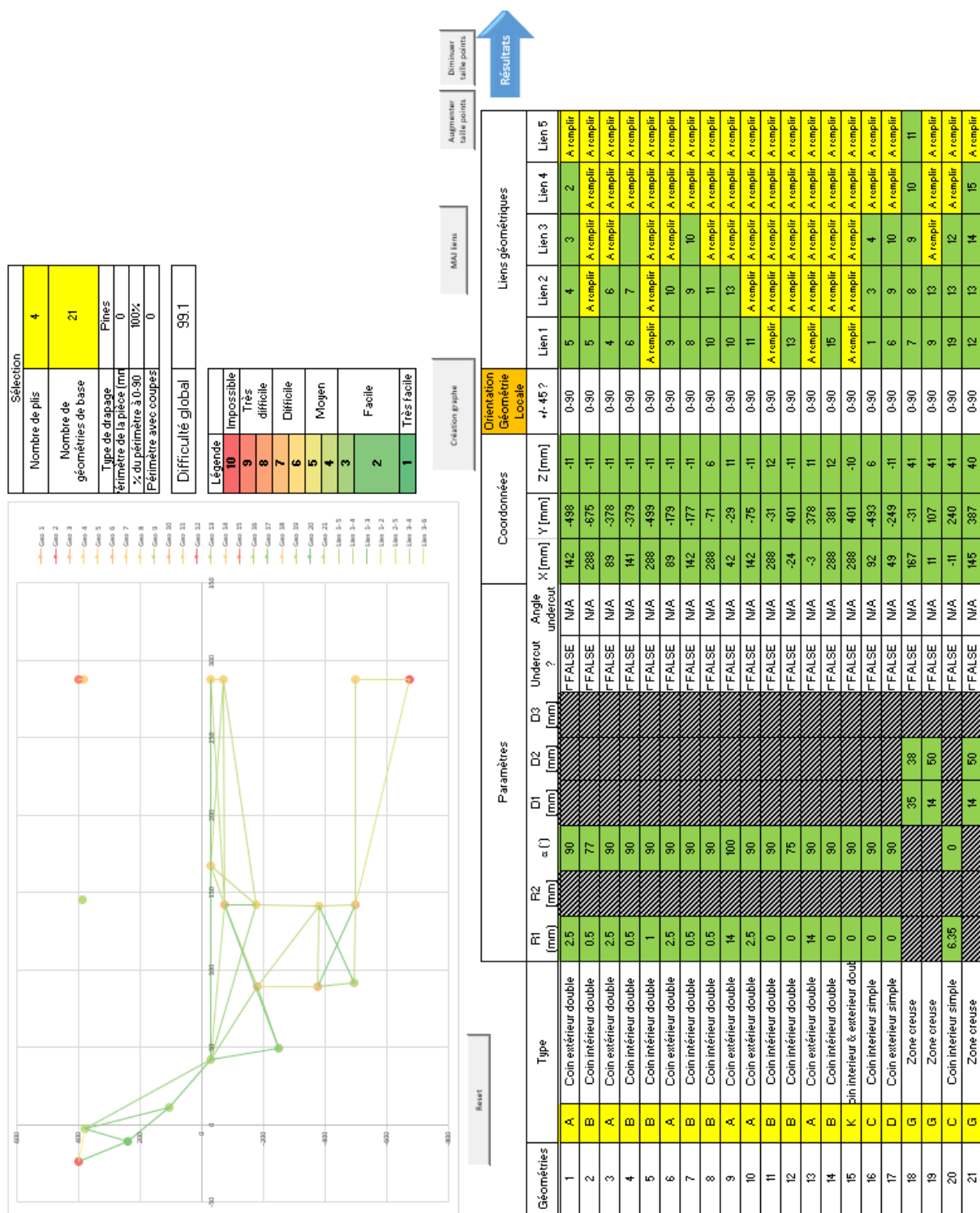


FIGURE 7.8 – Vue d'ensemble de la section des données d'entrées de l'outil prédictif

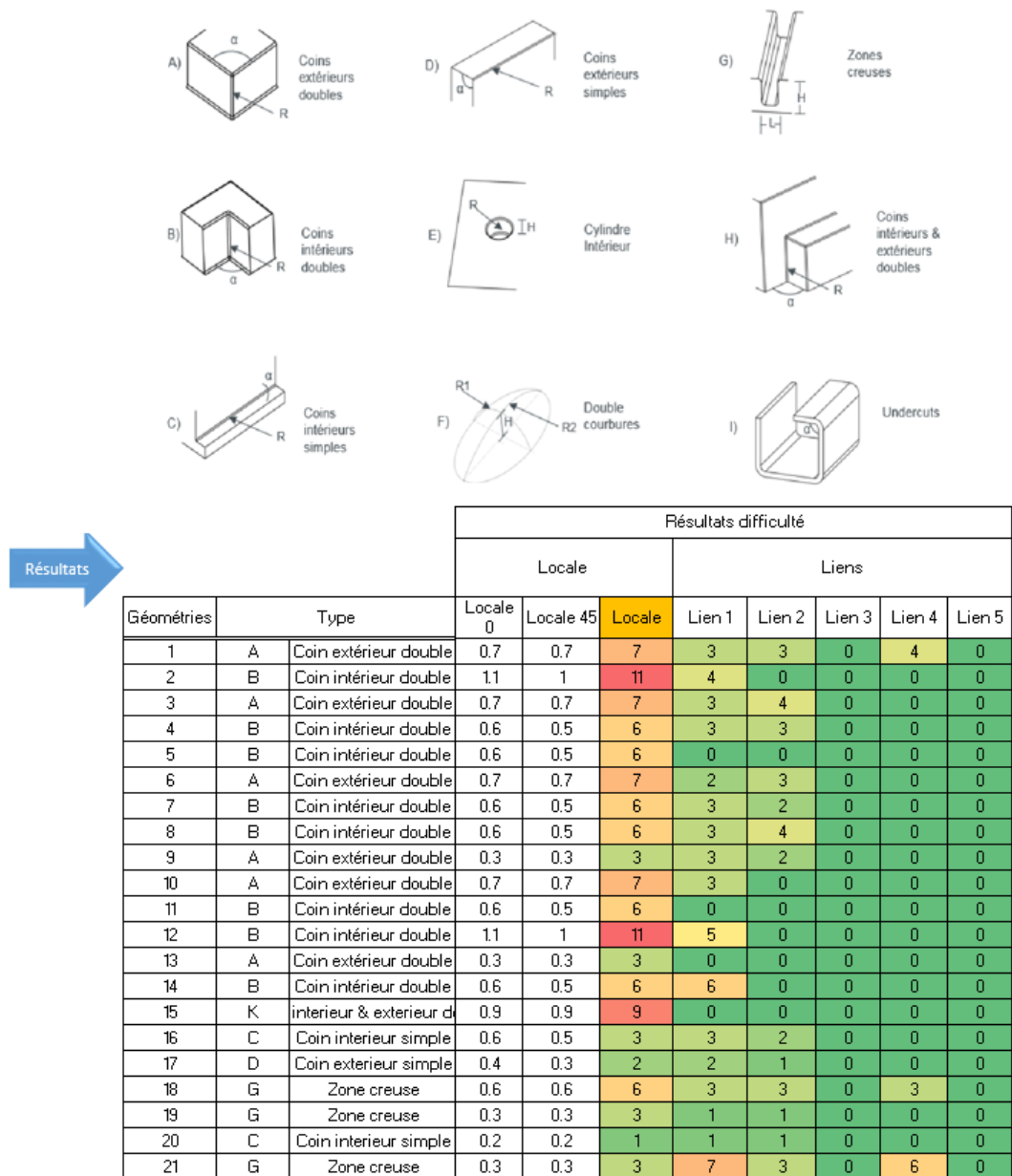


FIGURE 7.9 – Vue d’ensemble de la section résultats de l’outil prédictif

7.4.2 Données d’entrée

Plusieurs données d’entrée doivent être spécifiés par l’utilisateur en début de la simulation. Le nombre de plis, le nombre de géométries de base, le type de drapage i.e. utilisation de goupilles ou non, le périmètre du moule et la fraction du périmètre à 0/90° par rapport aux fibres (+/- 2.5°) doivent être spécifiés. Le Tableau 7.1

montre un exemple des données d'entrée du moule M02772.

Tableau 7.1 – Sélection des données d'entrées pour le moule M02772

Sélection	
Nombre de plis	3
Nombre de géométries de base	12
Type de drapage	Avec goupilles
Périmètre de la pièce (mm)	2544
Fraction du périmètre à 0/90	0.9

Ensuite, les données concernant chacune des géométries de base doivent être spécifiées dans l'outil. Tout d'abord, le type de géométrie doit être spécifié avec le menu déroulant. Ensuite, les paramètres doivent être inscrits dans la zone appropriée. Un point de référence doit être établi, et des coordonnées géométriques pour chacune des géométries doivent être inscrits dans le tableau. Finalement, l'utilisateur doit déterminer, pour chaque géométrie, l'orientation locale par rapport aux fibres en plus d'identifier les géométries de base qui créent un lien avec la géométrie en question. Le Figure 7.10 illustre un exemple des paramètres à entrer dans le cas du moule M02772.

La définition de l'orientation du patron et de la géométrie locale permet de définir si une géométrie est drapée à 0/90° ou $\pm 45^\circ$. Si le patron et la géométrie sont orientés dans la même direction, alors la géométrie est drapée à 0/90°. L'orientation des géométries de base change les capacités du tissu, Chapitre 5, et cette variation de propriétés est prise en compte lors du calcul de la difficulté globale.

Géométries		Type	Paramètres						Coordonnées			Orientation Géométrie Locale	Liens géométriques					
			R1 (mm)	R2 (mm)	α (°)	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	Undercut?	Angle undercut	X [mm]		Y [mm]	Z [mm]	Lien 1	Lien 2	Lien 3	Lien 4
1	A	Coin extérieur double	2.5		90				☐ FALSE	N/A	142	-498	-11	5	4	3	2	A remplir
2	B	Coin intérieur double	0.5		77				☐ FALSE	N/A	288	-675	-11	5	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
3	A	Coin extérieur double	2.5		90				☐ FALSE	N/A	89	-378	-11	4	6	A remplir	A remplir	A remplir
4	B	Coin intérieur double	0.5		90				☐ FALSE	N/A	141	-379	-11	6	7	A remplir	A remplir	A remplir
5	B	Coin intérieur double	1		90				☐ FALSE	N/A	288	-499	-11	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
6	A	Coin extérieur double	2.5		90				☐ FALSE	N/A	89	-179	-11	9	10	A remplir	A remplir	A remplir
7	B	Coin intérieur double	0.5		90				☐ FALSE	N/A	142	-177	-11	8	9	10	A remplir	A remplir
8	B	Coin intérieur double	0.5		90				☐ FALSE	N/A	288	-71	6	10	11	A remplir	A remplir	A remplir
9	A	Coin extérieur double	14		100				☐ FALSE	N/A	42	-29	11	10	13	A remplir	A remplir	A remplir
10	A	Coin extérieur double	2.5		90				☐ FALSE	N/A	142	-75	-11	11	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
11	B	Coin intérieur double	0		90				☐ FALSE	N/A	288	-31	12	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
12	B	Coin intérieur double	0		75				☐ FALSE	N/A	-24	401	-11	13	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
13	A	Coin intérieur double	14		90				☐ FALSE	N/A	-3	378	11	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
14	B	Coin intérieur double	0		90				☐ FALSE	N/A	288	381	12	15	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
15	K	Coin intérieur & extérieur double	0		90				☐ FALSE	N/A	288	401	-10	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir	A remplir
16	C	Coin intérieur simple	0		90				☐ FALSE	N/A	92	-493	6	1	3	4	A remplir	A remplir
17	D	Coin extérieur simple	0		90				☐ FALSE	N/A	49	-249	-11	6	9	10	A remplir	A remplir
18	G	Zone creuse				35	38		☐ FALSE	N/A	167	-31	41	7	8	9	10	11
19	G	Zone creuse				14	50		☐ FALSE	N/A	11	107	41	9	13	A remplir	A remplir	A remplir
20	C	Coin intérieur simple	6.35		0				☐ FALSE	N/A	-11	240	41	19	13	12	A remplir	A remplir
21	G	Zone creuse				14	50		☐ FALSE	N/A	145	387	40	12	14	15	A remplir	A remplir

FIGURE 7.10 – Exemple de l'entrée des géométries de base dans l'outil pour le moule M02772

7.4.3 Calculs des difficultés

Par l'intermédiaire d'une programmation macro Excel et en fonction des valeurs des paramètres des géométries, l'outil parcourt la base de données de caractérisation des géométries de base et renvoie les valeurs correspondantes pour le calcul des difficultés locales, tel qu'illustré à la Figure 7.11. De plus, cette programmation macro Excel calcule la distance et l'angle des liens grâce aux coordonnées des géométries. Ce résultat permet de calculer la difficulté des liens géométriques.

Ensuite, la programmation macro Excel calcule la difficulté locale de chaque géométrie de base en plus de la difficulté de chaque lien. La Figure 7.12 illustre les résultats des calculs pour le moule moule M02772.

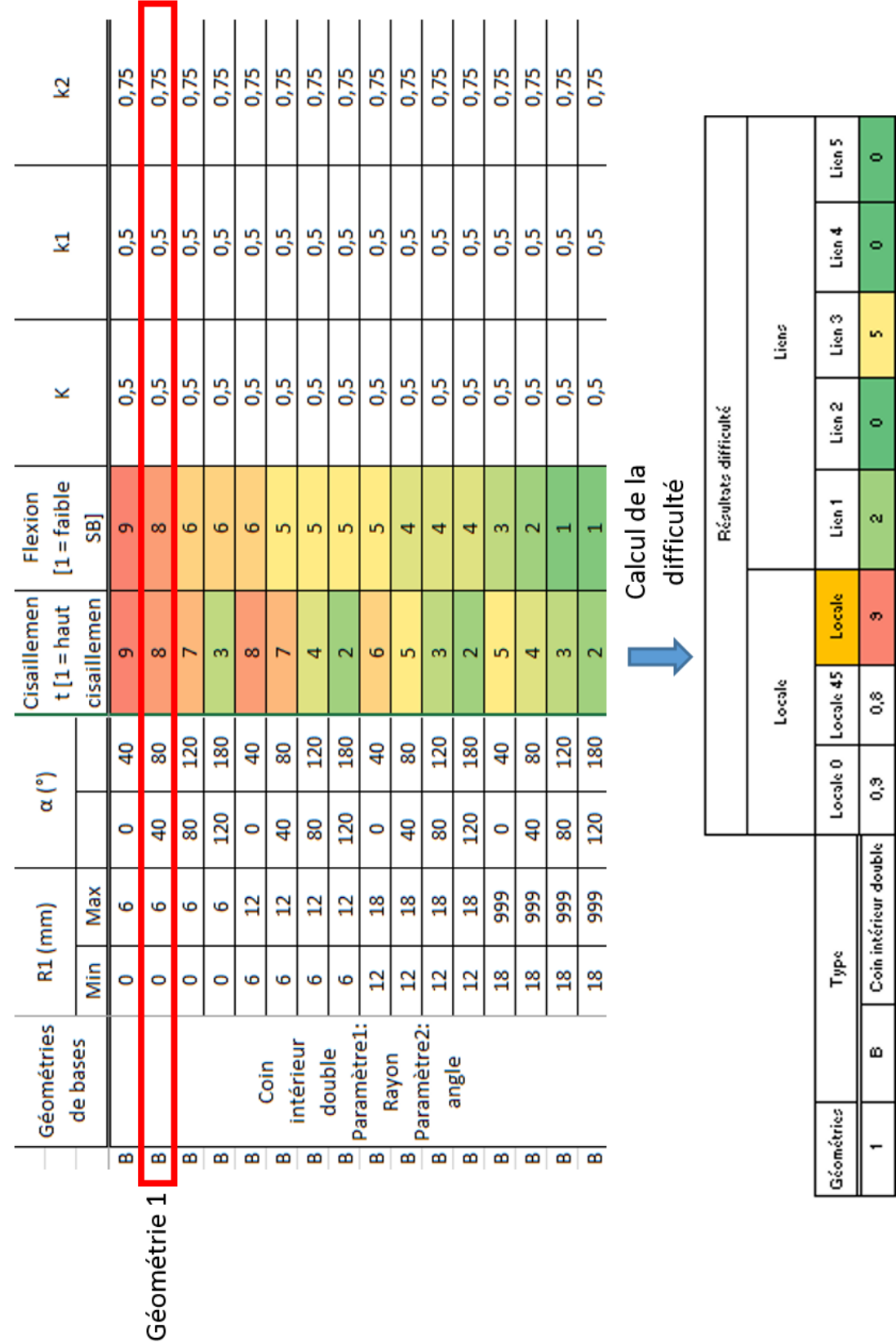


FIGURE 7.11 – Exemple simplifié du calcul pour une géométrie de base

Géométrie locale										Difficulté liens									
Paramètres de complexité locale										Lien 1					Lien 2				
Cisaillage	Flexion	K	k1	k2	(1-K)	(1-k1)	(1-k2)	Coupes?	Difficulté locale	Longueur lien	Angle lien	Géométries liées	Coupes?	Difficulté	Longueur lien	Angle lien	Géométries liées	Coupes?	Difficulté
5	4	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	7	146.0034	1	1-5	☒ TRUE	5	119.0042	5	1-4	☐ FALSE	3
6	8	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☒ TRUE	9	176	0	2-5	☐ FALSE	4	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
5	4	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	7	52.00961	1	3-4	☐ FALSE	3	199	0	3-6	☐ FALSE	4
1	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	6	206.6495	1	4-6	☐ FALSE	3	202.0025	0	4-7	☐ FALSE	3
1	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	6	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
5	4	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	7	157.191	1	6-9	☐ FALSE	2	116.7262	1	6-10	☐ FALSE	3
1	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	6	180.4217	1	7-8	☐ FALSE	3	178.6169	0	7-9	☐ FALSE	2
1	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	6	146.0548	1	8-10	☐ FALSE	3	40	0	8-11	☐ FALSE	4
2	2	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	3	110.0727	0	9-10	☐ FALSE	3	409.4802	0	9-13	☐ FALSE	2
5	4	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	7	152.4861	1	10-11	☐ FALSE	3	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
1	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	6	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
6	8	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☒ TRUE	9	31.14482	1	12-13	☐ FALSE	4	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
2	2	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	3	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
1	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☐ FALSE	6	20	0	14-15	☐ FALSE	6	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
6	6	1	1	1	0.5	0.5	0.25	☒ TRUE	8	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0	0	0	Pas de lien	☐ FALSE	0
0	4	0	1	1	1	0.5	0	☐ FALSE	3	50.24938	0	16-1	☐ FALSE	3	115.0391	1	16-3	☐ FALSE	2
0	2	0	1	0	1	0.5	1	☐ FALSE	2	80.62258	0	17-6	☐ FALSE	2	220.1113	0	17-9	☐ FALSE	1
0	4	0	1	1	1	0.5	0.25	☐ FALSE	6	148.1249	1	18-7	☐ FALSE	3	127.4402	1	18-8	☐ FALSE	3
0	2	0	1	1	1	0.5	0.25	☐ FALSE	3	139.4884	1	19-9	☐ FALSE	1	271.3614	1	19-13	☐ FALSE	1
0	1	0	1	1	1	0.5	0	☐ FALSE	1	134.8073	0	20-19	☐ FALSE	1	138.2317	1	20-13	☐ FALSE	1
0	2	0	1	1	1	0.5	0.25	☐ FALSE	3	0	0	21-12	☐ FALSE	6	0	0	21-13	☐ FALSE	3

FIGURE 7.12 – Exemple de la section calcul des géométries de base pour le moule moule M02772

7.4.4 Section résultats

Le Tableau 7.13 montre les résultats des difficultés locales et des difficultés des liens géométriques pour chaque géométries de base, pour le moule M02772.

Résultats difficulté										
Locale					Liens					
Géométries		Type	Locale 0	Locale 45	Locale	Lien 1	Lien 2	Lien 3	Lien 4	Lien 5
1	A	Coin extérieur double	0.7	0.7	7	3	3	0	4	0
2	B	Coin intérieur double	1.1	1	11	4	0	0	0	0
3	A	Coin extérieur double	0.7	0.7	7	3	4	0	0	0
4	B	Coin intérieur double	0.6	0.5	6	3	3	0	0	0
5	B	Coin intérieur double	0.6	0.5	6	0	0	0	0	0
6	A	Coin extérieur double	0.7	0.7	7	2	3	0	0	0
7	B	Coin intérieur double	0.6	0.5	6	3	2	0	0	0
8	B	Coin intérieur double	0.6	0.5	6	3	4	0	0	0
9	A	Coin extérieur double	0.3	0.3	3	3	2	0	0	0
10	A	Coin extérieur double	0.7	0.7	7	3	0	0	0	0
11	B	Coin intérieur double	0.6	0.5	6	0	0	0	0	0
12	B	Coin intérieur double	1.1	1	11	5	0	0	0	0
13	A	Coin extérieur double	0.3	0.3	3	0	0	0	0	0
14	B	Coin intérieur double	0.6	0.5	6	6	0	0	0	0
15	K	Coin interieur & extérieur double	0.9	0.9	9	0	0	0	0	0
16	C	Coin interieur simple	0.6	0.5	3	3	2	0	0	0
17	D	Coin extérieur simple	0.4	0.3	2	2	1	0	0	0
18	G	Zone creuse	0.6	0.6	6	3	3	0	3	0
19	G	Zone creuse	0.3	0.3	3	1	1	0	0	0
20	C	Coin interieur simple	0.2	0.2	1	1	1	0	0	0
21	G	Zone creuse	0.3	0.3	3	7	3	0	6	0

FIGURE 7.13 – Exemple de résultats pour les géométries de base du moule M02772

Afin de visualiser graphiquement les zones problématiques de drapage, un graphique contenant les positions des géométries de base ainsi que les liens correspondants est tracé avec un code couleur - vert pour difficulté faible - et - rouge pour difficulté élevée -. Ce graphique est défini par une programmation macro.

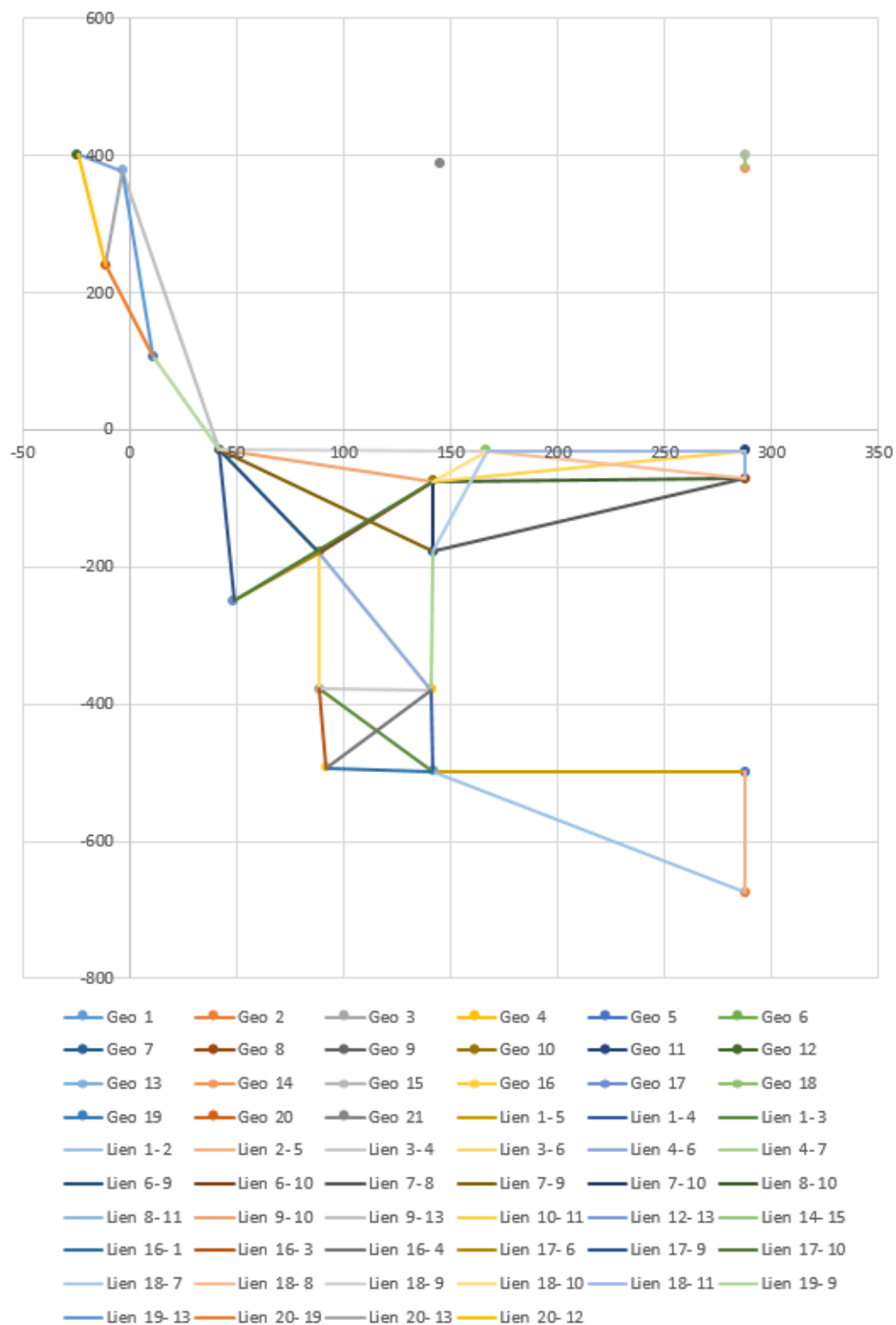


FIGURE 7.14 – Exemple du résultats graphique provenant de l'outil prédictif pour le moule M02772

7.5 Processus d'itération des coefficients

Afin de rendre l'outil prédictif fonctionnel, les paramètres globaux de l'outil doivent être déterminés. Les paramètres globaux à déterminer sont les suivants :

g_1 : Coefficient global d'effiloquement

g_2 : Coefficient global de résistance aux goupilles

g_3 : Coefficient global de stabilité en cisaillement

g_4 : Coefficient global de friction

g_5 : Coefficient global de double courbure

g_6 : Coefficient global de dimension

Afin de pouvoir déterminer ces paramètres, les difficultés générées par l'outil prédictif sont comparées aux temps réels de drapage des patrons dans les moules. Cette étape est seulement exécutée afin de déterminer les paramètres. Une fois la valeur de chaque paramètre déterminée, le moule n'est plus nécessaire et les temps pourront être prédits. La difficulté globale est donc directement liée au temps de drapage.

Une programmation macro Excel est mise en place permettant de varier les coefficients globaux indépendamment les uns par rapport aux autres, pendant que le temps de drapage calculé par l'outil prédictif est comparé au temps cible correspondant au temps réel de drapage en production. Les coefficients sont ajustés afin d'obtenir les bons temps pour 4 moules. Les temps de drapage des 6 autres

moules analysés sont ensuite calculés afin de valider le choix des paramètres.

Afin de diminuer les temps de calcul de la programmation macro Excel, des hypothèses supplémentaires ont été définis avec le procédé de drapage avec goupilles de localisation :

1. $g_1 = 0$; puisque l'effilochement a un très faible impact sur le drapage lorsque le procédé de positionnement des patrons utilise des goupille de localisation et que le patron n'a pas la nécessité d'avoir un contour sans effilochement à la forme finale, on considère comme étant nul l'impact de l'effilochement ;
2. $g_3 = 0$; la stabilité en cisaillement du tissu n'a aucune influence lors d'un drapage avec goupilles, étant donnée que le tissu est guidé par avec les goupilles. Le tissu ne peut donc pas cisailer librement comme dans un drapage normal.

Le Tableau 7.2 montre les simplifications effectuées lors du calcul.

Tableau 7.2 – Cas simplifié

Goupilles	Double courbure	Paramètres variables
X		g_2, g_4
X	X	g_2, g_4, g_5

La Figure 7.15 illustre le processus de simplification des paramètres pour l'optimisation du cas de drapage avec goupilles.

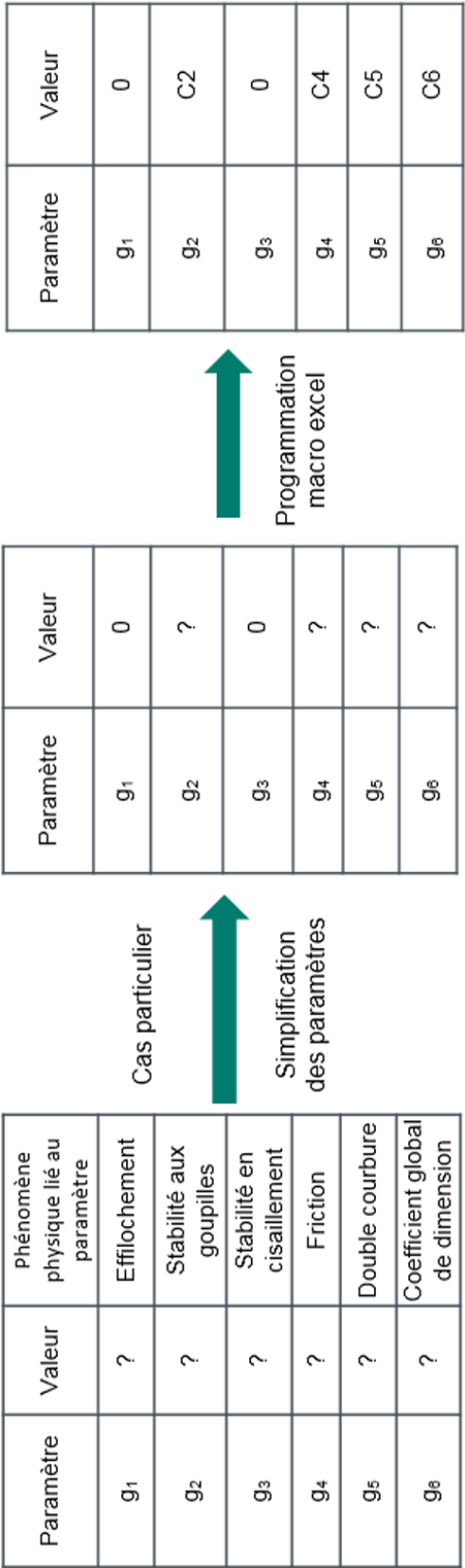


FIGURE 7.15 – Simplification des paramètres pour l’optimisation

Pour la validation des temps prévus par l’outil prédictif dans le cas avec goupilles,

les moules M04624, M04630, M04603 et M04599 illustrés à la Figure 6.1 ont été sélectionnés. Cette figure indique que pour le cas particulier où le drapage se fait avec des goupilles de localisation, les paramètres principaux influençant le drapage sont g_2 , g_4 et g_5 .

Pour chacun des 4 moules, la programmation macro Excel permet de tester toutes les valeurs des 2 paramètres (g_2 et g_4) dans les conditions suivantes :

Tableau 7.3 – Résultats partiels de la programmation macro Excel pour le moule M04630

g_2	g_4	Écart du temps calculé avec le temps réel [min]	Erreur relative [%]
0.15	1	2.87	4.33
0.20	0.9	2.87	4.33
0.20	0.95	2.9	3.33
0.20	1	2.94	2.00
0.25	0.8	2.88	4.00
0.25	0.85	2.91	3.00
0.25	0.9	2.94	2.00
0.25	0.95	2.97	1.00
0.25	1	3.01	0.33
0.30	0.7	2.88	4.00
0.30	0.75	2.91	3.00
0.30	0.8	2.95	1.67
0.30	0.85	2.98	0.67
0.30	0.9	3.01	0.33
0.30	0.95	3.04	1.33
0.30	1	3.08	2.67
0.35	0.6	2.88	4.00
0.35	0.65	2.92	2.67
0.35	0.7	2.95	1.67
0.35	0.75	2.98	0.67
0.35	0.8	3.02	0.67

Le Tableau 7.3 présente les résultats du programme macro Excel. La programmation teste toutes les valeurs des paramètres g_2 et g_4 , pour ensuite écrire ces valeurs dans le tableau des résultats seulement si $Temps\ réel - 5\% \leq Temps\ calculé \leq Temps\ réel + 5\%$. Cette programmation macro Excel est appliquée aux quatre

moules utilisés pour la validation. Les résultats sont présentés à la Figure 7.16. Cette étape est effectuée seulement pour la détermination des paramètres g_2 et g_4 et n'a aucun lien avec la sélection des tissus. Une fois les paramètres déterminée, ceux-ci seront utilisés afin de calculer la difficulté globale d'une géométrie complexe.

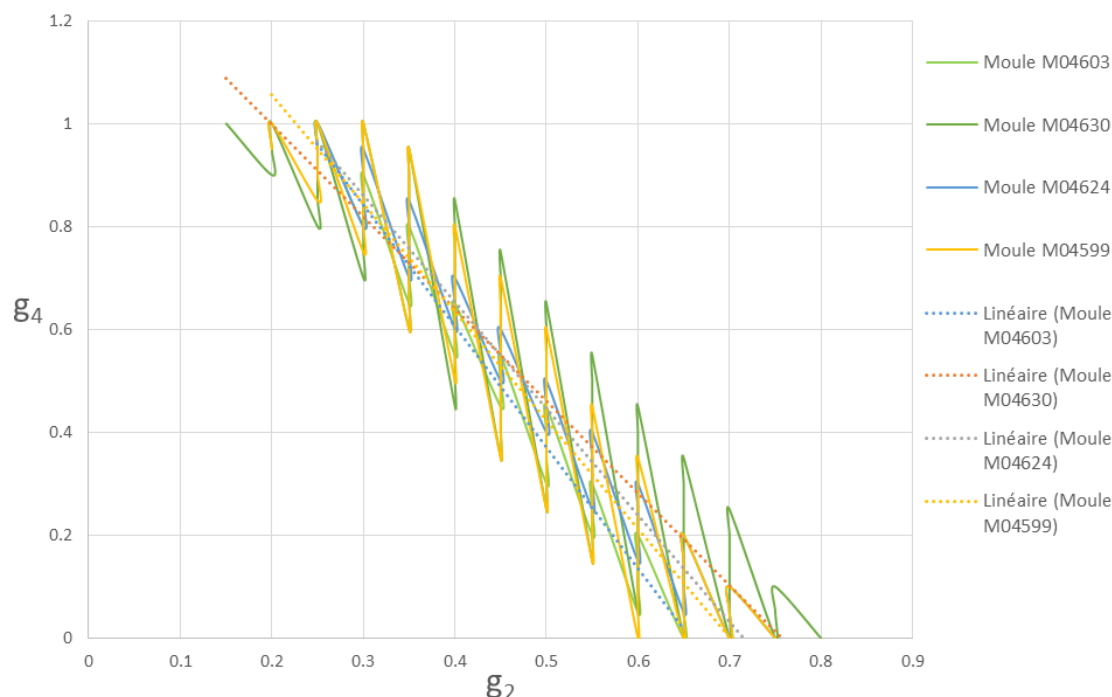


FIGURE 7.16 – Courbes pour la détermination des paramètres g_2 et g_4

Les résultats bruts sont difficiles à lire étant donné que pour chaque valeur de g_2 , il existe plusieurs valeurs de g_4 pour lesquelles $Temps\ réel - 5\% \leq Temps\ calculé \leq Temps\ réel + 5\%$ (voir Tableau 7.3). La Figure 7.16 inclut les droites représentant les valeurs pour lesquelles l'erreur entre les temps calculés et les temps réels est nulle. Les extrémités supérieures et inférieures correspondent respectivement à une erreur de $+5\%$ et -5% . Ces courbes permettent de déterminer une zone permettant de minimiser la différence des 3 moules (diminuer la moyenne des 3 erreurs, ainsi que l'écart type entre les 3 moules). De cette façon, il est possible de déterminer

un couple approprié pour g_2 et g_4 .

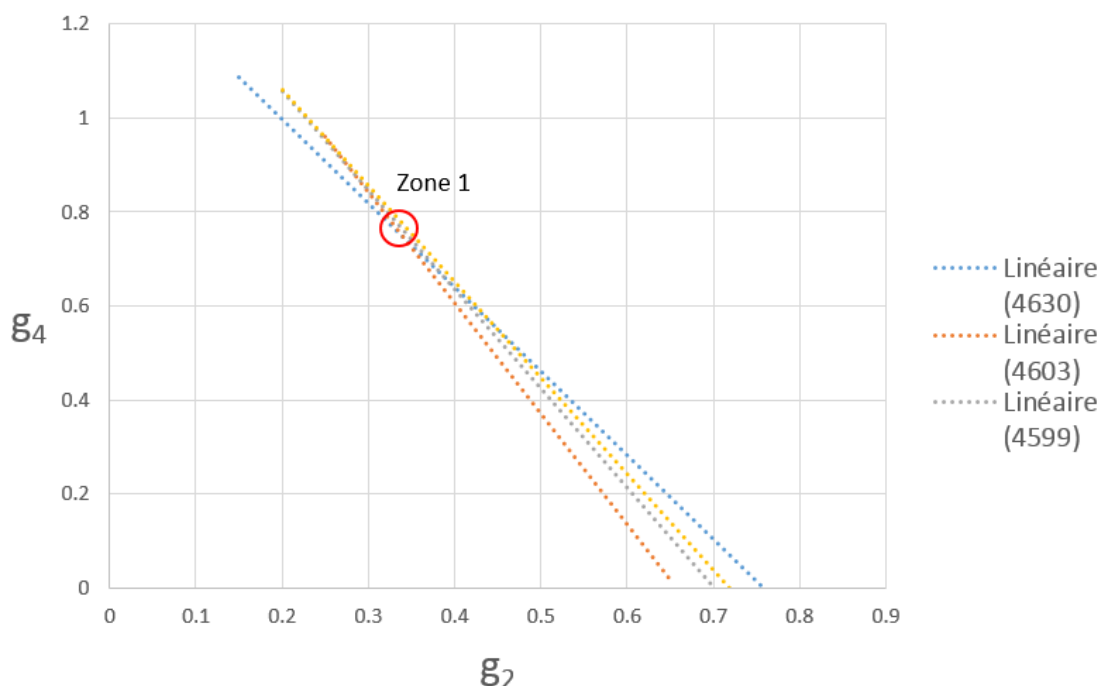


FIGURE 7.17 – Courbes des résultats de g_4 en fonction de g_2 avec interpolations linéaires

Le couple se situe dans la zone 1, illustrée à la Figure 7.17. Cette zone contient les valeurs g_2 et g_4 pour lesquels la moyenne des erreurs des 4 moules ainsi que leurs écarts types sont les plus faibles. Il n'est pas possible de déterminer le couple avec une erreur nulle pour les 4 moules. En faisant un compromis sur l'erreur de chaque moule, il est possible de trouver un point central. On cherche donc à minimiser la moyenne des erreurs pour ensuite minimiser l'écart-type. De cette façon, il est possible de déterminer un couple pour lequel l'écart-type est plus faible.

Les résultats mathématiques de la programmation macro Excel montrent que g_4 est supérieure à g_2 . Cela signifie donc, comme imaginé intuitivement, que la friction entre les plis est bien plus influente que la stabilité des goupilles.

La situation idéale serait de valider la prédiction des temps de l'outil prédictif avec

tous les moules disponibles. Par contre, ceci demande un temps de calcul considérable compte tenu que le programme macro Excel pour la recherche de solution parcourt tous les tableaux de résultats afin de trouver des valeurs identiques dans une plage de 5% d'erreur, Figure 7.18. La recherche des paramètres pour la prédiction des temps de drapage est donc effectuée avec 4 moules seulement et les temps de drapage pour les 6 autres moules est calculé afin de valider d'avantage le fonctionnement de l'outil. Les résultats de la programmation macro Excel pour la détermination des temps pour les 4 moules sont présentés au Tableau 7.4.

Tableau 7.4 – Résultats partiels de la macro pour recherche de solution

g_2	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.35	0.35
g_4	0.9	0.95	1.00	0.80	0.85	0.90	0.70	0.75
Erreur moule M04624	4.24	1.52	1.28	3.84	1.12	1.60	3.52	0.72
Erreur moule M04624	3.89	0.99	1.90	2.74	0.19	3.09	1.56	1.33
Erreur moule M04624	2.00	1.00	0.33	1.67	0.67	0.33	1.67	0.67
Erreur moule M04624	3.18	1.76	0.47	2.59	1.29	0.00	2.11	0.71
Moyenne des erreurs	3.32	1.32	0.99	2.71	0.82	1.25	2.22	0.85
Écart type des erreurs	0.99	0.39	0.74	0.89	0.49	1.40	0.90	0.32

La Figure 7.18 illustre le parcours effectué par le programme macro Excel permettant de comparer les erreurs relatives pour chacun des 4 moules.

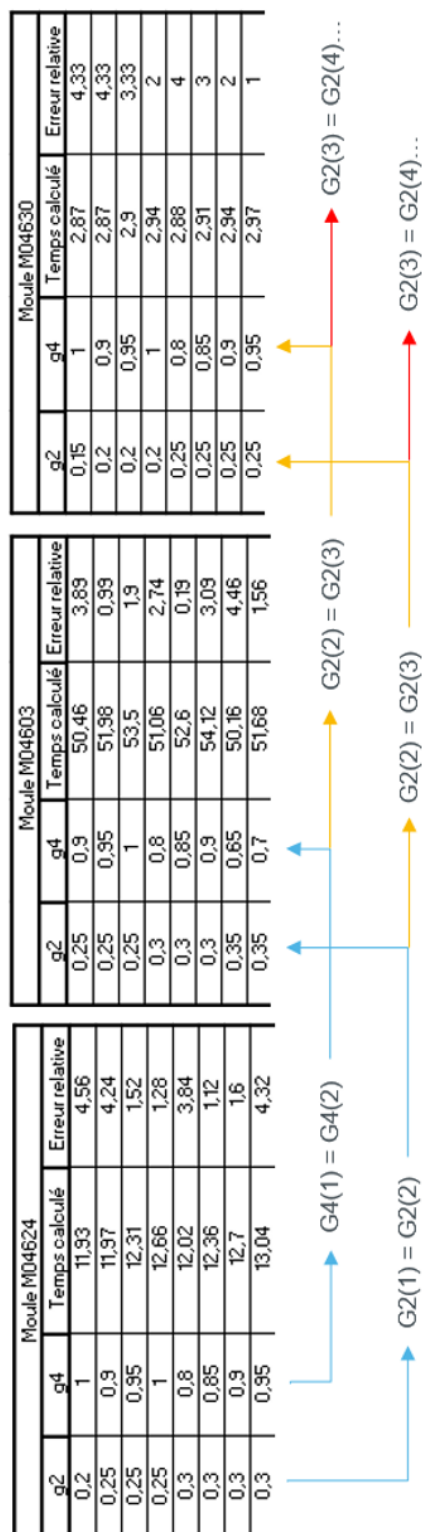


FIGURE 7.18 – Représentation du parcours de la programmation macro Excel

Le Tableau ?? montre le couple g_2 et g_4 sélectionné avec la moyenne des erreurs et leur écart type. Ce couple a été sélectionné considérant que la moyenne des

erreurs et l'écart type sont faibles. Le Tableau 7.5 montre les erreurs pour chacun des moules utilisant les paramètres g_2 et g_4 sélectionnés.

Tableau 7.5 – Sélection du couple g_2 et g_4

Paramètres		Valeur
g_2		0.3
g_4		0.85
Erreur moule M04603	[%]	0.2
Erreur moule M04624	[%]	1.12
Erreur moule M04630	[%]	0.67
Erreur moule M04599	[%]	1.3
Moyenne des erreurs	[%]	0.82
Ecart type		0.49

7.6 Résultats

Le Tableau 7.6 illustre les résultats pour la détermination des paramètres permettant de calculer le temps de drapage pour un moule avec goupilles de localisation.

Tableau 7.6 – Résultats des temps de drapage estimé

Moules	Temps drapage estimé [<i>min</i>]	Temps drapage calculé [<i>min</i>]	Erreur relative [%]
M04599	17	16.8	1.29
M04603	52.5	52.6	0.2
M04607	45	46.2	2.6
M04610	17.5	19.7	12.9
M04614	22.5	20.1	10.6
M04620	15	13.6	9.5
M04624	12.5	12.4	1.12
M04630	3	2.98	0.7
M04632	45	44.9	0.3
M04639	30	26.4	11.9

Les résultats sont forcément très précis pour les 4 pièces utilisées pour la validation de l'outil prédictif étant donnée que le calcul itératif pour la détermination des

paramètres a été effectué avec ces moules. Les résultats sont plus dispersés pour les autres moules, mais l'erreur demeure inférieur à 15%.

Plusieurs raisons permettent d'expliquer ces erreurs plus élevées. Lorsque la géométrie d'un moule diffère des géométries utilisées pour la validation des temps de drapage, les résultats peuvent diverger. Ces divergences pourraient être causées par des caractéristiques géométriques qui n'auraient pas été prises en compte dans le calcul et qui ont une incidence sur les temps de drapage :

1. Des paramètres géométriques supplémentaires n'ayant pas été pris en considération, tels que la hauteur de certaines géométries de base ou l'angle d'une géométrie par rapport à l'horizontale ;
2. La double courbure générale d'une géométrie, prise en compte seulement par un facteur global lié à l'aire de surface de la double courbure ;
3. La longueur de certaines géométries tel qu'un coin extérieur ou intérieur simple, n'ayant pas été prise en considération.

Le paramètre g_5 est le coefficient global de double courbure et s'applique uniquement aux pièces contenant des doubles courbures. Ce paramètre est donc déterminé indépendamment du coefficient global de stabilité des goupilles g_2 et du coefficient global de friction g_4 . Cependant, une fois les paramètres g_2 et g_4 déterminés avec le cas de drapage avec goupilles, la détermination de g_5 peut être effectuée en ayant déjà les paramètres g_2 et g_4 , permettant donc de réduire les temps de calcul pour la détermination de g_5 .

Finalement, l'outil prédictif permet la prédiction des temps de drapage pour une

géométrie complexe. Selon une optimisation des paramètres globaux effectuée sur 4 moules, les erreurs relatives entre les temps de drapage estimés par l'outil prédictif et les temps réels sont inférieurs à 20% pour 10 moules. Considérant que la difficulté de drapage résultant de l'outil prédictif change en fonction de la sélection du tissu, il est possible de déterminer quels tissus et quelles orientations engendrent le moins de difficulté pour une géométrie donnée. Aussi, les difficultés illustrées en rouge sur le graphique des résultats provenant de l'outil prédictif illustrent les endroits où il est préférable d'intégrer une coupe ou un joint. Au stade de développement actuel de l'outil prédictif, plusieurs hypothèses restent à valider ; par contre l'outil peut être utilisé par les chargés de projets chez Hutchinson afin de faciliter la prédiction des temps de drapage, la sélection du tissu, la sélection de l'orientation des fibres ainsi que la localisation des coupes et des joints.

Chapitre 8

Conclusion et Travaux Futurs

Les principales caractéristiques influençant le drapage ont été identifiées sur des moules réels chez Hutchinson. Neuf géométries de base ont été identifiées, permettant de reconstruire n'importe quelle géométrie complexe chez Hutchinson. Des paramètres influençant le drapage ont été identifiés pour chacune de ces géométries.

Des outils de caractérisation ont été développés afin de quantifier les principales caractéristiques du comportement des tissus ; le cisaillement, le retour élastique en cisaillement, la flexion bord, la flexion coin, la friction entre les plis, la friction avec le moule, l'effilochement ainsi que la stabilité des goupilles. Quatre tissus ont été caractérisés : un tissu toile de verre style 7500, un satin 8 de verre style 7781, un sergé de carbone style 1040 et un satin 5 de carbone style 4540 avec poudre d'époxy. Les résultats des essais de caractérisation des tissus ont été transposés sur une échelle de 1 à 10 afin de permettre une comparaison facile des tissus et une utilisation plus facile dans l'outil prédictif. Un tableau du même type a été

construit pour la caractérisation des géométries de base.

L'établissement d'une liaison des résultats de la caractérisation des tissus et de la caractérisation des géométries de base a permis le développement d'un outil prédictif du drapage. Cet outil a été développé à l'aide d'un chiffrier Excel, afin de déterminer le temps de drapage, le meilleur tissu pour draper une géométrie donnée, l'orientation préférable des fibres et la localisation des coupes et des joints. Cet outil numérique est basé sur des calculs avec un ratio entre la difficulté des géométries de base (Tableau 6.2) et sur la capacité des tissus (Tableau 5.8).

L'outil prédictif permet de prédire les temps de drapage d'une géométrie complexe avec un tissu. Cet outil permet aussi de déterminer les zones problématiques où une coupe ou un joint est nécessaire. L'outil prédictif permet aussi de différencier la difficulté de drapage en fonction du tissu utilisé. Par contre, plusieurs essais supplémentaires doivent être effectués avant de valider la prédiction du temps de drapage pour d'autres tissus.

8.1 Travaux Futurs

Plusieurs axes de travaux futurs pourront être envisagés afin d'obtenir un outil prédictif plus précis et offrant plus de possibilités en termes d'utilisation.

Afin d'augmenter les possibilités, les bases de données de caractérisation des tissus et des géométries de base pourront être enrichies. Des tissus supplémentaires pourront être caractérisés afin d'augmenter le choix de tissus à draper pour la caractérisation des géométries de base. La caractérisation des géométries de base

pourra être améliorée en augmentant le nombre de géométries caractérisées ainsi que la précision des outils de caractérisation. Des géométries imprimées 3D pourront être utilisées afin d'enrichir la base de données et diminuer les erreurs de manipulations causées par les liens géométriques dans les moules réels. Actuellement, les essais de caractérisation des géométries de base peuvent être légèrement faussés dû au lien géométrique présent sur les moules. Des simulations de drapage pourront être effectuées afin de connaître le cisaillement pour chaque configuration des géométries de base. Afin d'obtenir toutes l'information possibles de ces simulations pour tous les paramètres des géométries de base, une analyse Taguchi pourra être effectuée. Aussi, un logiciel pourra être développé afin de permettre une simulation automatique du cisaillement des géométries de base en faisant varier les paramètres.

Une corrélation pourra être déterminée entre la flexion, la friction et le nombre de plis de tissu. Une tendance pourra être développé entre ces paramètres afin d'établir la corrélation. Cette corrélation pourra potentiellement diminuer le nombre d'essais de drapage nécessaires pour compléter la base de données des géométries de base, et celle de la caractérisation des tissus.

Afin de faciliter l'utilisation de l'outil prédictif, un outil pourra être développé afin de décomposer automatiquement les géométries complexes en géométries de base, par reconnaissance de formes automatique. Le programme permettra d'identifier les géométries de base à partir du fichier CAO, de quantifier celles-ci et d'identifier les difficultés de chacune d'entre elles à partir de la base de données. Le programme permettra aussi la reconstruction de la géométrie complexe à partir

de ces géométries de base indiquant les difficultés de chacune d'entre elles et de leurs liens.

La Figure 8.1 illustre la vision à long terme de l'outil prédictif.

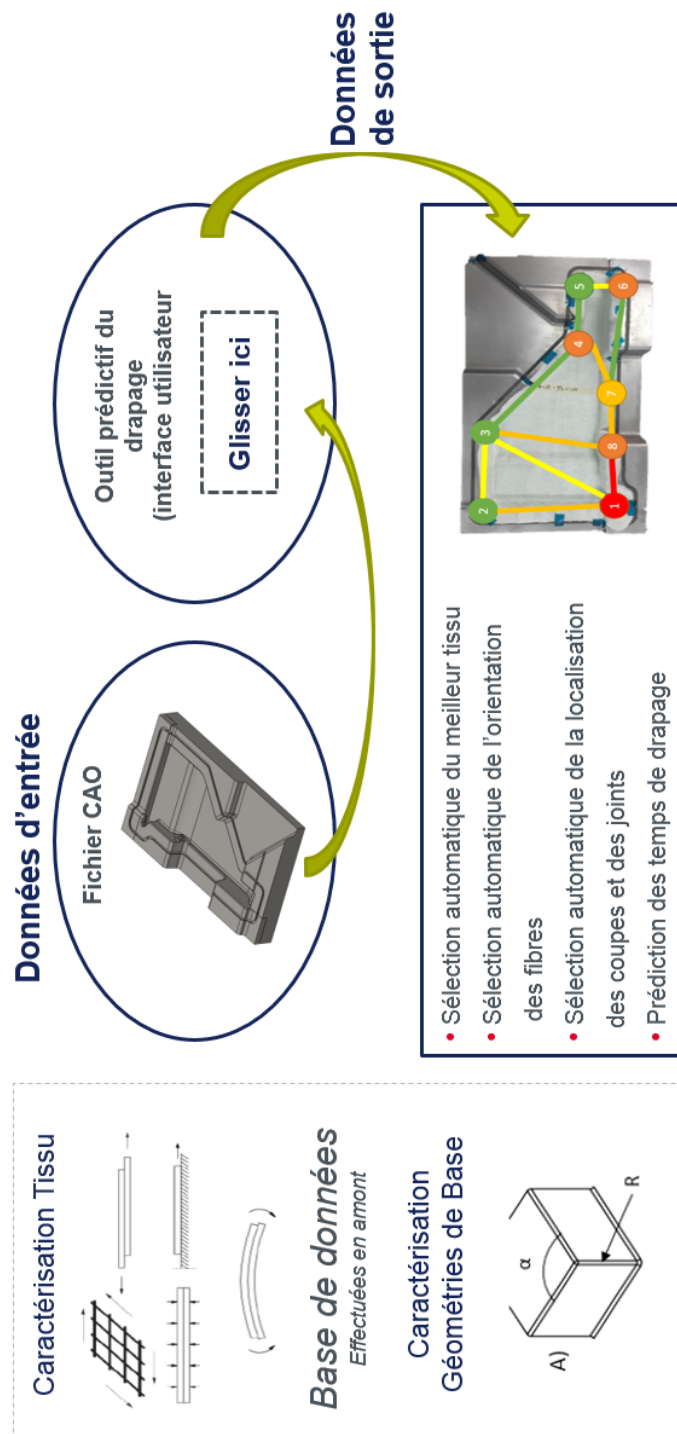


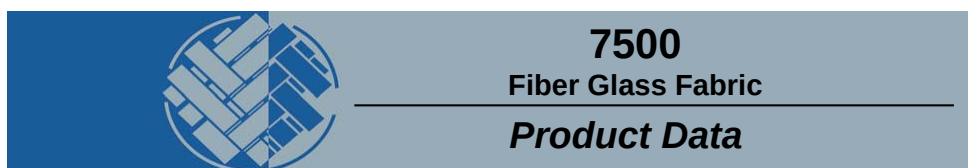
FIGURE 8.1 – Vision long terme de l'outil prédictif

Appendices

Annexe A

Fiches Techniques

A.1 Tissu toile de verre style 7500



STYLE	7500	US System	SI Units
Type of Yarns	Warp Yarn:	ECG 37 1/2	EC9 134 x2
	Fill Yarn:	ECG 37 1/2	EC9 134 x2
Fabric Weight, Dry		9.60 oz/yd ²	325 g/m ²
Weave Style	Plain		
CONSTRUCTION			
Nominal Construction	Warp Count:	16/in	6.3/cm
	Fill Count:	14/in	5.5/cm
Fabric Thickness		11.0 mils	0.28 mm
Yarn Breaking Strength	Warp	300 lbf/in	263 daN/5cm
	Filling	250 lbf/in	219 daN/5cm
Markets			
	Recreational		
Applications			
	Low Pressure Composites		
IMPORTANT			
All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. All values have been generated from limited data. The values listed for weight, thickness, and breaking strengths are typical greige values, unless otherwise noted. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms. The fabric style listed may not be available from inventory, and minimum order quantities may apply.			
FOR FURTHER INFORMATION, PLEASE CONTACT US			



2200 S. Murray Ave.
Anderson, SC 29622
USA
Phone: 864-225-7028
Fax: 864-260-6581

580 North Gilbert St.
Fullerton, CA 92833
USA
Phone: 714-278-0850
Fax: 714-526-2367

3, Avenue Condorcet
69608 Villeurbanne Cedex
France
Phone: 33 4 72 44 40 00
Fax: 33 4 78 89 72 30

A.2 Tissu satin 8 de verre style 7781



STYLE 7781		US System	SI Units
Type of Yarns	Warp Yarn:	ECDE 75 1/0	EC6 66
	Fill Yarn:	ECDE 75 1/0	EC6 66
Fabric Weight, Dry		8.95 oz/yd ²	303 g/m ²
Weave Style	8H Satin		
CONSTRUCTION			
Nominal Construction	Warp Count:	57/in	22.4/cm
	Fill Count:	54/in	21.3/cm
Fabric Thickness		9.0 mils	0.23 mm
Yarn Breaking Strength	Warp	350 lbf/in	306 daN/5cm
	Filling	340 lbf/in	298 daN/5cm
Markets	Aeronautics/Aerospace		
	Recreational		
Applications	Aircraft Advanced Composites		
	Low Pressure Composites		

IMPORTANT

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. All values have been generated from limited data. The values listed for weight, thickness, and breaking strengths are typical greige values, unless otherwise noted. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms. The fabric style listed may not be available from inventory, and minimum order quantities may apply.

FOR FURTHER INFORMATION, PLEASE CONTACT US



2200 S. Murray Ave.
Anderson, SC 29622
USA
Phone: 864-225-7028
Fax: 864-260-6581

A.3 Tissu sergé de carbone style 1040

Fabric Availability*/Specification

FABRIC DESCRIPTION										FABRIC CONSTRUCTION										NOTES		
	Length Yards	Resin Compatibility	Weave	Thickness				Nominal		Warp			Fill							Int Style Replace		
				mm	in.	g/m²	oz/yd²	Prim. Fiber	Fiber Tex	Sec. Fiber	Fiber Tex	Counts ends/cm	Theoretical g/m²	oz/yd²	Prim. Fiber	Fiber Tex	Sec. Fiber	Fiber Tex	Counts ends/cm		Theoretical g/m²	oz/yd²
E Glass 0°/90°																						
TG-04-P	165	A	PW	0.16	0.006	122	3.6	E-Glass	68	n/a	n/a	8.7	61	1.8	E-Glass	68	n/a	n/a	8.7	61	1.8	1522
TG-06-P	190	A	PW	0.20	0.008	207	6.1	E-Glass	134	n/a	n/a	7.5	104	3.0	E-Glass	134	n/a	n/a	7.5	104	3.1	
TG-09-P	110	A	PW	0.33	0.013	306	9.0	E-Glass	275	n/a	n/a	5.5	154	4.5	E-Glass	275	n/a	n/a	5.5	152	4.5	
TG-09-T	110	A	2X2 T	0.41	0.016	315	9.3	E-Glass	275	n/a	n/a	5.5	154	4.5	E-Glass	275	n/a	n/a	5.5	161	4.8	
TG-09-N	110	A	NCS	0.60	0.024	325	9.6	E-Glass	275	Polyester	16.66	5.5	163	4.9	E-Glass	275	Polyester	16.66	5.1	162	4.7	
TG-12-N	110	A	NCS	0.61	0.024	380	11.2	E-Glass	330	Polyester	16.66	5.5	195	5.7	E-Glass	330	Polyester	16.66	5.5	185	5.5	
TG-15-N	80	A	NCS	0.76	0.030	518	15.3	E-Glass	735	Polyester	16.66	3.1	224	6.6	E-Glass	275	E-Glass	275	5.2	294	8.7	
TG-22-N	55	A	NCS	0.95	0.037	744	21.9	E-Glass	1100	Polyester	16.66	3.1	342	10.1	E-Glass	275	E-Glass	275	7.0	402	11.8	
TG-33-N	55	A	NCS	1.42	0.056	1125	33.2	E-Glass	2200	Polyester	16.66	2.3	516	15.3	E-Glass	735	E-Glass	735	4.2	609	17.9	
TG-45-E	55	A	3X2 DT	2.00	0.079	1526	45.0	E-Glass	1100	n/a	n/a	7.0	763	22.5	E-Glass	1100	n/a	n/a	7.0	763	22.5	
TG-54-N	38	A	NCS	2.05	0.081	1830	54.0	E-Glass	1100	E-Glass	134	2.7	952	28.1	E-Glass	735	E-Glass	735	5.7	878	25.9	
TG-75-N	33	A	NCS	2.80	0.110	2542	75.0	E-Glass	1100	E-Glass	275	3.8	1325	39.0	E-Glass	1100	E-Glass	735	6.4	1217	36.0	
TG-96-N	27	A	NCS	3.10	0.122	3250	95.9	E-Glass	1100	E-Glass	275	2.3	1723	50.8	E-Glass	1100	E-Glass	1100	6.8	1528	45.1	
E Glass Uni																						
TG-09-U	110	A	Uni Warp	0.50	0.020	303	8.9	E-Glass	735	n/a	n/a	3.8	286	8.4	Hot melt	60	E-Glass	134	1.6	17	0.5	
TG-13-U	110	A	Uni Warp	0.55	0.022	443	13.1	E-Glass	1100	n/a	n/a	3.8	434	12.8	Hot melt	60	E-Glass	68	1.6	9	0.3	
TG-18-U	80	A	Uni Warp	1.00	0.039	605	17.8	E-Glass	1100	n/a	n/a	5.5	594	17.5	Hot melt	60	E-Glass	134	1.0	11	0.3	
TG-27-U	80	A	Uni Warp	1.10	0.043	925	27.3	E-Glass	1100	n/a	n/a	4.0	916	27.0	Hot melt	60	E-Glass	68	1.6	9	0.3	
Carbon 0°/90°																						
TC-06-P	110	B	PW	0.30	0.012	197	5.8	Carbon 3K	200	n/a	n/a	4.7	99	2.9	Carbon 3K	200	n/a	n/a	4.7	99	2.9	282
TC-06-T	110	B	2X2 T	0.30	0.012	197	5.8	Carbon 3K	200	n/a	n/a	5.0	99	2.9	Carbon 3K	200	n/a	n/a	5.0	99	2.9	
TD-06-P	110	B	PW	0.42	0.017	205	6.0	Carbon 12K	800	n/a	n/a	1.2	103	3.0	Carbon 12K	800	n/a	n/a	1.2	103	3.0	
TC-07-N	110	B	NCS	0.66	0.026	252	7.4	Carbon 12K	800	Polyester	16.66	1.8	155	4.6	Carbon 3K	200	Polyester	14	4.5	97	2.9	
TC-12-T	110	B	2X2 T	0.76	0.030	405	11.9	Carbon 6K	400	n/a	n/a	5.0	200	5.9	Carbon 6K	400	n/a	n/a	5.0	205	6.0	
TC-12-P	110	B	PW	0.76	0.030	412	12.2	Carbon 12K	800	n/a	n/a	2.6	206	6.1	Carbon 12K	800	n/a	n/a	2.5	206	6.1	
TC-18-N	80	B	NCS	1.09	0.043	610	18.0	Carbon 12K	800	Polyester	16.66	3.8	311	9.2	Carbon 12K	800	Polyester	16.66	3.6	299	8.8	
Carbon Uni																						
TC-09-U	110	B	Uni Warp	0.75	0.030	315	9.3	Carbon 12K	800	n/a	n/a	3.8	298	8.8	Hot melt	60	E-Glass	68	1.6	17	0.5	
TC-14-U	80	B	Uni Warp			470	13.9	Carbon 12K	800	n/a	n/a		481	14.2	Hot melt	60	E-Glass	68	1.6	17	0.5	
TK-09-U	110	B	Uni Warp	0.84	0.033	305	9.0	Carbon 48K	3300	n/a	n/a	0.8	288	8.5	Hot melt	60	n/a	n/a	n/a	17	0.5	

Fabric Availability*/Specification

FABRIC DESCRIPTION								FABRIC CONSTRUCTION												NOTES						
 <i>jb martin</i>	Length	Resin Compatibility	Warp								Fill								Int Style							
			Weave	Thickness		Nominal		Prim. Fiber	Fiber Tex	Sec. Fiber	Fiber Tex	Counts ends/cm	Theoretical		Prim. Fiber	Fiber Tex	Sec. Fiber	Fiber Tex		Counts ends/cm	Theoretical					
				mm	in.	g/m²	oz/yd²						g/m²	oz/yd²							g/m²	oz/yd²	g/m²	oz/yd²		
Style	Yards																									Replace
Aramid 0°/90°																										
TA-05-P	165	B	PW	0.33	0.013	165	4.9	Aramid	158	n/a	n/a	5.1	83	2.4	Aramid	158	n/a	n/a	5.1	83	2.4					500
TA-09-S	110	B	3X2 T	0.66	0.026	305	9.0	Aramid	240	n/a	n/a	6.3	156	4.6	Aramid	240	n/a	n/a	6.0	149	4.4					
Hybrids and other 0°/90°																										
TN-05-P	110	B	PW	0.31	0.012	184	5.4	Aramid	158	n/a	n/a	5.0	80	2.4	Carbon 3K	200	n/a	n/a	5.0	103	3.0					
TN-07-T	110	B	2X2 T	0.43	0.017	238	7.0	Aramid	158	Carbon 3K	200	6.4	119	3.5	Aramid	158	Carbon 3K	200	6.4	119	3.5					
TH-09-N	110	B	NCS	0.61	0.024	288	8.5	E-Glass	275	Polyester	16.66	5.5	166	4.9	Aramid	158	Polyester	16.66	7.2	122	3.6					
TP-04-P	110	A	PW	0.30	0.012	160	4.4	Color P.	110	n/a	n/a	6.7	67	2.0	Color P.	110	n/a	n/a	6.7	83	2.4					
TP-05-P	110	A	PW	0.30	0.012	176	5.2	Polyester	110	n/a	n/a	8.0	88	2.6	Polyester	110	n/a	n/a	7.6	88	2.6					
TR-08-P	110	A	2X1 T	0.36	0.014	270	8.0	Polyester	111	n/a	n/a	9.2	103	3.1	E-Glass	330	n/a	n/a	4.8	166	4.9					
TR-16-N	80	A	NCS	0.84	0.033	523	15.4	E-Glass	735	Polyester	16.66	3.1	224	6.6	E-Glass	330	Color P.	110	6.5	299	8.8					
TT-04-P	110	B	PW	0.28	0.011	145	4.3	Polyester	110	n/a	n/a	4.5	40	1.2	Carbon 3K	200	n/a	n/a	4.7	105	3.1					
TT-05-P	110	B	PW	0.43	0.017	195	5.8	Polyester	110	n/a	n/a	8.9	77	2.3	Carbon 3K	200	n/a	n/a	4.7	118	3.5					
TH-12-R	110	B	3X1 T	0.76	0.030	390	11.5	Aramid	316	E-Glass	275	4.4	193	5.7	Aramid	316	E-Glass	735	4.5	188	5.5					
TH-20-E	110	B	3X2 T Double	1.40	0.055	675	19.9	Aramid	316	E-Glass	275	7.6	337	9.9	Aramid	316	E-Glass	275	8.0	338	10.0					
TH-38-E	55	B	3X2 T Double	2.20	0.087	1288	38.0	Aramid	316	E-Glass	1100	7.1	640	18.9	Aramid	632	E-Glass	1100	7.0	648	19.1					
Resin compatibility:			A Polyester, Vinylester, Epoxy B Vinylester, Epoxy					Weaves:			NCS No Crimp Structure PW Plain Weave 2X1 T 2X1 Twill 2X2 T 2X2 Twill 3X1 T 3X1 Twill 3X2 T 3X2 Twill															
Notes: All values may vary by ± 10%																										
Jun-06																										

Jun-06



jb martin
Texitek Division

	English Unit	Conversion	Metric Result		Metric Unit	Conversion	English Result
Areal Weight	oz/yd ²	X 33.9057	= g/m ²		g/m ²	X 0.0295	= oz/yd ²
Density	lb/in ³	X 27.6799	= g/cm ³		g/cm ³	X 0.0361	= lb/in ³
Length	inch	X 25.40	= millimeter		millimeter	X 0.03937	= inch
	inch	X 2.54	= centimeter		centimeter	X 0.3937	= inch
	foot	X 0.3048	= meter		meter	X 3.2808	= foot
	yard	X 0.9144	= meter		meter	X 1.0936	= yard
Mass	ounce	X 28.3495	= gram		gram	X 0.0353	= ounce
	pound	X 0.4536	= kilogram		kilogram	X 2.2046	= pound
Surface	inch ²	X 6.45	= cm ²		cm ²	X 0.1550	= inch ²
	foot ²	X 0.0929	= meter ²		meter ²	X 10.764	= foot ²
	yard ²	X 0.8361	= meter ²		meter ²	X 1.1960	= yard ²
Volume	inch ³	X 16.3871	= cm ³		cm ³	X 0.0610	= inch ³
	foot ³	X 0.0283	= meter ³		meter ³	X 35.3147	= foot ³
	yard ³	X 0.7646	= meter ³		meter ³	X 1.3080	= yard ³
Yarn Num.	4 464 500	/ yards/lb.	= denier		4 464 500	/ denier	= yards/lb.
	496 055	/ yards/lb.	= tex		496 055	/ tex	= yards/lb.
	4 960 550	/ yards/lb.	= decitex		tex	X 9.0	= denier
					tex	X 10.0	= decitex



jb martin

445 St-Jacques
St-Jean-sur-Richelieu
Quebec, Canada J3B 2M1
Tel. : (450) 346-6853 (800) 363-9275
Fax : (450) 347-4910
E-mail : texitek@jbmartin.ca

Fiber Properties

	Tensile Strength ksi	Tensile Modulus msi	Strain to Failure %	Density kg/l
E Glass	420	10.5	4.4	2.6
S2 Glass	665	12.4	5.2	2.5
Aramid "high modulus" (ex: Kevlar® 49)	525	18.0	2.4	1.44
Aramid "high resistance" (ex: Kevlar® 29)	424	10.2	3.6	1.44
Carbon "high resistance"				
T300	512	33.4	1.5	1.8
TR30S	640	34.0	1.9	1.8
TC35	580	35.0	1.6	1.8
T700	711	33.4	2.1	1.8
T800	796	42.7	1.9	1.8

Those properties are for the material without resin.

Industrial disclaimer

Those properties are calculated values and the only purpose is to make comparison of different material.

Those values are calculated on uni-directional yarns (100% of the material in the traction direction).

Properties in compression or shearing are not proportional to those in traction.

The properties of a composite structure will be influence by:

- The architecture of the fabric (fiber alignment, % of fiber in 0°, 90°, 45°)
- The resin used (Epoxy, Vinylester, Polyester, ...)
- The sizing of the fiber
- The fiber/resin ratio
- The molding process
- Etc.

Rev02 July 2006

A.4 Tissu satin 5 carbone style 4540 poudré époxy



TECHNICAL DATA SHEET <i>Fiche technique</i>		DATE : 20/04/2012									
		Number : 1349									
		Indice : 2									
STYLE 4540 <i>Reference</i>											
FINISH <i>Traitement</i> F5953											
POWDER TYPE <i>Nature de la poudre</i> Epoxy on two sides <i>(Epoxy deux faces)</i>											
COMPOSITION Norme ISO 7211-2 <table> <tr> <th></th><th>WARP <i>chaîne</i></th><th>WEFT <i>trame</i></th></tr> <tr> <td>YARN <i>Fils</i></td><td>TENAX HTA40 E13 6K</td><td>TENAX HTA40 E13 6K</td></tr> <tr> <td>COUNT / CM <i>Nombre de fils/cm</i></td><td>4.6 ± 0.1</td><td>4.6 ± 0.1</td></tr> </table>				WARP <i>chaîne</i>	WEFT <i>trame</i>	YARN <i>Fils</i>	TENAX HTA40 E13 6K	TENAX HTA40 E13 6K	COUNT / CM <i>Nombre de fils/cm</i>	4.6 ± 0.1	4.6 ± 0.1
	WARP <i>chaîne</i>	WEFT <i>trame</i>									
YARN <i>Fils</i>	TENAX HTA40 E13 6K	TENAX HTA40 E13 6K									
COUNT / CM <i>Nombre de fils/cm</i>	4.6 ± 0.1	4.6 ± 0.1									
WEAVE <i>Armure</i> 5H SATIN <i>(Satin de 5)</i>											
FABRIC WEIGHT (g/m²) <i>Masse surfacique</i> Norme ISO 3374 380 ± 19											
POWDER WEIGHT (g/m²) <i>Poudre déposée</i> Norme ISO 3374 24 ± 6											
TOTAL WEIGHT (g/m²) <i>Masse surfacique totale</i> Norme ISO 3374 404 ± 25											
The informations contained in this specification is based on our current experience, values quoted are given for guidance purpose only . PORCHER INDUSTRIES reserve themselves the right to proceed to any modification aiming to improve the quality of their products . Les renseignements de cette fiche technique reposent sur notre experience actuelle , les valeurs indiquées sont données à titre indicatif . Le GROUPE PORCHER INDUSTRIES - DIVISION VERRE EUROPE se reserve le droit d'apporter à ces produits toutes modifications tendant à améliorer leur qualité .											

This document belongs exclusively to PORCHER INDUSTRIES Group-Glass Division-the reproduction is strictly forbidden.
Ce document est la propriété exclusive du GROUPE PORCHER INDUSTRIES - DIVISION VERRE EUROPE : sa reproduction est strictement interdite.

Annexe B

Essais préliminaires

B.1 Essais préliminaires, friction

Théoriquement, plus l'essai avance dans le temps, plus les courbes devraient se rapprocher de zéro. Afin de déterminer pourquoi les courbes ne revenaient pas à zéro, plusieurs essais préliminaires ont été exécutés.

Tout d'abord, des essais avec des feuilles de papier ont été effectués afin de valider si les irrégularités dans les courbes étaient dues à l'architecture des tissus.

Ensuite, des essais avec un poids supplémentaire ont été effectués afin d'augmenter la force de friction et ainsi permettre de diminuer les bruits et erreurs de l'outil de caractérisation. Plusieurs poids ont été testés afin de choisir celui correspondant le mieux aux essais de friction.

Aussi, des essais ont été effectués avec un pli supplémentaire du côté du bloc mobile, permettant de mettre le pli tiré au même niveau que les autres plis.

La répartition du poids avec seulement trois plis n'était pas suffisamment précise due à un phénomène de pincement lorsque le test se déroulait, ce qui générait des erreurs dans l'essai.

Pour résoudre le problème de pincement, des plis supplémentaires ont été utilisés du côté du bloc mobile sans pour autant augmenter la force de friction. Ceci a permis d'augmenter l'épaisseur de tissus où il y a la friction et ainsi diminuer les erreurs. La séquence d'empilement inclut 1 pli du côté fixe, 2 plis du côté mobile et 1 autre pli du côté fixe.

La Figure B.1 montre les résultats des essais effectués afin d'obtenir un réglage adéquat de l'outil pour les essais de friction.

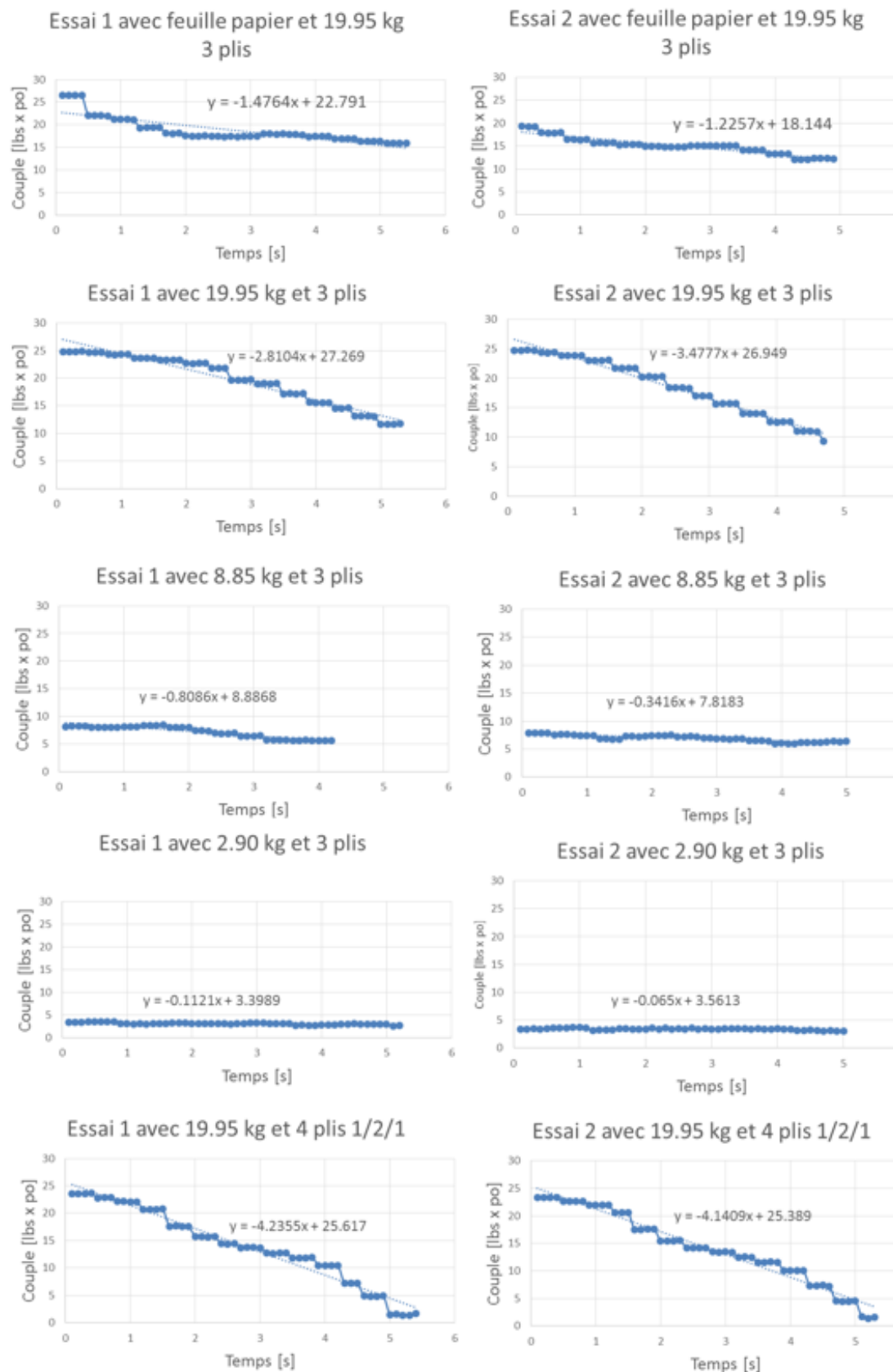
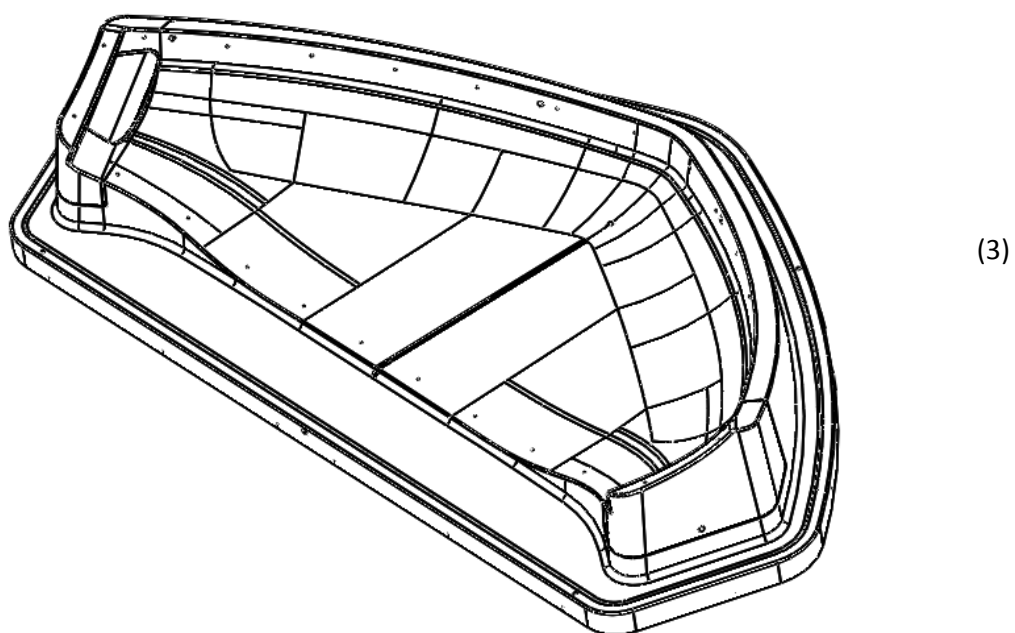
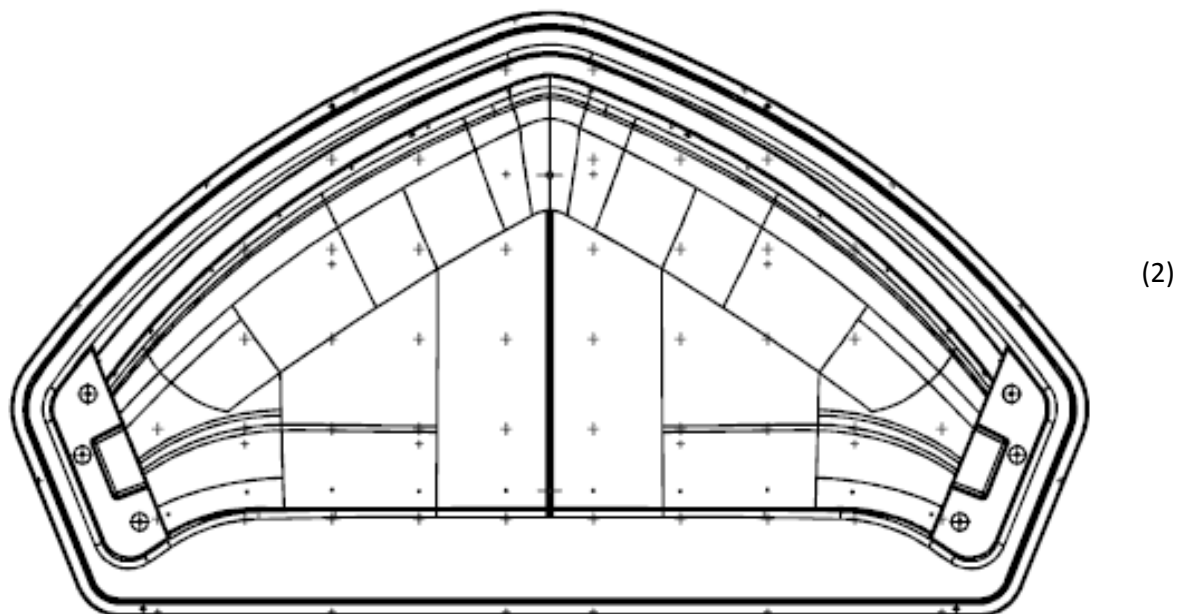
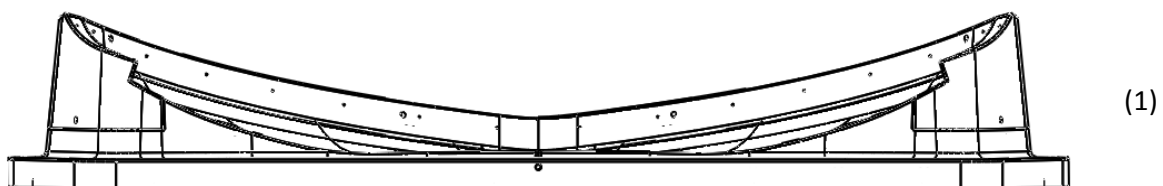


FIGURE B.1 – Essais pour le réglage des paramètres pour la friction

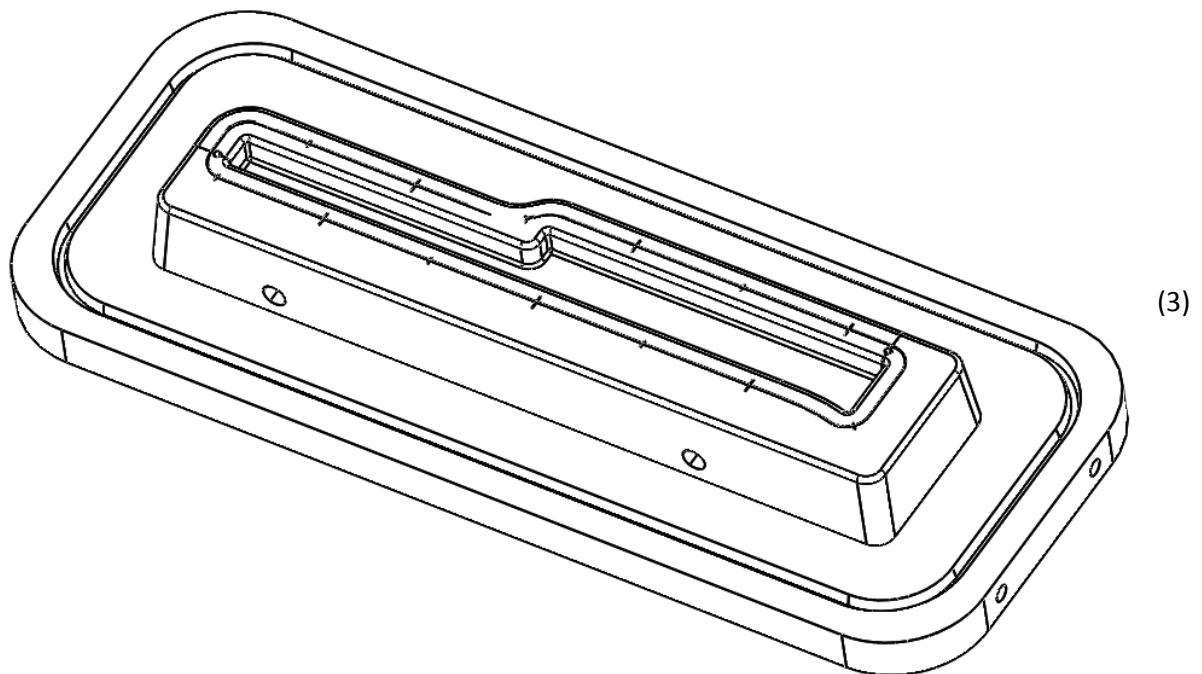
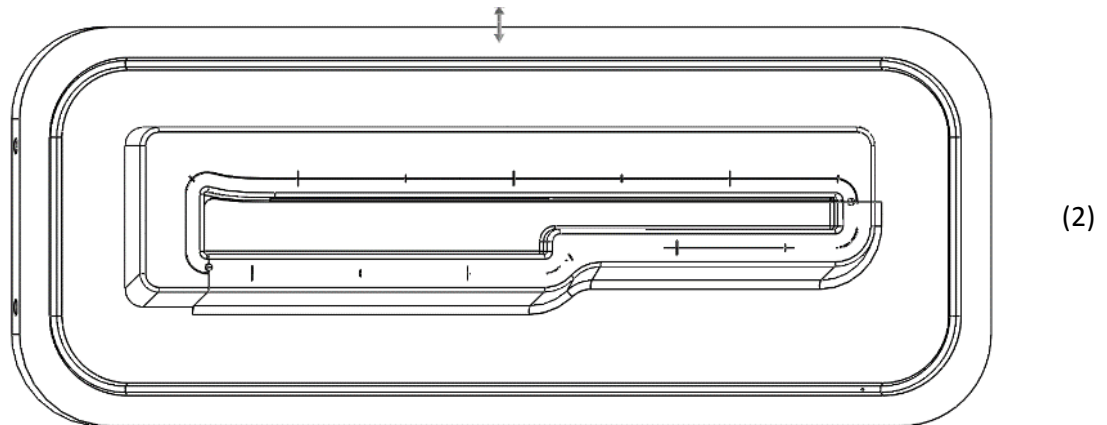
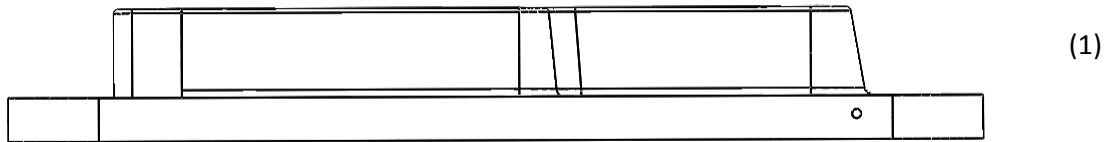
Annexe C

Détails des moules chez Hutchinson

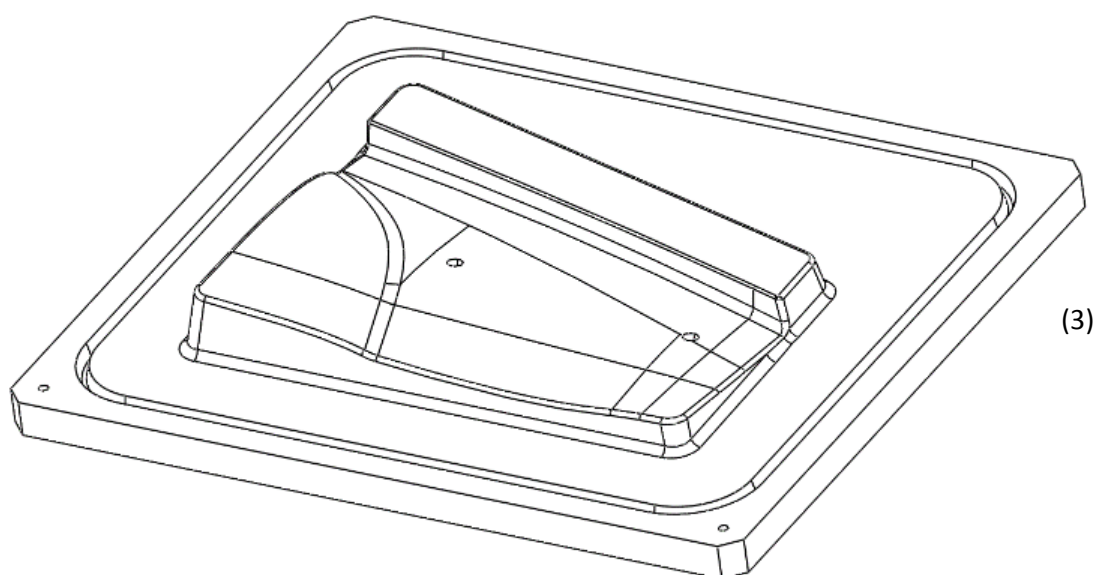
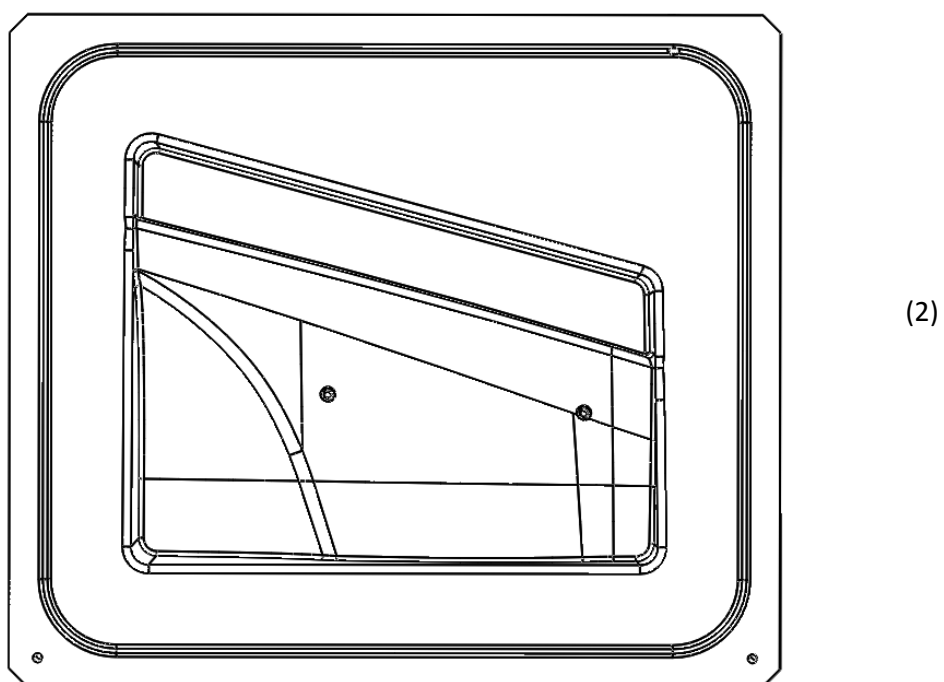
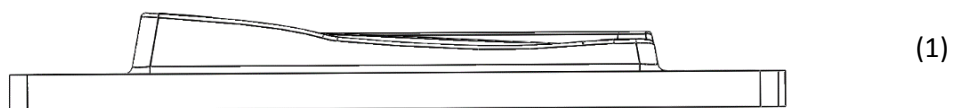
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04599



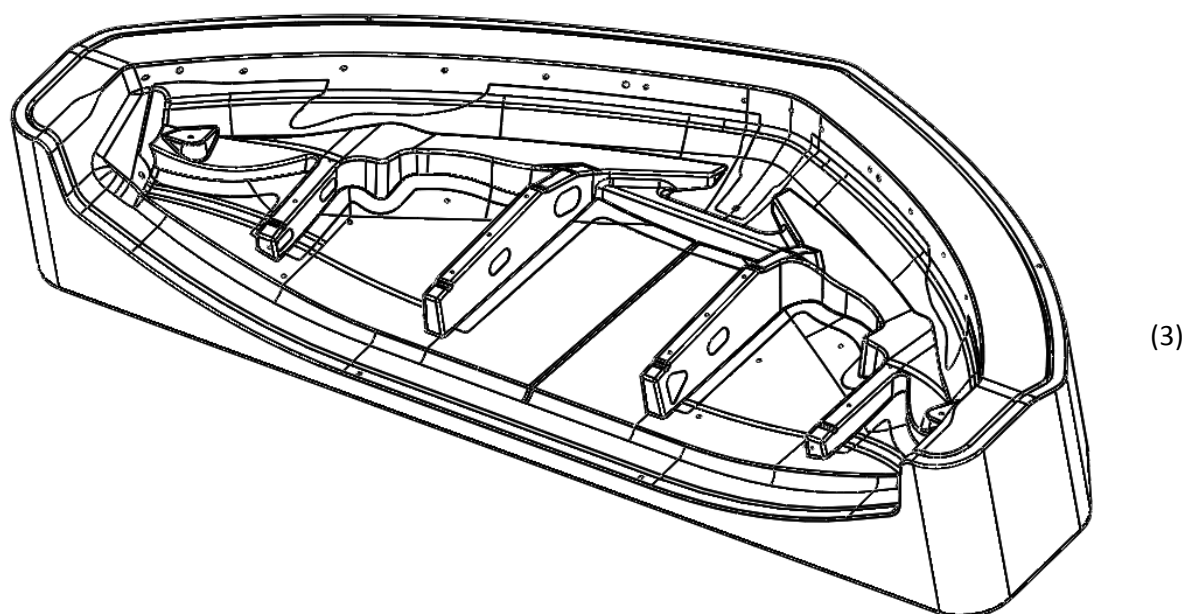
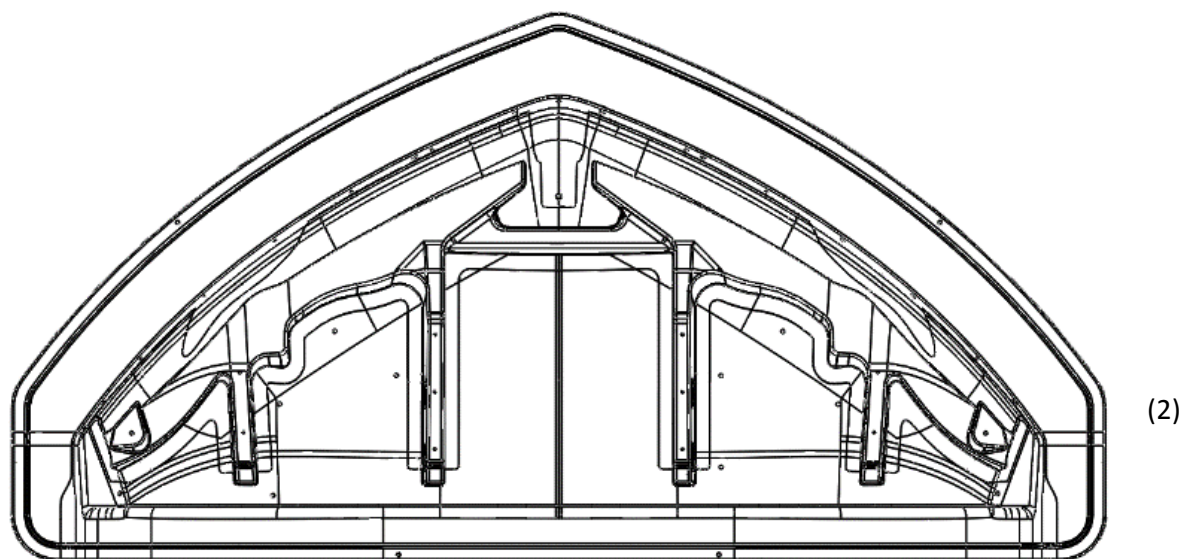
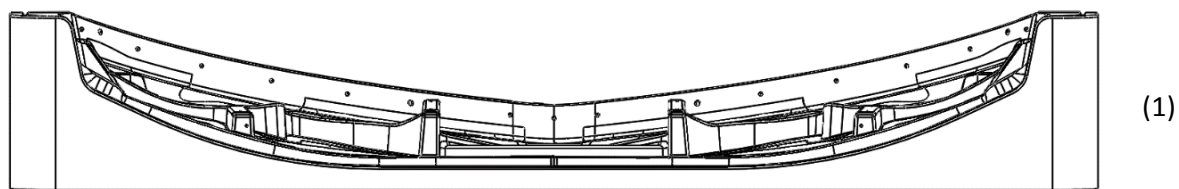
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04624



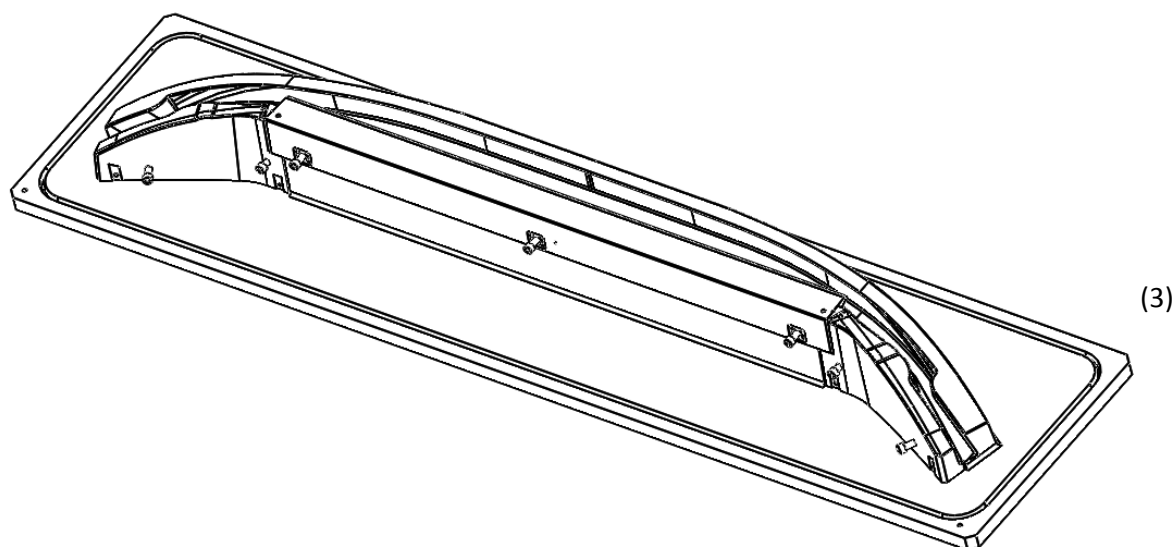
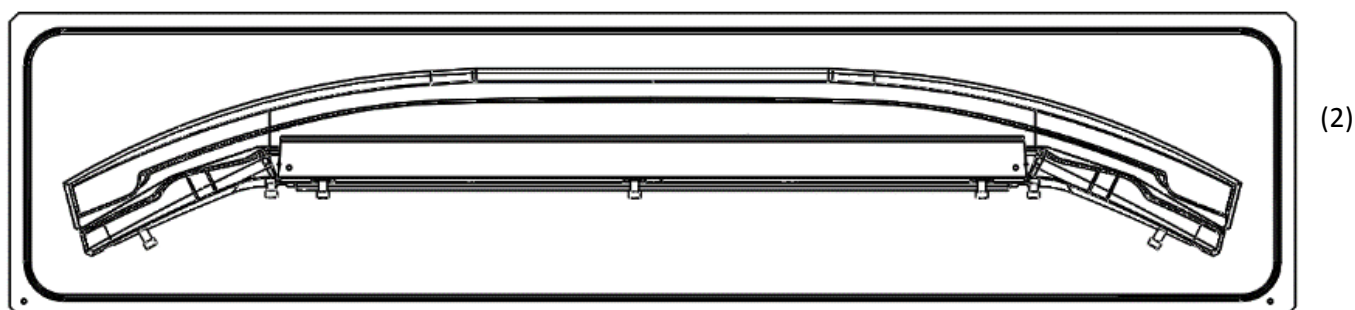
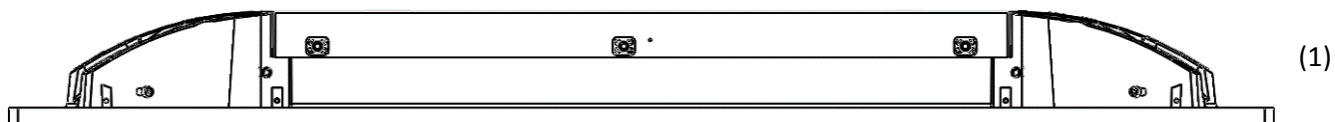
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04630



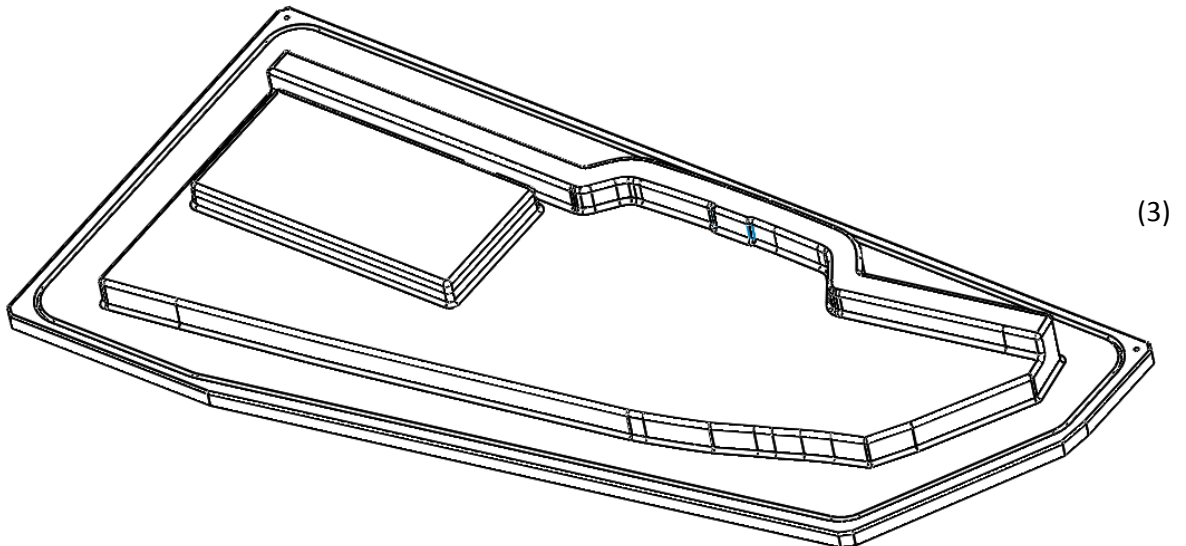
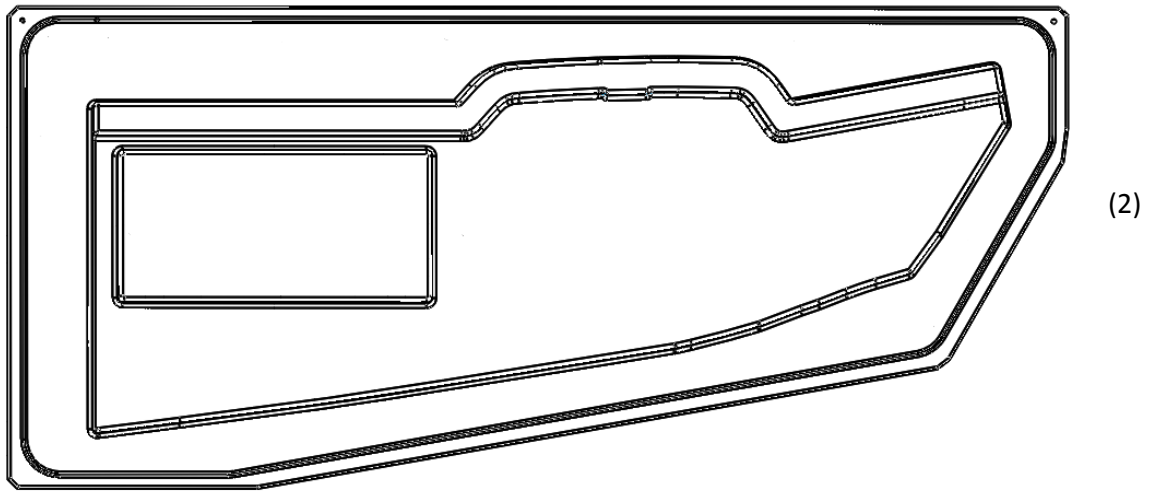
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04603



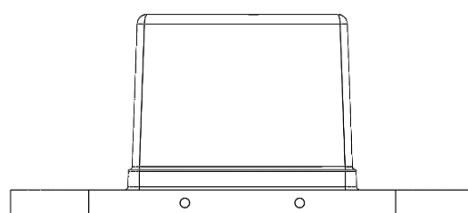
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04607



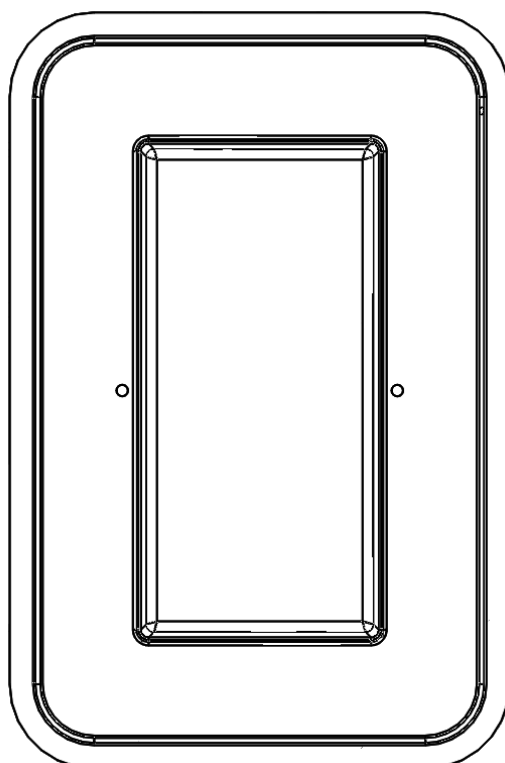
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04610



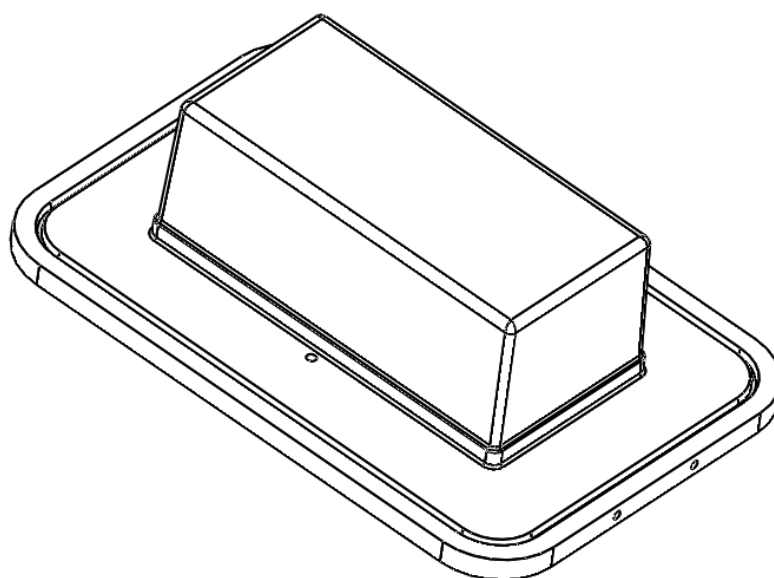
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04614



(1)

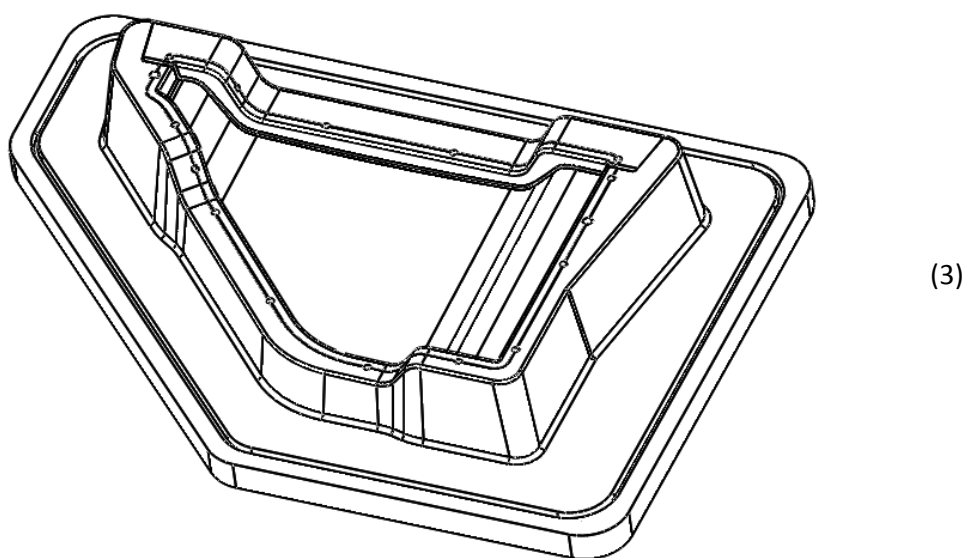
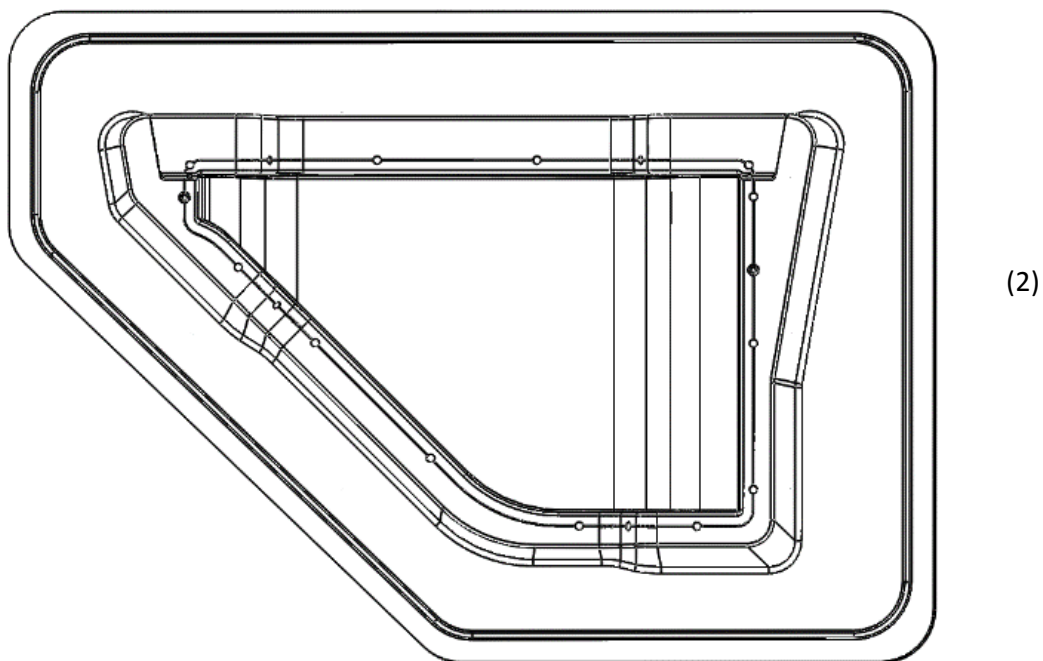
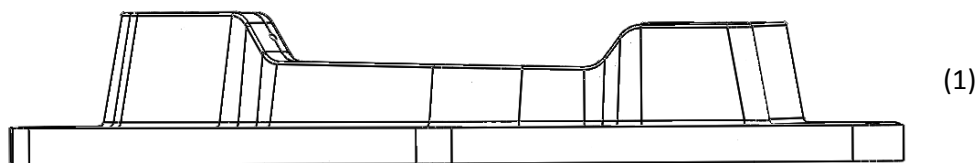


(2)

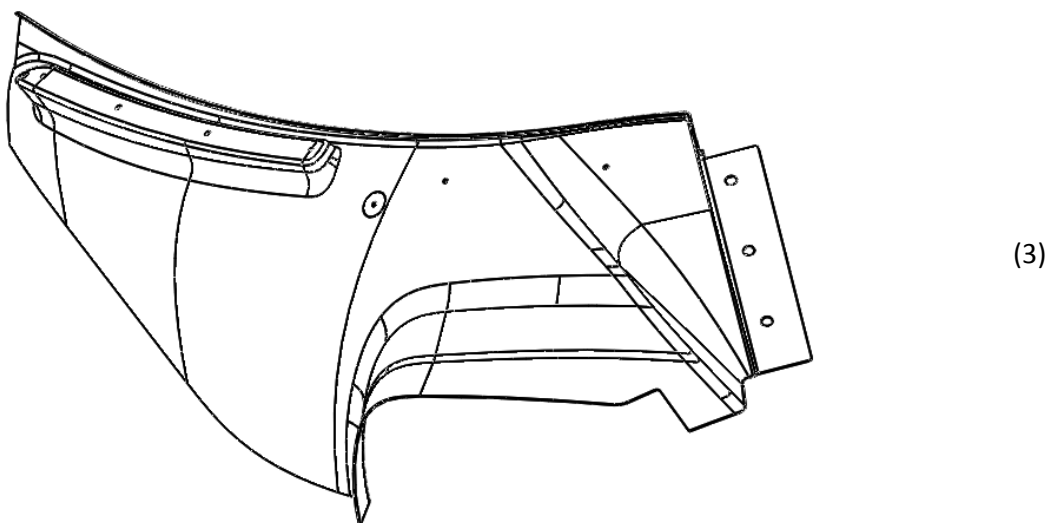
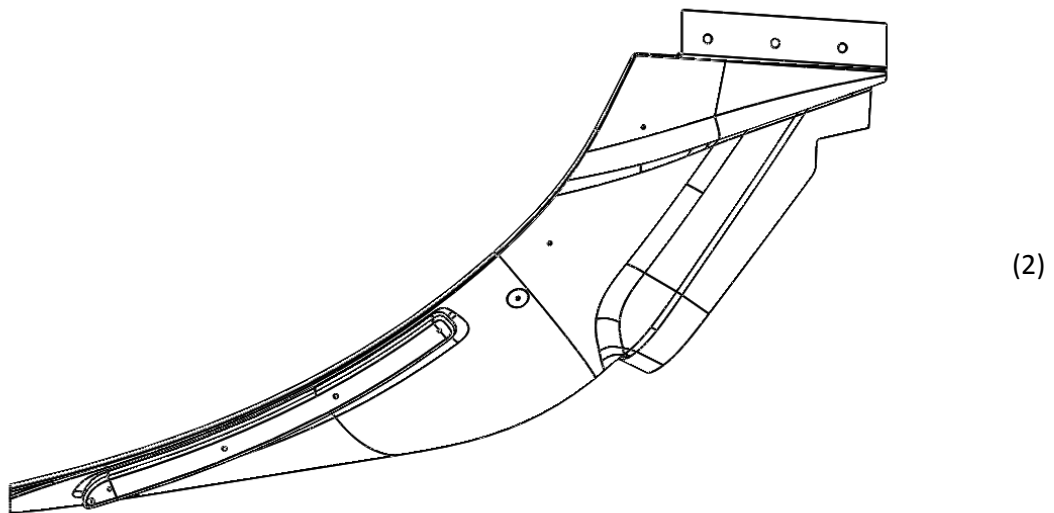
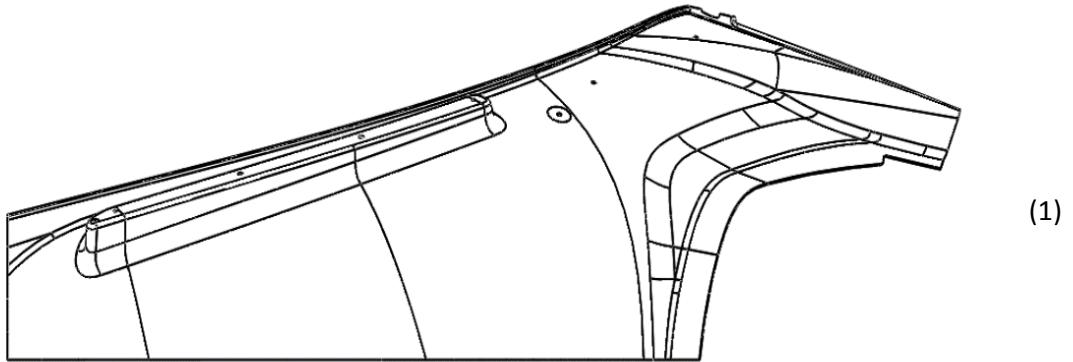


(3)

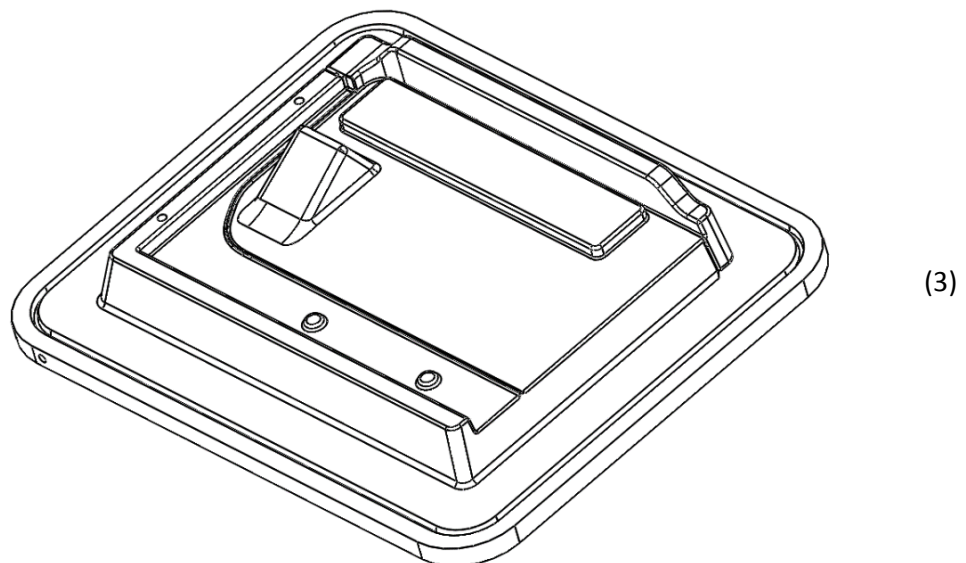
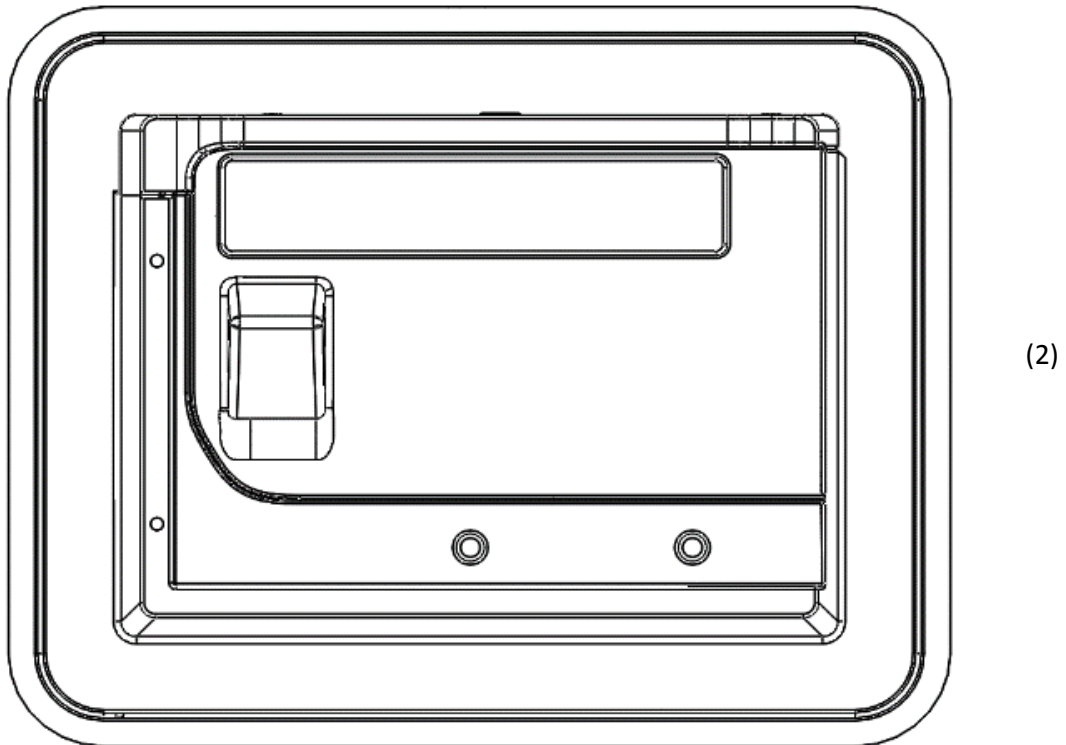
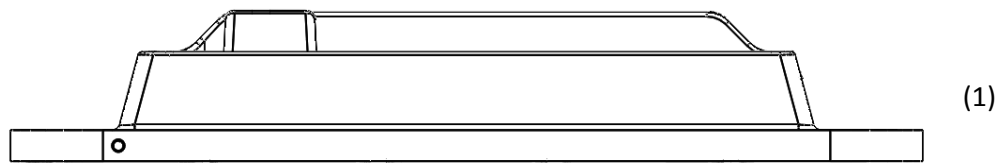
Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04620



Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04632



Vues face (1), dessus (2) et Isométrique (3) du moule M04639



Annexe D

Décomposition des moules chez Hutchinson

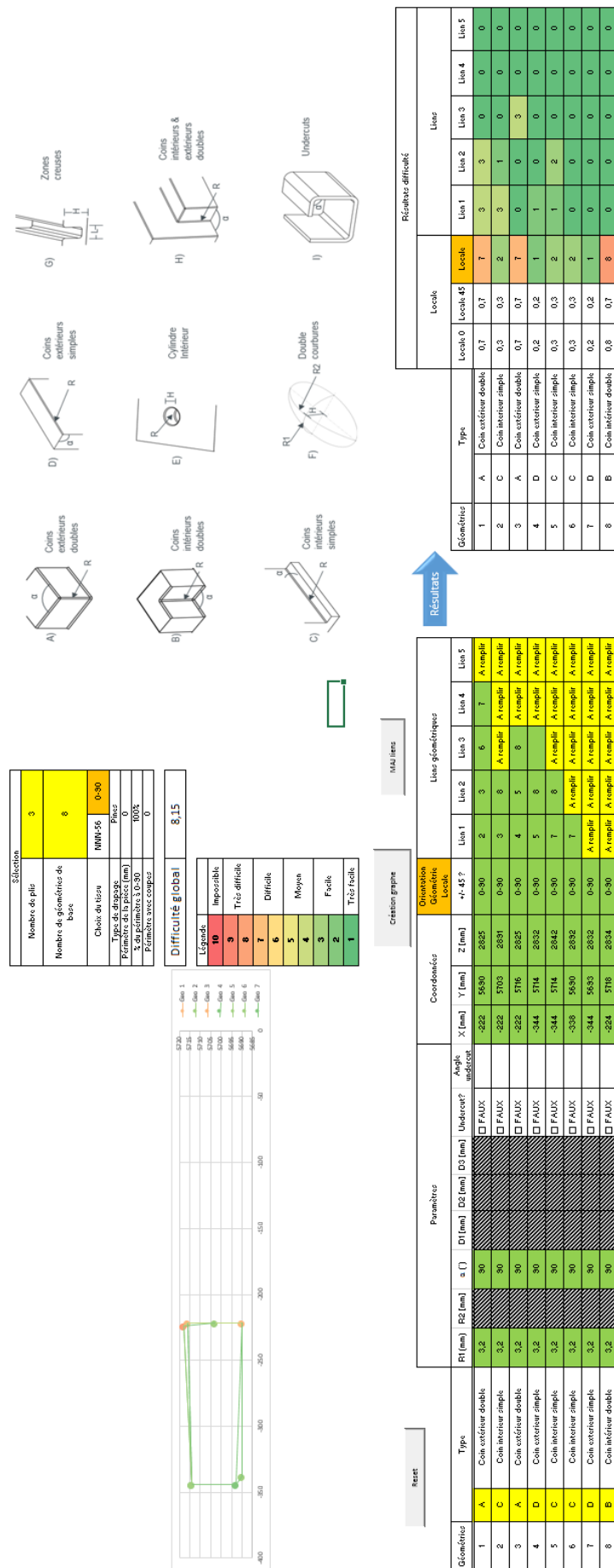
Calcul outil prédictif moule M04599



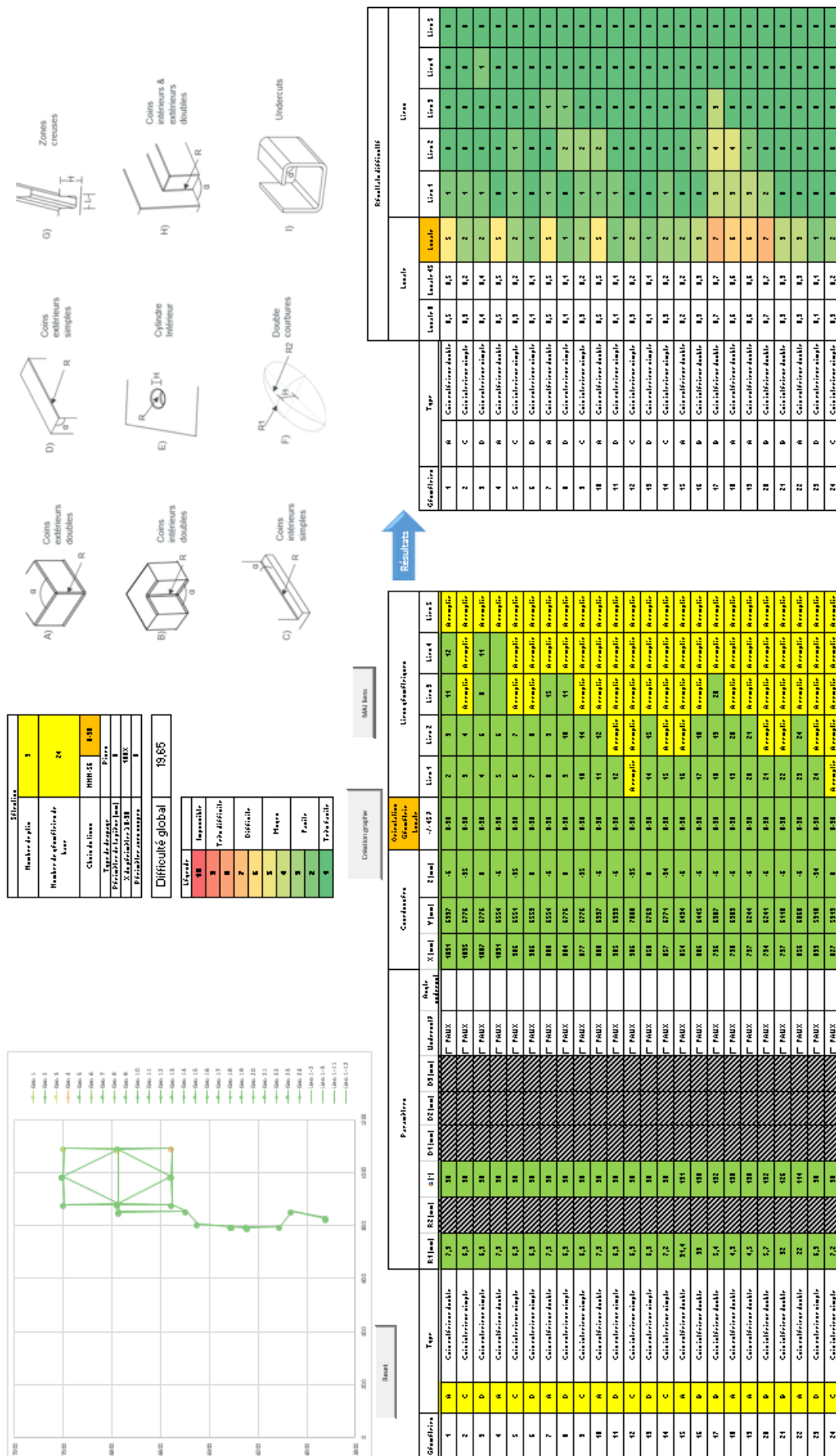
Calcul outil prédictif moule M04603



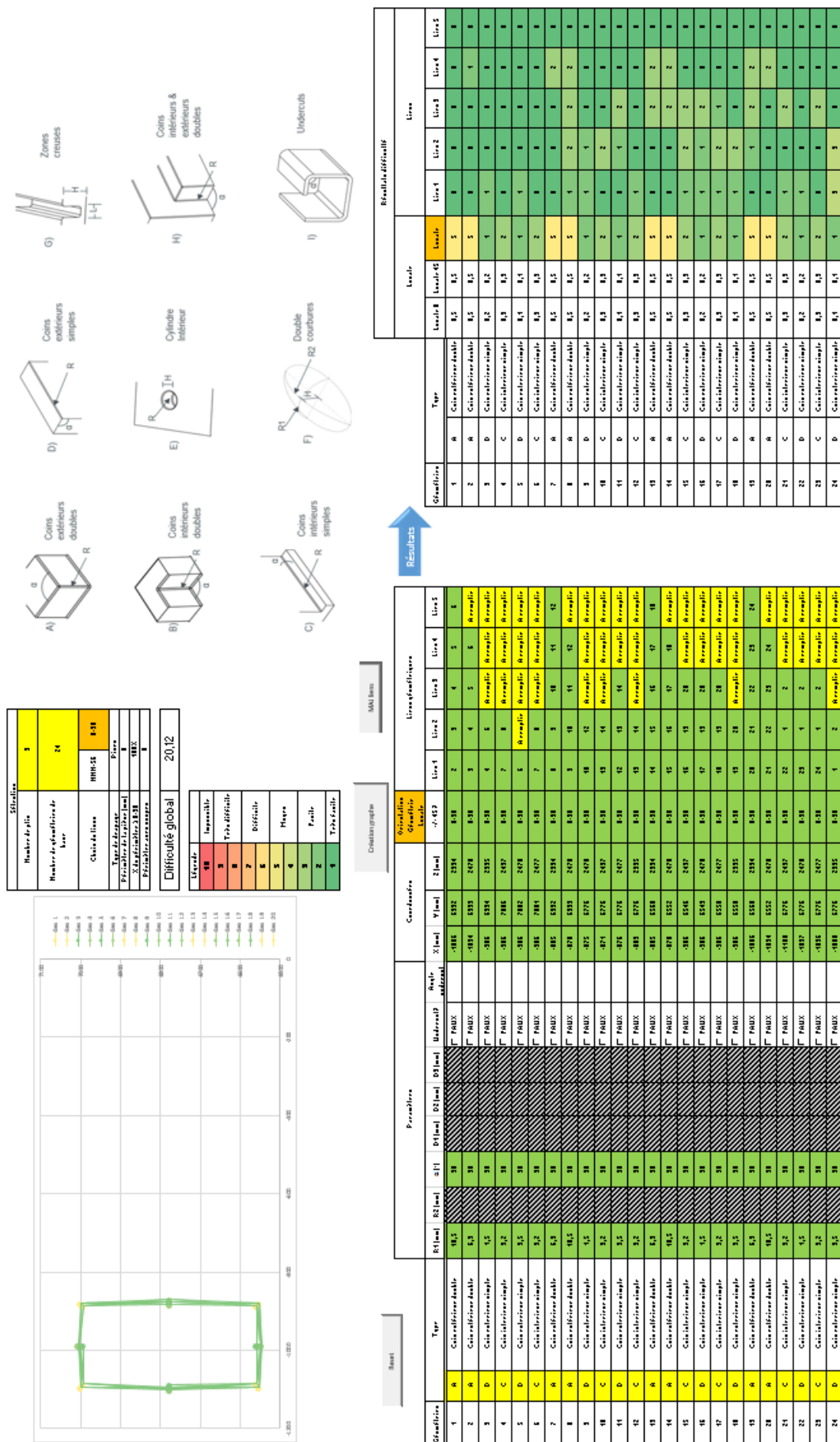
Calcul outil prédictif moule M04604



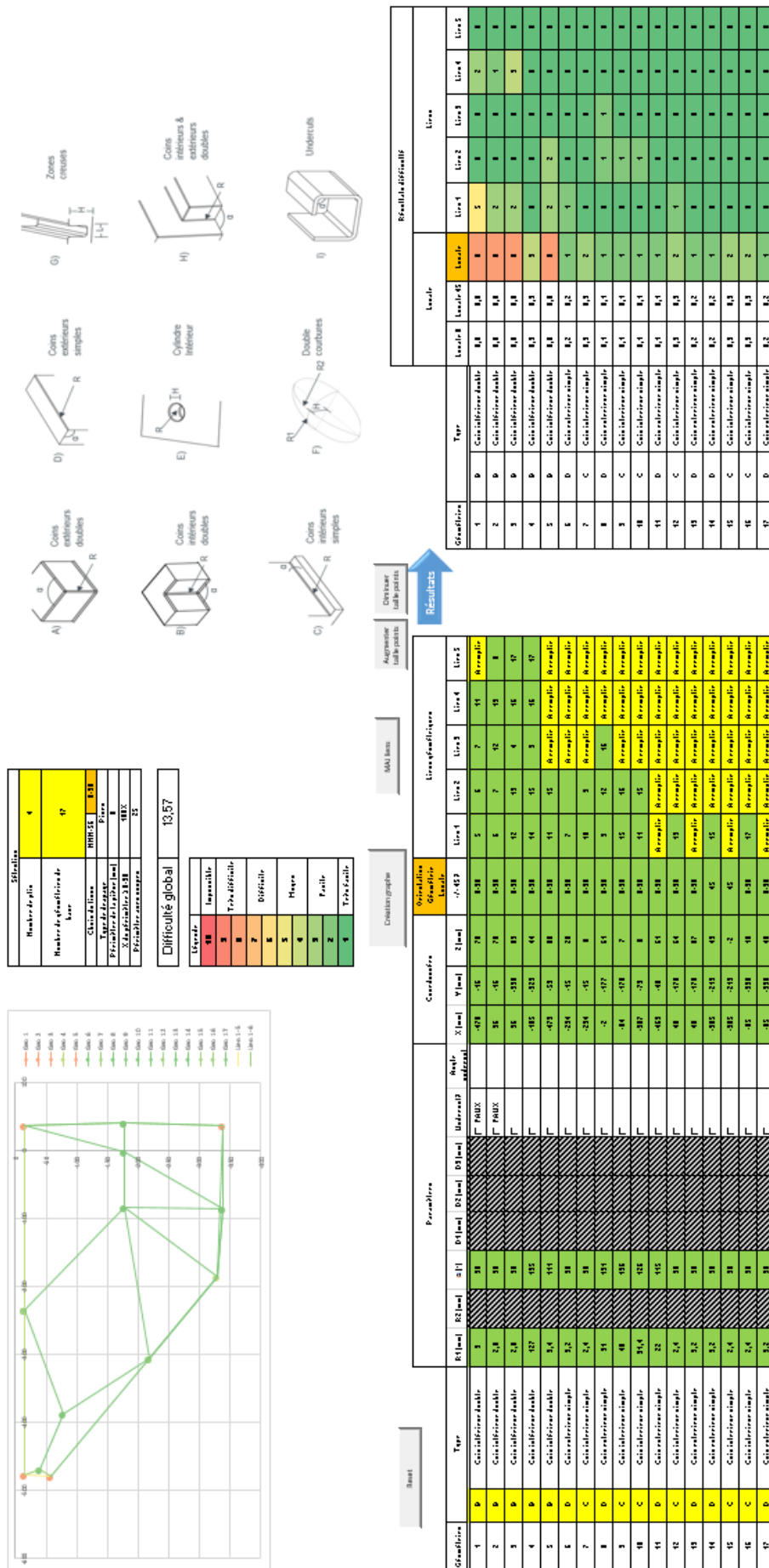
Calcul outil prédictif moule M04610



Calcul outil prédictif moule M04614



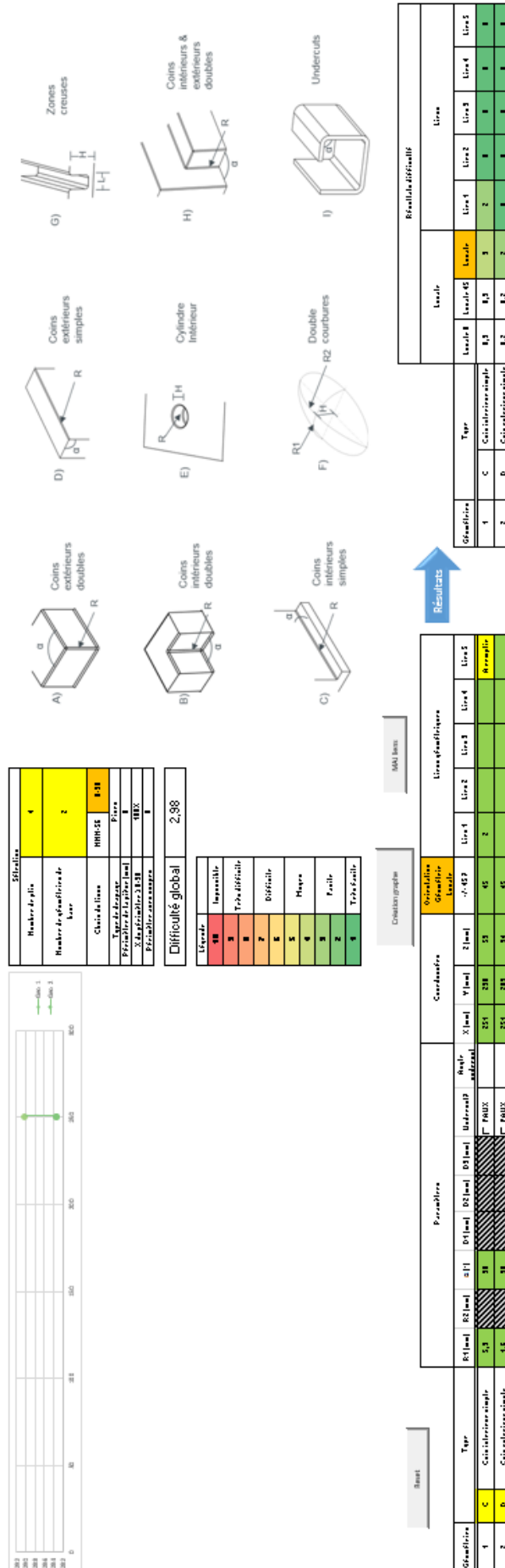
Calcul outil prédictif moule M04620

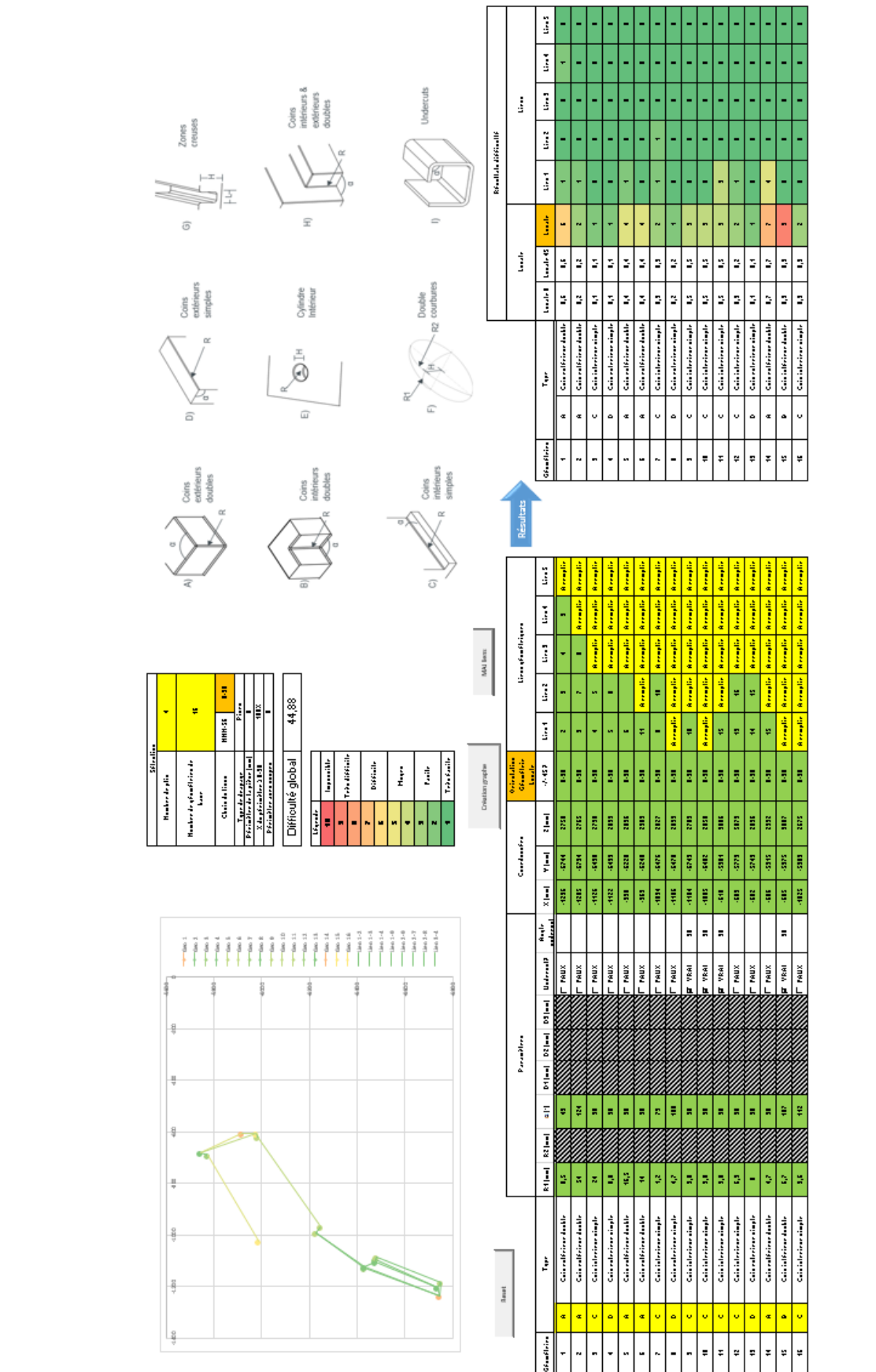


Calcul outil prédictif moule M04624



Calcul outil prédictif moule M04630





Annexe E

Programmation Macro

E.1 Bouton pour réinitialisation

```

Module1 - 1

Sub Reset()
    Sheets("Outil Prédictif").Select

    'Copie de la formule pour les géométries
    Range("D30").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
    "=IF(RC1>R4C14, "A remplir", IF(INDEX(R83C:R93C,MATCH(RC2,R83C:R93C,0))<>0, INDEX(R83C:R93C,MATCH(RC2,R83C:R93C,0)), ""))"
    Range("D30").Copy
    Range("D30:I79").PasteSpecial

    'Effacement des liens géométriques (pas de formule ou de texte à la place)
    Range("P30:T79").ClearContents
    Range("P30").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "A remplir"
    Range("P30").Copy
    Range("P30:T79").PasteSpecial

    'Copie du texte pour les coordonnées
    Range("L30").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "A remplir"
    Range("L30").Copy
    Range("L30:O79").PasteSpecial

    'Modification des listes déroulantes pour les liens
    ligne_debut = 30
    nb_geom = Cells(4, 16).value
    colonne_lien1 = 16
    Ligne_fin = ligne_debut + nb_geom
    colonne_fin = 20

    Set userRange = Range(Cells(ligne_debut, 1), Cells(Ligne_fin - 1, 1))

    Sheets("Outil prédictif").Activate
    Range("P30:T79").Select
    With Selection.Validation
        .Delete
        .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
        xlBetween, Formula1:="=" & userRange.Address
        .IgnoreBlank = True
        .InCellDropdown = True
        .InputTitle = ""
        .ErrorTitle = ""
        .InputMessage = ""
        .ErrorMessage = ""
        .ShowInput = True
        .ShowError = True
    End With

    'Suppression du graphique s'il existe
    Dim Grph As ChartObject
    On Error Resume Next
    Set Grph = Sheets("Outil Prédictif").ChartObjects("Illustrations")
    If Not Grph Is Nothing Then ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations").Activate ' Si le graphe
    illustrations existe dans la feuille outil prédictif, alors il est supprimé
    ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations").Select
    ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations").Delete

    'Dim Grph_copy As ChartObject
    ' On Error Resume Next
    ' Set Grph_copy = Sheets("Outil Prédictif").ChartObjects("Illustrations_copy")
    ' If Not Grph_copy Is Nothing Then ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations_copy").Activate ' S
    i le graphe illustrations_copy existe dans la feuille outil prédictif, alors il est supprimé
    ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations_copy").Select
    ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations_copy").Delete

    Application.DisplayAlerts = False
    On Error Resume Next
    Set feuil_graph = Sheets("Graphique")
    If Not feuil_graph Is Nothing Then Sheets("Graphique").Activate
    Sheets("Graphique").Select
    Sheets("Graphique").Delete
End Sub

```

E.2 Calcul des difficultés

```

Module5 - 1

Sub Calcul_Difficulte()

'Nom des feuilles de calculs
Feuille_calcul = "Outil Prédicatif"
Feuille_geo = "Tableau Géométries de base"

'Liste des parametres
ligne_debut_calc = 30
s feuille_calcul
colonne_debut_calc = 34
de difficultés dans feuille_calcul
nb_geom = Cells(4, 16).value
Colonne_debut_param = 4
ans feuille_calcul
Nb_param_max = 6
ble
Colonne_fin_param = Colonne_debut_param + Nb_param_max - 1
Nb_diff = 5
aillement, flexion, facteur K, ...) dans Feuille_geo
colonne_nom_geo = 1
uille_geo
ligne_debut_geo = 4
ille_geo
max_geo = 50
ue dans la Feuille_calcul

'Hypothèses
'1-Le tableau des géométries est classé dans l'ordre (parammètre 1, puis 2) et chaque paramètre dans l
'ordre croissant
'Exemple
'0 40 0 25
'0 40 25 50
'40 80 0 25
'40 80 25 50
'2-La valeur maximale de chaque paramètre ne peut pas être dépassée

'Efface les valeurs de difficulté (reset)
Worksheets(Feuille_calcul).Range(Cells(ligne_debut_calc, colonne_debut_calc), Cells(ligne_debut_calc +
max_geo - 1, colonne_debut_calc + Nb_diff - 1)).ClearContents

'Debut programme
For geo = 1 To nb_geom

'Recuperation du type de geometrie
Nom_geo = Worksheets(Feuille_calcul).Cells(ligne_debut_calc + geo - 1, 2)

'Recuperation des parametres
Dim param() As Variant
ReDim param(1 To Nb_param_max)
nb_param = 1
For colonne = Colonne_debut_param To Colonne_fin_param
If Worksheets(Feuille_calcul).Cells(ligne_debut_calc + geo - 1, colonne) = "A remplir" Then
Exit Sub
End If
If IsNumeric(Worksheets(Feuille_calcul).Cells(ligne_debut_calc + geo - 1, colonne)) Then
param(colonne - Colonne_debut_param + 1) = Worksheets(Feuille_calcul).Cells(ligne_debut_ca
lc + geo - 1, colonne)
End If
Next colonne

'Recherche des lignes min et max de la géométrie en cours
ligne_debut = ligne_debut_geo
While Worksheets(Feuille_geo).Cells(ligne_debut, colonne_nom_geo) <> Nom_geo
ligne_debut = ligne_debut + 1
Wend
Ligne_fin = ligne_debut
While Worksheets(Feuille_geo).Cells(Ligne_fin, colonne_nom_geo) = Nom_geo
Ligne_fin = Ligne_fin + 1
Wend

```

E.3 Bouton pour les liens

```
Module6 - 1

Sub MAJ_liens()

    ligne_debut = 30
    nb_geom = Cells(4, 16).value
    colonne_lien1 = 16
    Ligne_fin = ligne_debut + nb_geom
    colonne_fin = 20

    'Sheets("Calcul Outil").Activate
    'Sheets("Calcul Outil").Select
    Set userRange = Range(Cells(ligne_debut, 1), Cells(Ligne_fin - 1, 1))

    'donnees_liste = Sheets("Calcul Outil").Range(Cells(1, 1), Cells(30, 1)).value

    Sheets("Outil prédictif").Activate
    Range("P30:T79").Select
    With Selection.Validation
        .Delete
        .Add Type:=xlValidateList, AlertStyle:=xlValidAlertStop, Operator:= _
        xlBetween, Formula1:="=" & userRange.Address
        .IgnoreBlank = True
        .InCellDropdown = True
        .InputTitle = ""
        .ErrorTitle = ""
        .InputMessage = ""
        .ErrorMessage = ""
        .ShowInput = True
        .ShowError = True
    End With
End Sub
```

E.4 Bouton pour supprimer

```
Module7 - 1  
Sub delete_all_Checkbox()  
Dim cb As Shape  
For Each cb In ActiveSheet.Shapes  
    If cb.Type = msoFormControl Then  
        If cb.FormControlType = xlCheckBox Then cb.Delete  
    End If  
Next  
End Sub
```

E.5 Bouton pour cocher la liaison

```

Module4 - 1

Option Explicit

Sub Insérer_Cases_a_cocher_Liees()
    Dim rngcel As Range
    Dim chkbox As CheckBox
    Dim num_checkbox As Variant
    num_checkbox = 1

    For Each rngcel In Selection
        With rngcel.MergeArea.Cells
            If .Resize(1, 1).Address = rngcel.Address Then
                'Pour ne pas afficher la valeur de la cellule liée, enlevez l'apostrophe en début de ligne suivant
                e :
                '.NumberFormat = ";;;;"
                Set chkbox = ActiveSheet.CheckBoxes.Add(.Left, .Top, .Width, .Height)
                With chkbox
                    'valeur par défaut :
                    .value = 0 'pourrait être True ou False
                    'cellule liée
                    .LinkedCell = rngcel.MergeArea.Cells.Address
                    'Texte de remplacement
                    .Characters.Text = ""
                    'texte
                    '.Text = "Toto" ' ou : .Caption = "Toto"
                    .Name = Str(num_checkbox)
                    'bordure :
                    With .Border
                        'Style de ligne
                        '.LineStyle = xlLineStyleNone 'ou xlContinuous 'ou xlDashDot ou xlDashDotDot ou xlDot
                        'couleur
                        '.ColorIndex = 3 '3 = rouge
                        'épaisseur du trait
                        '.Weight = 4
                    End With
                    'accessibles aussi les propriétés .Locked, .Name, .Enabled etc...
                End With
            End If
        End With
    Next rngcel
End Sub

```


E.6 Illustration du graphique des difficultés

```

Module2 - 1

Sub graph()
'
' graph Macro
'
'Définition de la légende de couleur

color1 = RGB(130, 199, 124)    'vert
color2 = RGB(161, 208, 126)
color3 = RGB(192, 217, 128)
color4 = RGB(223, 226, 130)
color5 = RGB(255, 235, 132)
color6 = RGB(254, 210, 128)
color7 = RGB(253, 184, 123)
color8 = RGB(251, 157, 117)
color9 = RGB(250, 131, 112)
color10 = RGB(248, 105, 107)    'rouge

'Déclaration des variables

'Suppression de l'ancien graphe

Sheets("outil Prédictif").Select

For Each Illustrations In ActiveSheet.ChartObjects
    Illustrations.Delete
Next

Application.DisplayAlerts = False

On Error Resume Next
Set feuil_graph = Sheets("Graphique")
If Not feuil_graph Is Nothing Then Sheets("Graphique").Activate
    Sheets("Graphique").Select
    Sheets("Graphique").Delete

'Déclaration des constantes

colonne = 12                'colonne coordonnées X
ligne_debut = 30            'ligne de la 1ère géométrie
geo_name = 1                ' numéro géométrie
ligne = ligne_debut
colonne_diff = 27           'colonne des difficultés des géométries de base

Range(Cells(ligne_debut, colonne), Cells(ligne_debut + 3, colonne + 1)).Select

'..... Initialisation du graphique - Création de la première série.....

If Cells(ligne, colonne) <> "A remplir" Then
    ActiveSheet.Shapes.AddChart2(240, xlXYScatterLines).Select                'Création
d'un graphique

    ActiveChart.SeriesCollection(1).Name = "Geo " + Str(geo_name)                'Nom de la
série (du point)
    ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = Cells(ligne, colonne).value        'Coordonné
es en X
    ActiveChart.SeriesCollection(1).Values = Cells(ligne, colonne + 1).value      'Coordonné
es en Y
    ActiveChart.SeriesCollection(1).MarkerStyle = xlMarkerStyleCircle            'Marqueur
de point circulaire
    ActiveChart.SeriesCollection(1).MarkerSize = 15                            'Taille du
point

    'Attribution de la couleur à la série - Sélection de la couleur par la valeur de la difficulté

        If Cells(ligne, colonne_diff) <= 1 Then
            ' Cellule correspondant à la difficulté de la géométrie
            ActiveChart.SeriesCollection(1).Format.Fill.ForeColor.RGB = color1
        'Couleur correspondant à la valeur de difficulté 1
            ActiveChart.SeriesCollection(1).Format.Line.ForeColor.RGB = color1

```

E.7 Longueur des coupes

```
Module10 - 1
```

```
Sub long_coupe()
```

```
    longueur_coupe = InputBox("Veuillez entrer la longueur de la coupe")  
    ActiveCell.value = longueur_coupe
```

```
End Sub
```

E.8 Clique pour la longueur des coupes

```
Module9 - 1

Sub Cliquer()

Dim cb As CheckBox

Worksheets("Outil Prédictif").Select

For Each cb In ActiveSheet.CheckBoxes
    rng_case = cb.LinkedCell
    'colonne_case = cb.ControlFormat.LinkedCell.Column
    Range(rng_case).Offset(0, 1).Activate
    If cb.value = 1 Then
        longueur_coupe = InputBox("Veuillez entrer la longueur de la coupe")
        ActiveCell.value = longueur_coupe
    End If
Next cb
End Sub

'Dim cb As CheckBox
'For Each cb In ActiveSheet.CheckBoxes
'    cb.value = True
'Next cb

'Set chkbox = ActiveSheet.CheckBoxes.Count

'For Each chkbox In Worksheet
'    If chkbox.value = True Then
'        chkbox.Address.Offset(1, 0).Select
'        longueur_coupe = MsgBox("Veuillez entrer la longueur de la coupe")
'        Range(ActiveCell).value = longueur_coupe
'    End If
'Next chkbox

'End Sub

'cb.Cell.Address.Offset(1, 0).Select
'    longueur_coupe = MsgBox("Veuillez entrer la longueur de la coupe")
'    Range(ActiveCell).value = longueur_coupe
```

E.9 Tailles des points pour graphique

```
Module3 - 1

Sub diminuer_taille_points()

ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations").Activate
For i = 1 To ActiveChart.SeriesCollection.Count
    ActiveChart.SeriesCollection(i).Select
    With Selection
        .MarkerStyle = xlMarkerStyleCircle           'Marqueur de point circulaire
        .MarkerSize = 5                               'Taille du point
    End With
Next

End Sub

Sub augmenter_taille_points()

ActiveSheet.ChartObjects("Illustrations").Activate
For i = 1 To ActiveChart.SeriesCollection.Count
    ActiveChart.SeriesCollection(i).Select
    With Selection
        .MarkerStyle = xlMarkerStyleCircle           'Marqueur de point circulaire
        .MarkerSize = 20                             'Taille du point
    End With
Next

End Sub
```

Références

- [1] Fr.wikipedia.org, (2015). Matériaux composites. [online] Available at : http://fr.wikipedia.org/wiki/Materiau_composite [Accessed 25 Jan. 2015] .
- [2] Berthelot, J. (1999). Matériaux Composites. Paris : Tec et Doc
- [3] Zoltek Carbon Fiber, (2015). Panex 35 - Zoltek Carbon Fiber. [online] Available at : <http://zoltek.com/products/panex-35/> [Accessed 24 Jun. 2015] .
- [4] Tohotenaxamerica.com, (2015). Toho Tenax America, Inc.. [online] Available at : <http://www.tohotenaxamerica.com/> [Accessed 23 Jun. 2015] .
- [5] IntroductionToComposites, 2014. Cours donné par Dr. François Robitaille, Université d'Ottawa.
- [6] Robitaille, F. and Gauvin, R. (1999). Compaction of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing. III : Reorganization of the Fiber Network. Polymer Composites.
- [8] Kalpakjian, S., Schmid, S.R., Manufacturing Engineering and Technology, Pearson Prentice Hall, 7th edition, 2012
- [9] J. Cao, R. Akkerman, P. Boise, J. Chen, H.S. Cheng, J. Wigger, T.X. Yu, and B. Zhu. Characterization of mechanical behavior of woven fabrics : Experimental methods and benchmark results. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 39(6) :1037-1053, June 2008.
- [10] U. Mohammed, C. Lekakou, L. Dong, and M.G. Bader. Shear deformation and micromechanics of woven fabrics. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 31(4) :299-308, April 2000
- [11] Clifford, M.J., Long, A.C. and De Luca, P., 2001 “Forming of Engineered Prepregs and Reinforced Thermoplastics”, Materials Society CTMSJ, New Orleans, February

- [12] Simulations of Woven Composite Reinforcement Forming, Philippe Boisse, Université de Lyon, LaMCoS, INSA-Lyon, 69621 France
- [13] Taha.I, Abdin.Y, Ebeid.S, 2013 Comparison of picture frame and Bias-Extension tests for the characterization of shear behavior in natural fibre. *Fibers and Polymers*
- [14] Characterization of mechanical behavior of woven fabrics : Experimental methods and benchmark results J. Cao *, R. Akkerman , P. Boisse ,1, J. Chen , H.S. Cheng , E.F. de Graaf , J.L. Gorczyca , P. Harrison , G. Hivet , J. Launay , W. Lee , L. Liud, S.V. Lomov , A. Long , E. de Luycker , F. Morestin , J. Padvoiskis , X.Q. Peng , J. Sherwood , Tz. Stoilova , X.M. Tao , I. Verpoest , A. Willems , J. Wiggers , T.X. Yu, B. Zhu
- [15] Launay J, Hivet G, Duong AV, Boisse P (2008) Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements. *Compos Sci Technol* 68 : 506–515
- [16] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A Madeo, G. Hivet, et al.. The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and preregs : a review. *International Journal of Materials Forming*, 2016, 20 p. <10.1007/s12289-016-1294-7>. <hal-01313827>
- [17] Experimental Study of Bending Behaviour of Reinforcements E. de Bilbao · D. Soulat · G. Hivet A. Gasser. Published online : 20 March 2009 © Society for Experimental Mechanics 2009
- [18] Drivas, Thanos, and François Robitaille. *Manufacturing Three-Dimensional Carbon-Fibre Preforms For Aerospace Composites*. Ottawa : University of Ottawa, 2014.