



HAL
open science

Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés : Application au blindage de véhicules

Marie Lefebvre

► **To cite this version:**

Marie Lefebvre. Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés : Application au blindage de véhicules. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2011. Français. NNT : 2011VALE0030 . tel-03416137

HAL Id: tel-03416137

<https://uphf.hal.science/tel-03416137>

Submitted on 5 Nov 2021

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

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

2011 VAL 0030



Université
de Valenciennes
et du Hainaut-Cambresis



THESE PRESENTEE A
L'UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU
HAINAUT CAMBRESIS

Numéro d'ordre 11/36

EN VUE DE L'OBTENTION D'UN
DOCTORAT EN MECANIQUE DES
MATERIAUX

PAR
MARIE LEFEBVRE

Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés

Application au blindage de véhicules

Le Mercredi 7 Décembre 2011 devant le jury composé de :

Président	Jean-Jacques Barrau, Professeur Emérite Université Paul Sabatier, France
Rapporteur	Hervé Wagnier, Maître de conférences, HDR, Université de Bordeaux 1, France
Rapporteur	Zoheir Aboura, Professeur, Université de Technologie de Compiègne, France
Examineur	Damien Soulat, Professeur, ENSAIT, France
Examineur	François Boussu, Maître de conférences, ENSAIT, France
Directeur de thèse	Daniel Coutellier, Professeur, ENSIAME, Valenciennes, France
Invité	Daniel Vallee, Ingénieur, NEXTER SYSTEMS, France
Invité	François Barthélémy, Ingénieur, DGA techniques terrestres, France



dépasser les frontières



nexTER



REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à la DGA pour le financement de cette étude. Ce projet est le fruit d'une collaboration entre un grand acteur de la Défense Française et une entreprise leader sur le marché de l'armement. Ce fut une réelle opportunité de travailler sur un tel projet.

Un grand merci à François BARTHELEMY (DGA), pour son aide précieuse dans l'organisation logistique de ce projet mais aussi pour ses conseils avisés, ainsi que Aurélie DEROUX

Merci à Daniel VALLEE (Nexter Systems) qui m'a accompagnée lors de chaque campagne d'essais. Son savoir dans le domaine du blindage métallique, mais aussi composite m'a permis d'enrichir mes connaissances et d'en comprendre les subtilités.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Daniel COUTELLIER, Professeur des Universités à l'UVHC (Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis) et directeur de l'ENSIAME (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur en Informatique, Automatique, Mécanique, Energétique Electronique), pour m'avoir fait confiance et suivie dans cette aventure, mais surtout pour avoir trouvé un compromis idéal dans son encadrement, ce qui m'a permis d'apprendre beaucoup. En effet, merci de m'avoir laissé une autonomie très formatrice autant dans les expérimentations que dans l'organisation du projet, mais aussi d'avoir toujours été présent dans mes moments de questionnement ou de doute

Je tiens à remercier également François BOUSSU, Maître de Conférence à l'ENSAIT (Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles) qui m'a encadrée pour la partie tissage technique, pour ses nombreux conseils, sa compétence, et surtout sa sympathie et sa bienveillance tout au long de la thèse.

J'adresse mes remerciements à Messieurs Hervé WARGNIER (Maître de conférences, HDR, Université de Bordeaux 1) et Zoheir ABOURA (Professeur,

Université de Technologie de Compiègne) pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail de recherche, et à Monsieur Damien SOULAT (Professeur, ENSAIT) d'avoir accepté d'être examinateur et pour l'honneur qu'ils me font de participer au Jury.

Je tiens aussi également à remercier Jean-Jacques BARRAU (Professeur Emérite Université Paul Sabatier) pour avoir accepté la charge de présider la commission d'examen de cette thèse.

J'exprime mes remerciements à l'ensemble du personnel de l'ENSAIT et du GEMTEX, en particulier la « weaving team », Frédéric VEYET, Ingénieur Recherche qui m'a conseillée et aiguillée durant ces trois ans.

Je remercie également les techniciens tissage, Nicolas DUMONT et Tomasz KROMOSKA qui m'ont aidée durant la phase conception des tissus. Leurs conseils et leur réactivité m'ont permis d'avancer tout au long de ces trois années.

Je tiens également à remercier tous les doctorants et les jeunes docteurs, les ingénieurs, les techniciens et les maîtres de conférences avec qui j'ai partagé des moments de convivialité et d'échanges constructifs lors de nos pauses déjeuner. Je remercie donc plus particulièrement Cédric COCHRANE, François RAULT, Aurélie CAYLA, Sabine CHLEBICKI, Benjamin PROVOST, Jean-Vincent RISICATO, Nizar DIDANE, Guillaume LEMORT, et tous ceux que j'aurais pu oublier

Merci à l'Amicale du Personnel (AP ENSAIT) de m'avoir accueillie pendant deux ans au sein de leur organisme. L'organisation d'évènements pour l'ensemble du personnel n'a fait que renforcer nos liens, dans la joie et la bonne humeur.

Merci donc à tout le personnel de l'ENSAIT qui me suit depuis mon entrée en tant qu'étudiante de l'ENSAIT. Plus particulièrement, je tiens à remercier Anne SION et Gilles BARDEL qui m'ont épaulée dans la partie logistique et financière de ce projet.

Pour finir, je tiens à remercier tous mes proches, parents, amis, qui de près comme de loin m'ont soutenue moralement, et qui ont fait preuve de patience et m'ont aidée tout au long de ces trois années. Enfin, je remercie un ange devenu étoile bien trop jeune qui depuis huit années me pousse à aller toujours plus loin.

LISTES DES FIGURES

<i>Figure 1. 1: Formation d'un jet de charge creuse [1]</i>	10
<i>Figure 1. 2: Obus de 120 mm M829 américain avec pénétrateur en uranium appauvri [3]</i>	11
<i>Figure 1. 3: EEI combinant effet de souffle et éclats [1]</i>	12
<i>Figure 1. 4: Dessin de référence pour un FSP [2]</i>	12
<i>Figure 1. 5: Mécanisme d'impact sur un acier type RHA [8]</i>	14
<i>Figure 1. 6: Propagation de l'onde de choc lors de l'impact [8]</i>	14
<i>Figure 1. 7: Illustration de la rupture ductile [8]</i>	15
<i>Figure 1. 8: Illustration de la déformation en forme de pétale de fleur [8]</i>	15
<i>Figure 1. 9: Illustration du phénomène de fissuration et de fragmentation de la plaque [8]</i>	16
<i>Figure 1. 10: Illustration du phénomène de « shear plugging » [8]</i>	16
<i>Figure 1. 11: Illustration du phénomène de délaminage [8]</i>	16
<i>Figure 1. 12: Illustration du phénomène d'érosion [8]</i>	17
<i>Figure 1. 13: Illustration du phénomène d'endommagement de la céramique après un impact</i>	18
<i>Figure 1. 14: 1^{ère} phase d'endommagement du panneau balistique à base de céramique et de matériau composite [8]</i>	18
<i>Figure 1. 15: 2^{ème} phase d'endommagement du panneau balistique à base de céramique et de matériau composite [8]</i>	18
<i>Figure 1. 16: Les principaux types de fibres utilisées dans les renforts composites</i>	20
<i>Figure 1. 17: Architectures de renforts pour matériaux composites [14]</i>	20
<i>Figure 1. 18: Image SEM d'une fibre Dyneema® après l'impact balistique (a) et (b), phénomène de fusion de la fibre (c) et phénomène d'élongation (d)</i>	24
<i>Figure 1. 19: Mécanisme de délaminage : (a) cisaillement transversale, (b) cisaillement flexion</i>	25
<i>Figure 1. 20: Illustration du phénomène d'impact, cas d'un composite verre/époxy (a) $V_e=100\text{m/s}$ et (b) $V_e=158\text{ m/s}$, masse du projectile $m_p=2.8\text{g}$</i>	25
<i>Figure 1. 21: Influence des vitesses d'impact sur l'endommagement du composite [18]</i>	28

<i>Figure 2. 1: Récapitulatif des fibres à hautes performances utilisées principalement dans la protection balistique</i>	39
<i>Figure 2. 2: Illustration de tissus bidimensionnelles types toile, sergé et satin</i>	40
<i>Figure 2. 3: Comparaison entre une sollicitation dans le plan ou en épaisseur pour un stratifié 2D, cas de la résistance à la traction a) b) et de la résistance en compression c)</i>	40
<i>Figure 2. 4: Effet de la vitesse d'impact et de l'énergie d'impact sur les 2D et 3D [15] : cas de la zone d'impact a), de la résistance à la traction b) et compression c)</i>	42
<i>Figure 2. 5: Illustration d'un tissu Interlock, rôle de chaque fils</i>	44
<i>Figure 2. 6: Illustration d'une classification de structures Interlocks [23]</i>	47
<i>Figure 2. 7: Influence du taux de fibre dans la direction en z sur les propriétés de tension des architectures</i>	48
<i>Figure 2. 8: Influence du taux de fibre dans la direction en z sur les propriétés de compression des architectures [14]</i>	48
<i>Figure 2. 9: Influence du taux de fibre dans la direction en z sur les propriétés de cisaillement des architectures [14]</i>	49
<i>Figure 2. 10: Courbe de tension pour des composites 3D aramide (Kevlar) /époxy dans l'épaisseur du tissu</i>	50
<i>Figure 2. 11 : Contrainte de rupture en cisaillement des fils des fils de chaîne (warp) et de trame (weft) en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement [28]</i>	50
<i>Figure 2. 12: Comportement au cisaillement des fils de chaîne (warp direction) et de trame (weft direction) en fonction de la vitesse de cisaillement [24]</i>	51
<i>Figure 2. 13: Courbe résistance à la traction en fonction de la contrainte pour des composites 2D et 3D [14]</i>	51
<i>Figure 2. 14: Résistance à la compression d'un composite 2D et d'un composite 3D [14]</i>	52
<i>Figure 2. 15: Résistance inter-laminaire en mode I et II d'un tissu 2D et d'un tissu 3D [14]</i>	53
<i>Figure 2. 16: Endommagement d'un fil dans la direction de l'épaisseur dit en Z pendant la phase de délaminage en mode I [14]</i>	53
<i>Figure 2. 17: a) Effet du renfort textile sur la contrainte inter-laminaire. b) Effet du renfort textile et de la résine sur la contrainte en compression post impact [17]</i>	54
<i>Figure 2. 18: Illustration du tissage 2D et 3D, cas d'un tissu 2D toile et d'un tissu 3D Orthogonal</i>	56
<i>Figure 2. 19: Illustration de la compression des fils de chaîne liant avec les fils chaîne et trame du tissu</i>	58
<i>Figure 2. 20: Matrice des architectures à réaliser</i>	59
<i>Figure 2. 21: Illustration de l'Interlock « LtoL », 13 couches [26]</i>	60

<i>Figure 2. 22: Illustration du liage dans un tissu 2D toile [26]</i>	60
<i>Figure 2. 23: Illustration de l'Interlock « Ortho », 11 couches [26]</i>	61
<i>Figure 2. 24: Illustration du liage dans un tissu UD [26]</i>	61
<i>Figure 2. 25: Illustration de l'Interlock « TtT », 6 couches [26]</i>	61
<i>Figure 2. 26: Mise en place du système d'ensouple pour délivrer le fil de chaîne</i>	63
<i>Figure 2. 27: Illustration du système de rail et des planches « d'empoutage »</i>	63
<i>Figure 2. 28: Dispositif de serrage manuel sur la machine de traction utilisée pour nos tests</i>	64
<i>Figure 2. 29: Influence de la torsion et de la préparation du fil de chaîne Kevlar® sur les propriétés mécaniques du fil</i>	65
<i>Figure 2. 30: Illustration de l'influence du tissage d'une structure orthogonal sur la consommation des fils de chaîne et de l'embuvage résultant</i>	67
<i>Figure 2. 31: Schéma de l'injection sous vide utilisée pour nos tissus Interlocks</i>	70
<i>Figure 2. 32: Illustration de l'empilement de x plis de pré-imprégnés avant passage en autoclave</i>	71
<i>Figure 2. 33: Les différents procédés de mise en œuvre des renforts tissés Interlocks et témoins</i>	73
<i>Figure 2. 34 : Calcul du taux volumique de fibres</i>	74
<i>Figure 2. 35 : Calcul du taux massique de fibres</i>	74
<i>Figure 2. 36: Presse utilisée au PPE pour réaliser les matériaux à un Tvf % donné</i>	76

<i>Figure 3. 1: Présentation du tunnel de tir au Banc National d'Epreuve (BNE)</i>	83
<i>Figure 3. 2: Schématisation des différentes campagnes d'essais pour notre étude</i>	84
<i>Figure 3. 3: Détermination des vitesses d'impacts choisies pour le calcul de la vitesse limite de perforation</i>	85
<i>Figure 3. 4: Cas de l'arrêt du projectile dans l'aluminium avec formation de bouchon à l'arrière</i>	86
<i>Figure 3. 5: Cas de la perforation de la plaque avec la formation d'un cratère « pétales de fleur »</i>	86
<i>Figure 3. 6: Illustration de l'endommagement suivant le cas 1, avec l'exemple du « TtT » 40 fils/cm 40 duites/cm avec une $V_e = 640$ m/s</i>	87
<i>Figure 3. 7: Illustration de l'endommagement suivant le cas 2, avec l'exemple du « LtoL » 40 fils/cm 52 duites/cm avec une $V_e = 620$ m/s</i>	87
<i>Figure 3. 8: Illustration de l'endommagement suivant le cas 3, avec l'exemple du « LtoL » 20 fils/cm 130 duites/cm avec une $V_e = 700$ m/s</i>	88
<i>Figure 3. 9: Illustration de l'endommagement suivant le cas 4, avec l'exemple du préimprégné 7 fils/cm 7 duites/cm avec une $V_e = 1000$ m/s</i>	88
<i>Figure 3. 10: Les différents modes d'endommagements des structures Interlock, préimprégnés et empilement de toiles</i>	89
<i>Figure 3. 11: Choix du critère « V_{lp}^2/moyenne masses surfaciques »</i>	91
<i>Figure 3. 12: Dépôt de résine sur les côtés de la structure, illustration avec le « LtoL » Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm</i>	93
<i>Figure 3. 13: Illustration du problème de stabilité durant la mise sous vide, cas du « TtT » Kevlar® 40 fils/cm 40 duites/cm</i>	93
<i>Figure 3. 14: Illustration du problème de pression lors de la réticulation de la résine après l'infusion, cas du « LtoL » Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm, face arrière</i>	94
<i>Figure 3. 15: Illustration du problème de pression lors de la réticulation de la résine après l'infusion, cas du « LtoL » Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm, face avant</i>	94
<i>Figure 3. 16: Epaisseurs (mm) et masses surfaciques (kg/m^2) de l'ensemble des structures avant et après infusion</i>	96
<i>Figure 3. 17: Influence du procédé de mise en œuvre en tant que renfort de matériaux composites sur le critère « V_{lp}^2/moyennes masses surfaciques »</i>	97
<i>Figure 3. 18: Comparaison entre les tissus Interlocks infusés en basse pression et les tissus E à H infusés au PPE</i>	101
<i>Figure 3. 19: Influence de la dégradation des fils sur le critère « V_{lp}^2/moyenne masses surfaciques »</i>	105

<i>Figure 4. 1: Configuration des cibles hybridées</i>	111
<i>Figure 4. 2: Epaisseurs obtenues pour les différentes hybridations, 1,2 et 3 sont les numéros de cibles attribués à chaque matériau hybride A, B, C et D</i>	111
<i>Figure 4. 3: Illustration des différences de compaction d'une plaque à l'autre avec l'interlock A2 et A3</i>	112
<i>Figure 4. 4: Comparaison entre l'hybridation et les Interlocks seuls pour le Tmf % et le critère « Vlp²/moyenne masses surfaciques »</i>	113
<i>Figure 4. 5: Désolidarisation des deux tissus hybridés pendant l'impact, observation de la déformée du matériau Interlock, cas de l'hybride A1</i>	114
<i>Figure 4. 6: Déformation arrière de l'hybride A1 (a) comparée au même tissu plus compacté A2 (b)</i>	114

LISTES DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. 1: Extrait de la norme STANAG 4569, les différents niveaux de classification des munitions dans les blindages militaires [2]</i>	10
<i>Tableau 2. 1: Résistance à la rupture de certains matériaux 3D Interlocks</i>	48
<i>Tableau 2. 2: Influence de la structure sur les propriétés mécaniques des fils de chaîne et de trame pour les architectures interlocks en Kevlar® à 40 fils/cm</i>	65
<i>Tableau 2. 3: Caractéristiques des tissus 3D Interlocks, et des tissus témoins après tissage ou assemblage</i>	69
<i>Tableau 2. 4: Caractéristiques des matériaux composites pour les tests à l'impact</i>	75
<i>Tableau 2. 5: Caractéristiques des cibles après infusion au PPE</i>	76
<i>Tableau 3. 1: Comparaison entre les fils de Kevlar® et Vectran® pour les Interlocks type « LtoL »</i>	102
<i>Tableau 3. 2: Comparaison entre les fils de Kevlar® et Vectran® pour les Interlocks type « TtT »</i>	103
<i>Tableau 3. 3: Comparaison entre les fils de Kevlar® et Vectran® pour les Interlocks type « Ortho »</i>	103
<i>Tableau 4. 1: Paramètres de chaque architecture hybride avec les résultats à l'impact, ratio « V_{lp}^2/moyenne masses surfaciques »</i>	112

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : COMPORTEMENT A L'IMPACT DES MATERIAUX METALLIQUES ET COMPOSITES	6
1. 1. GENERALITE SUR L'EXISTANT	7
1.1.1. Généralités sur les menaces dans la protection des véhicules	8
1.1.2. Les différents matériaux utilisés	13
1.1.3. Les différents phénomènes d'impact	14
1.1.4. Les solutions émergentes : utilisation de la céramique	17
1. 2. COMPORTEMENT A L'IMPACT DES MATERIAUX COMPOSITES FIBREUX	19
1.2.1. Définition d'un matériau composite fibreux	19
1.2.2. Les différents phénomènes d'impact rencontrés	21
1.2.3. Les paramètres influençant le comportement à l'impact des matériaux composites	26
1.2.4. Limite d'utilisation	29
1. 3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	30
1. 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1	32

CHAPITRE 2 : MATERIAUX COMPOSITES ET BLINDAGE A RENFORTS FIBREUX	35
2. 1. INTRODUCTION	36
2.1.1. Problématique générale	36
2.1.2. Les matériaux composites utilisés dans la protection balistique dure	37
2.1.2.a. Généralités	37
2.1.2.b. Généralités sur les préformes 2D tissées	39
2.1.2.c. Généralités sur les préformes 3D tissées	41
2.1.3. L'émergence des structures interlocks	43
2.1.3.a. Généralités sur les interlocks	43
2.1.3.b. Classification des tissus interlocks	45
2.1.3.c. Performances mécaniques des tissus Interlocks	47
2. 2. MISE EN ŒUVRE DES TISSUS 3D	55
2.2.1. INTRODUCTION SUR LE TISSAGE INTERLOCK	55
2.2.2. TISSAGE DES TISSUS INTERLOCKS, PROBLEMES RENCONTRES, AMELIORATION DU PROCEDE DE TISSAGE	56
2.2.3. MISE EN ŒUVRE DES TISSUS INTERLOCKS POUR NOTRE ETUDE	58
2.2.3.a. Introduction	58
2.2.3.b. Les renforts fibreux utilisés dans l'étude	59
2.2.3.c. Tissage des structures Interlocks ; étude de la dégradation des fils et modifications de la machine à tisser	62
2.2.3.d. Caractéristiques des tissus Interlocks après tissage	66
2.2.4. MISE EN ŒUVRE EN TANT QUE RENFORT DE MATERIAUX COMPOSITES	70
2.2.4.a. Mise en œuvre des structures Interlocks	70
2.2.4.b. Caractéristiques des matériaux obtenus	74
2.2.4.c. Modification du procédé d'infusion	75
2. 3. CONCLUSION CHAPITRE 2	76
2. 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2	78

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION ET OPTIMISATION DES STRUCTURES TISSEES	
INTERLOCK A L'IMPACT	81
3. 1. INTRODUCTION	82
3. 2. COMPORTEMENT A L'IMPACT DES STRUCTURES MULTICOUCHES DANS LE CAS D'UN LINER	83
3.2.1. Les tests à l'impact	83
3.2.2. Modes d'endommagement des structures après impact	86
3. 3. RESULTATS A L'IMPACT	90
3.3.1 Ratio « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » en fonction de la mise en œuvre	92
3.3.2 Ratio « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » en fonction des architectures	98
3.3.3 Ratio « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » en fonction des fils utilisés	101
3.3.4 Influence de la dégradation des fils durant le tissage sur le critère « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques »	104
CHAPITRE 4 : DISCUSSIONS	106
4. 1. UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE DOMAINE DU BLINDAGE MILITAIRE	107
4. 2. BILAN DE L'ETUDE ET QUESTIONS FUTURES	109
4. 3. VERS L'HYBRIDATION DE STRUCTURES, QUID DE L'ASSEMBLAGE OBTENU ?	110
4. 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	115
CONCLUSION GENERALE	117

Introduction générale

Combattre en mouvement, tout en étant protégé sont les deux objectifs à atteindre par les armées. Déjà dans l'antiquité et plus particulièrement à l'époque romaine, certaines protections furent inventées comme les cuirasses, les casques, mais ces protections restaient encore précaires. C'est au Moyen Âge qu'ont été développées les premières protections avec de vraies cuirasses pour les véhicules et véhiculant - soldats et chevaux - à cette époque. Au fil du temps ces protections ont été améliorées pour laisser place à des blindages plus légers ou encore des blindages composites. Les blindages composites furent inventés dans les années soixante dix. Les premiers blindages composites furent composés de couches de métal à haute densité et haute résistance et de céramiques plastiques de haute résistance à la chaleur. Les couches non métalliques jouent le rôle de piège à chaleur ou de réflecteurs, réduisant la température du jet de gaz beaucoup plus vite que le métal, empêchant alors la pénétration totale des menaces. Suite à l'utilisation du textile avec la création de la fibre de Nylon® dans les années soixante, les structures textiles à fibres synthétiques ont été de plus en plus utilisées dans la protection balistique. **[1]-[2]-[3]**

Le domaine de la protection balistique est un sujet vaste qui nécessite la compréhension de différents phénomènes. Ceux-ci sont liés aux dimensions des projectiles, aux énergies d'impact, et aussi aux protections existantes. Les munitions actuellement utilisées dans le domaine militaire sont de plus en plus performantes. En effet, celles-ci sont soit perforantes pour pénétrer des blindages de forte épaisseur, soit explosives au moment de l'impact afin d'en accroître la puissance. De plus, de nouvelles menaces ont fait leur apparition, à savoir des menaces artisanales comportant des projectiles de diverses tailles, masses et vitesses. **[4]-[5]-[6]**

La protection balistique est divisée en deux catégories, les protections dites souples comme les gilets pare-balle, les sacs de confinement anti bombes, et les protections dites dures comme les blindages de véhicules. Les protections souples sont majoritairement composées d'empilement de tissus à base de fibres à haute

performance. Les protections dures sont soit des matériaux métalliques, soit des associations de matériaux comme de la céramique, du métal ou encore du textile. [4]

Les matériaux métalliques ont depuis longtemps prouvé leurs performances contre les différentes menaces. En effet, ils sont utilisés depuis des années et continuent à prédominer le marché. De plus, ces matériaux sont en constante évolution en associant des alliages métalliques ou alors par le biais de développements nouveaux comme le titane qui reste un matériau cher mais très léger pour une performance supérieure. Au profit du prix, les matériaux comme l'acier et l'aluminium composent la majorité des protections des véhicules mais ne permettent pas d'avoir une protection idéale. Ainsi, l'idée a été de transposer la technologie des matériaux composites afin d'améliorer les blindages soit en remplaçant totalement les matériaux métalliques soit en associant les deux afin de diminuer le poids des protections tout en augmentant leur efficacité.

Les matériaux composites peuvent être définis comme « l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs ». [7] Ces deux matériaux sont en l'occurrence des renforts textiles composés la plupart du temps de fibres hautes performantes, et une résine qui permet de lier et de renforcer les renforts. Ils existent différentes formes de renforts composés soit d'architectures unidirectionnelles, soit bidimensionnelles, ou encore tridimensionnelles, de différentes fibres qu'elles soient naturelles ou synthétiques et de différentes résines, thermodurcissables ou thermoplastiques. Cette multitude de possibilités permet de créer des matériaux à hautes performances mécaniques pour des domaines d'applications variés comme le bâtiment, l'aéronautique, ou encore la défense.

Toujours à la recherche de matériaux innovants, les acteurs de la défense veulent trouver de nouvelles technologies qui permettent d'alléger toujours plus les blindages, mais en gardant un coût de fabrication faible pour des performances équivalentes. Plusieurs études ont alors vu le jour afin de comprendre les différentes subtilités du phénomène de l'impact balistique sur des structures métalliques et composites.

Ce projet est issu de l'étroite collaboration entre la DGA (Direction Générale de l'Armement), une entreprise spécialisée dans les munitions et les blindages terrestres Nexter Systems, le laboratoire du Gemtex (GEnie et Matériaux TEXtile et

le LAMIH (Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines). Ce travail de recherche a pour but d'étudier l'utilisation de matériaux composites en association de matériaux métalliques pour une menace donnée. Ces matériaux seront par la suite intégrés dans des blindages de véhicules pour en alléger la protection à iso performances. Les matériaux composites utilisés ici sont issus de l'association de nouvelles structures textiles innovantes, les tissus Interlocks, et d'une résine thermodurcissable utilisée habituellement dans les matériaux composites.

Ce travail de thèse s'est axé sur la compréhension des tissus Interlocks, de leur tissage, à leur mise en œuvre et à leur utilisation comme renforts de plaques métalliques durant un impact défini selon les normes en vigueur.

L'étude bibliographique de ce travail de thèse a permis de révéler le caractère complexe de l'impact balistique, des différentes menaces existantes et les différents phénomènes d'impact d'une structure à l'autre. En effet, les matériaux métalliques et fibreux ne réagissent pas de la même façon; et cela est principalement dû au fait de leur nature homogène, isotropique pour l'un et hétérogène, quasi-orthotrope pour l'autre. Ainsi, dans le premier chapitre, nous avons étudié les différents modes d'endommagement de ces matériaux pour en identifier les faiblesses et les améliorer.

Le chapitre suivant a permis de pousser les investigations sur les renforts textiles utilisés qu'ils soient bi ou tridimensionnels. Nous avons alors pu constater que les renforts bidimensionnels prédominent le marché de la protection, malgré l'émergence des matériaux 3D textiles dont spécifiquement les structures Interlocks chaînes. Ces matériaux ont l'avantage de renforcer les structures dans leur épaisseur et permettent de réduire les phénomènes de délaminage lors de l'impact. Le délaminage, qui consiste en la désolidarisation de couches de matériaux durant une sollicitation mécanique, reste l'inconvénient majeur des tissus actuellement utilisés dans la protection balistique.

Le cœur de cette étude repose dans la seconde partie du chapitre 2 et le chapitre 3 qui mettent en évidence le caractère complexe de la mise en œuvre des structures Interlocks chaînes mais aussi leurs comportements à l'impact. En effet la plupart des études se focalisent sur une seule structure donnée, sollicitée sous un impact à faible vitesse. Nous avons ici sollicité des matériaux composés de trois

architectures Interlocks chaînes, dans des conditions d'impacts réelles mais aussi selon un dimensionnement de cibles utilisées actuellement dans les blindages. Nous avons donc ici caractérisé la limite des « essais de laboratoire » qui pourraient ne pas être reproductibles à l'échelle industrielle. Nous avons également comparé nos matériaux avec des structures textiles utilisées dans les blindages de référence. Nous verrons alors qu'il est très difficile d'atteindre leurs propriétés balistiques avec les tissus Interlocks mais qu'une modification du procédé de mise en œuvre devrait permettre de franchir le cap et d'égaliser les protections existantes. Afin de comparer nos différents matériaux, nous avons également défini un critère de comparaison fondé sur la vitesse limite de protection et les masses surfaciques des différents matériaux composites. Ce critère nous a permis de comparer les structures à iso masse et de ne pas se focaliser uniquement sur la vitesse d'arrêt des projectiles qui présentent des masses allant du simple au triple.

Enfin le dernier chapitre permet d'ouvrir la discussion quant à l'utilisation de matériaux fibreux dans le domaine de la protection balistique en faisant un bilan de l'étude et des résultats obtenus. Nous verrons alors que beaucoup d'autres recherches sont encore à mener à la fois dans le domaine des tissus Interlocks mais aussi dans l'association de matériaux métalliques et textiles dans la protection balistique.

Une conclusion générale terminera cette étude et permettra de dégager quelques perspectives de recherches scientifiques et d'applications industrielles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Blindage> consulté le 18 Septembre 2011
- [2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Gilet_pare-balles consulté le 18 Septembre 2011
- [3] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Nylon> consulté le 18 Septembre 2011
- [4] Ashok Bhatnagar, "Lightweight ballistic composites Military and law enforcement applications" Edition WP ISBN 13:978-1-85573-941-3, 2006
- [5] « Improvised Explosive Devices (IEDs) » Christophe Cailleau, DGA, ministère de la défense, source DGA
- [6] http://fr.wikipedia.org/wiki/Munition_antiblindage consulté le 17 Septembre 2011
- [7] Glossaire des matériaux composites,- CARMA, centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006
http://www.materiatech-carma.net/html/pdf/GlossaireMateriauxComposites_CARMA.pdf

CHAPITRE 1

CHAPITRE 1 : Comportement à l'impact des matériaux métalliques et composites

Ce chapitre dresse un état de l'art du comportement des matériaux métalliques et composites à l'impact balistique. Un rapide tour d'horizon est effectué sur les différentes menaces balistiques rencontrées dans le domaine du blindage ainsi que les protections actuellement utilisées contre ces menaces. Ainsi, nous verrons que les matériaux métalliques continuent de prédominer dans le choix d'une protection balistique. En effet, leur capacité à fragmenter les projectiles leur confère un atout majeur. Cependant, leur masse reste très élevée ce qui a permis l'émergence de nouveaux matériaux comme la céramique, mais qui reste cependant fragile et peu efficace contre les impacts multiples. Une autre solution s'oriente vers l'utilisation de matériaux composites en tant que renfort d'une structure métallique. Ces matériaux permettent, par une association de renforts fibreux et d'une matrice associée, d'obtenir des propriétés mécaniques élevées. On retrouvera ces matériaux en complément de plaque métallique ou céramique. Cependant, ces matériaux étant de nature hétérogène, il semble difficile d'en déterminer le comportement à l'impact. De plus, nous avons vu que différents paramètres influencent le comportement à l'impact des matériaux composites comme la vitesse d'impact, la forme du projectile, l'angle de pénétration.... Il est donc important de bien définir le matériau composite utilisé pour ce genre d'impact du point de vue du renfort fibreux et de la matrice ce que nous verrons au chapitre 2.

1. 1. GENERALITE SUR L'EXISTANT

Durant les vingt dernières années, l'utilisation croissante des véhicules logistiques et tactiques par les forces armées de l'OTAN dans les opérations de combat et de maintien de la paix ont mis en évidence le besoin de mieux protéger les véhicules et ses occupants contre les effets des explosions, comme les mines et Engins Explosifs Improvisés (EEI).

L'expérience sur le terrain montre que la protection du véhicule ne doit pas traiter de la seule question balistique. Au contraire, il a été maintes fois démontré que la déformation élastique et plastique des matériaux utilisés due à l'onde de choc de souffle, transmet à l'intérieur du véhicule une impulsion de niveau très élevé, qui génère de graves lésions aux occupants. Les EEI, commandés à distance, génèrent souvent en plus du souffle et des éclats, un effet latéral sur le véhicule.

Les constructeurs de véhicules ont introduit sur le marché certaines techniques de protection contre le souffle. Cependant, celles-ci ne concernent que certains véhicules (Véhicule Blindé de Combat d'Infanterie, Véhicule Blindé Léger, CAESAR) et leurs coûts et caractéristiques notamment leurs masses importantes réduisent leur mise en œuvre. En conséquence, certains véhicules sont soit non protégés, soit équipés de kits de blindage en « rétrofit », consistant en général à ajouter autant d'acier que possible au véhicule. La seule adjonction de panneaux d'acier n'apporte finalement pas toutes les réponses aux questions posées et altère de façon significative l'autonomie du véhicule, ses performances et même sa longévité. Toutefois, les kits de protection restent très spécialisés sur la protection balistique contre des munitions cinétiques de petit calibre et non sur le traitement du souffle.

Mettre en œuvre aujourd'hui à la fois des kits de protection balistique ainsi que des protections contre le souffle aura des conséquences évidentes sur :

- Le poids du véhicule qui reste un enjeu important pour la mobilité en opération.
- Le coût du véhicule qui est un facteur à prendre en considération dès sa conception.

L'évolution récente des menaces liées aux explosifs classiques (mines et grenades) ou autres (Engins Explosifs Improvisés) ainsi que la promulgation des normes balistiques type STANAG ont donné lieu à la prise en compte de nombreuses mesures par les constructeurs, pour introduire dans leurs gammes de véhicules des équipements de protection contre le souffle.

L'exigence de la réduction de la masse cumulée à l'adaptation des véhicules aux nouvelles menaces permet l'émergence de nouveaux matériaux plus légers mais tout aussi performants, résultants de différents assemblages dont l'utilisation de textiles souples ou insérés en tant que renforts fibreux de matériaux composites.

L'émergence de ces matériaux a fait suite à l'utilisation des fibres hautes performances types aramide, polyéthylène et verre pour la protection personnelle des forces de l'ordre en remplacement de la fibre de Nylon®. Leurs propriétés mécaniques en comparaison de leurs densités et leurs facilités de mise en œuvre font qu'ils ont été pressentis pour améliorer voire remplacer les matériaux blindés existants. En dehors des matériaux composites, des études visent à introduire des polymères durcissants ou encore des nanotubes de carbone dans des matériaux. Cependant, les matériaux composites représentent une solution efficace pour la fragmentation des grenades, des obus et aujourd'hui contre les EEI. Souvent utilisés en association de matériaux métalliques, ils peuvent dans certains cas les remplacer totalement.

1.1.1. Généralités sur les menaces dans la protection des véhicules

Avant toutes choses il est important de différencier les deux expressions suivantes [1]:

➤ La pénétration

Interaction d'un projectile avec une cible qui conduit à la création ou non d'un cratère non débouchant

➤ La perforation

Interaction d'un projectile qui conduit à une cratérisation débouchant de la cible, avec expulsion ou non d'éléments de la cible

Les menaces les plus courantes dans le domaine de la protection balistique sont pour la plupart les munitions conventionnelles de types balles. De nouvelles menaces comme des munitions à charges creuses, des flèches ou encore des EEIs exposent les protections existantes à des modes de dégradation différents.

Les munitions types balles sont divisées en trois catégories, les petits, moyens et gros calibres. Leurs différences reposent sur leur vitesse de frappe, leur taille et leur poids. Dans le domaine de la protection des véhicules, les calibres varient de 5,56 à 14,5 mm de diamètre pour une vitesse d'impact de 600 à 900 m/s dont les classes de projectiles (cf tableau 1.1) sont répertoriées dans la norme STANAG 4569. [2]

Les projectiles à charges creuses ont pour objectif de pénétrer des blindages épais. Ils se déclinent sous de nombreuses formes, adaptées à des armes d'épaule, des obus d'artillerie ou des têtes de missiles. Ils sont basés sur les mêmes principes que ceux généralement adoptés pour les obus, répartis en deux catégories, les obus perforants (aussi appelés obus de ruptures) et les obus explosifs. Les calibres varient de 20 à 150 mm de diamètre pour des hautes vitesses et qui perforent 100 à 1000 mm d'acier à blindage. Le principe repose sur la formation d'un jet métallique par détonation d'un bloc explosif.

Level	KE Threat					Artillery Threat (FSP 20mm)		
	Ammunitions	Supplier / Specific test ammunitions	V _{pro of*} (m/s)	Azimuth	Elev.	V _{pro of} (m/s)	Azimuth	Elev.
5	25 mm x 137 APDS-T, PMB 073	Oerlikon-Contraves, 121.5 g W alloy core (150 g with sabot)	1258	±30°	0°	960	0 – 360°	0° – 90°
4	14,5 mm x 114 API/B32	CIS, Chicom, ARL Drawing number 32000 (Figure C.7.), 63.4 g steel core	911	0 – 360°	0°	960	0 – 360°	0° – 90°
3	7,62 mm x 51 AP (WC core)	Bofors Carl Gustaf FFV AP M993 or AP8 Nammo, 8.4 g W alloy core	930	0 – 360°	0° – 30°	--	0 – 360°	0° – 30°
	7,62 mm x 54R B32 API	Barnaul Machine Tool or CIS Russia, AP 7N13, 10.0 g	854					
2	7,62 mm x 39 API BZ	Chicom, CIS State arsenals, 7.77 g steel core	695	0 – 360°	0° – 30°	--	0 – 360°	0° – 22°
1	7,62 mm x 51 NATO ball	Ball M80, copper jacket, 9.65 g lead core or C21, 9,5 g, DM41 with tombac jacket and lead core, projectile weight: 9.45 g	833	0 – 360°	0° – 30°	--	0 – 360°	0° – 18°
	5,56 mm x 45 NATO SS109	SS109, 4.0 g, M855, DM11, tombac jacket, steel and lead core, projectile weight: 4 g	900					
	5,56 mm x 45 M193	M 193, Ball 3.56 g	937					

*V_{proof} = Figures are mean values: tolerance of striking velocity for individual shot is ± 20 m/s

Tableau 1. 1: Extrait de la norme STANAG 4569, les différents niveaux de classification des munitions dans les blindages militaires [2]

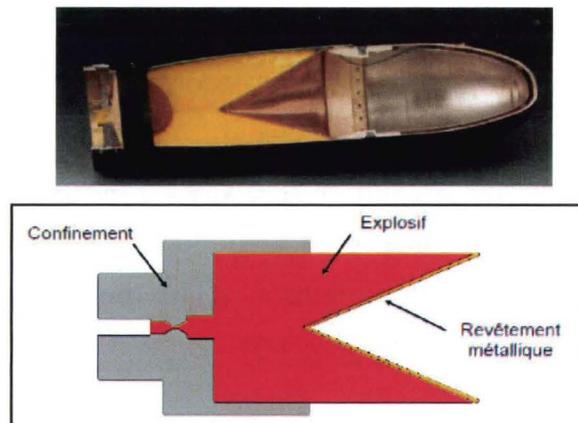


Figure 1. 1: Formation d'un jet de charge creuse [1]

Les munitions types flèches (figure 1.2) sont apparues suite aux blindages contre les charges creuses. Les calibres varient de 25 à 125 mm de diamètre pour une perforation allant de 60 à 800 mm pour un acier à blindage. Le principe de fonctionnement est fondé sur deux étapes, l'une permettant de pénétrer le blindage par une flèche en matériau très dur (type uranium) et l'autre de projeter des morceaux incandescents du solide (blindage, béton armé) à l'intérieur de la cible tout en brûlant ce qui se trouvera sur son passage en raison des caractéristiques pyrophoriques de l'uranium. [1]

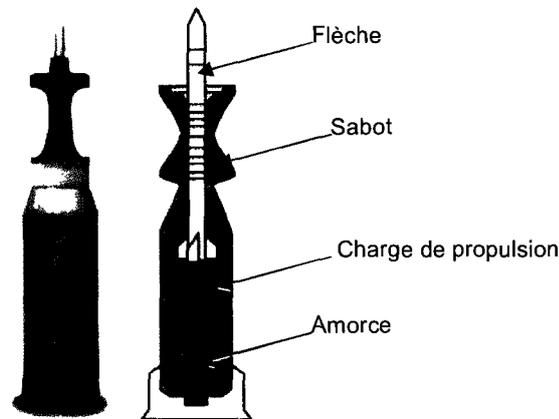


Figure 1. 2: Obus de 120 mm M829 américain avec pénétrateur en uranium appauvri [3]

Les EEI peuvent être classés en différentes catégories :

- Les EFP
- Les EEI à effet thermobarique,
- Les EEI à effet de souffle et d'éclats, de type obus d'artillerie,
- Les incendiaires.

Les EFP représentent, avec les menaces de type souffle et éclats, les menaces les plus courantes que l'on peut rencontrer sur les différents théâtres d'opérations. Combiné à l'effet de souffle, généré par la masse de l'explosif, l'EFP est associé un projectile formé possédant une vitesse élevée et un fort pouvoir de perforation. Pour la menace souffle et éclats, deux phénomènes se produisent également, l'effet de souffle et la projection d'une multitude d'éclats de tailles différentes avec une vitesse élevée. (Figure 1.3)

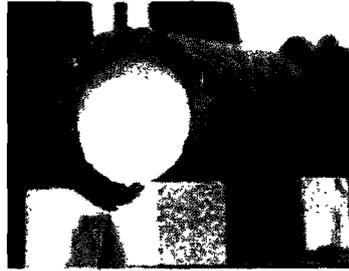


Figure 1. 3: EEI combinant effet de souffle et éclats [1]

Les IEDs de par leur définition sont des engins improvisés et donc pas forcément reproductibles. Cependant afin de protéger les véhicules, il est nécessaire de définir une menace et les IEDs à éclats font partie des plus rencontrées. Ce type d' EEI est généralement un obus d'artillerie qui est simulé par une munition de 20 FSP (Fragment Simulating Projectile) décrits dans la norme MIL-P-46593A mais aussi le STANAG 4569. Ces projectiles, fabriqués principalement en acier, sont conçus dans des tailles et des masses diverses selon l'application voulue. Ces fragments seront utilisés pour notre étude afin de caractériser nos matériaux à l'impact. (cf chapitre 3)

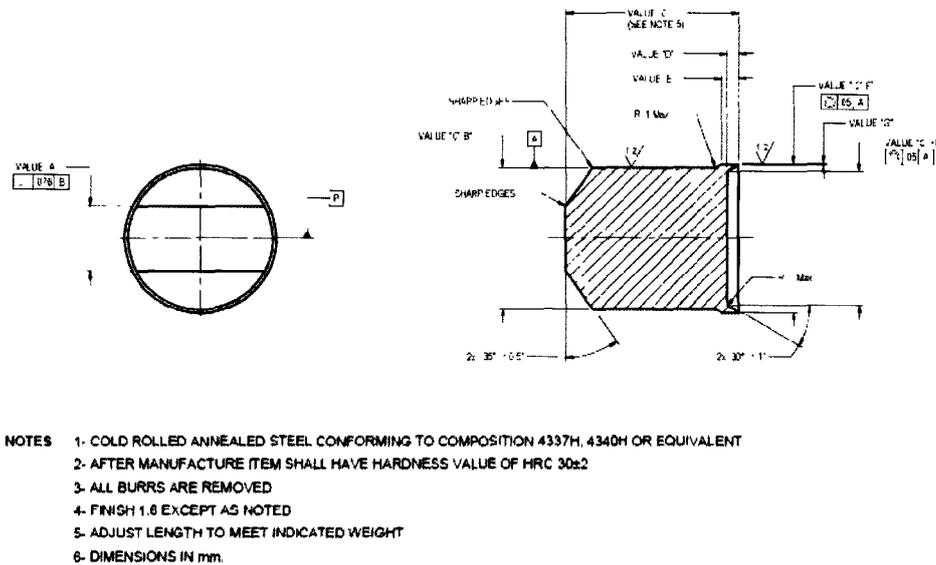


Figure 1. 4: Dessin de référence pour un FSP [2]

1.1.2. Les différents matériaux utilisés

La protection des véhicules blindés est actuellement assurée par des matériaux métalliques qui ont montré leur efficacité contre différentes menaces. Ainsi, on retrouve principalement les aciers et aluminiums à blindage ainsi que du titane.

Les matériaux métalliques ont les avantages d'être denses, durs et résistants. Ce sont aussi des matériaux homogènes dont le comportement est connu, ce qui facilite leur modélisation numérique. [4] [5]

Les aciers à blindages se regroupent selon trois familles (*norme AFNOR : NF A36-800*)

- Les aciers moulés
- Les aciers laminés classiques aussi appelé RHA (Rolled homogeneous armor) [6] : Aciers dont la surface a été traitée thermiquement afin d'être la plus lisse possible
- Les aciers laminés à hautes caractéristiques mécaniques

Les deux premiers ont une dureté comprise entre 260 et 430 HB (dureté Brinell), une résistance à la traction de 1000 MPa, et une variation d'épaisseur allant de 2 mm à 150 mm. Les aciers laminés à hautes caractéristiques ont une dureté et une résistance mécanique beaucoup plus grande entre 300 et 700 HB et une résistance à la traction allant jusqu'à 2500 MPa. Actuellement, la plupart des véhicules blindés sont composés d'acier RHA afin de donner une résistance générale contre les différents types de menaces. [1], [4], [7]

Dans la famille de l'aluminium à blindage, deux catégories sont utilisées (BLAL1 et BLAL2) avec une résistance à la traction comprise entre 305 et 440 MPa. L'aluminium, bien que moins performant que l'acier, est majoritairement utilisé car étant plus léger, cela pour répondre à des contraintes de coûts et de poids récurrents dans le domaine. Enfin, le titane est un matériau beaucoup plus résistant que les aciers ou l'aluminium mais présente un coût plus élevé. L'intérêt du titane reste sa faible densité pour une résistance à la traction supérieure à 1000 MPa et un fort allongement à la rupture ($\epsilon = 10\%$) mais reste cependant cher. [1], [4], [7]

Ces différents types de blindages sont efficaces selon certains types de menaces. Ainsi les aciers laminés à hautes caractéristiques sont beaucoup plus efficaces contre les munitions perforantes. Les aciers types RHA ont une protection optimale contre les éclats. Les aluminiums offriront une meilleure protection contre des munitions classiques et des fragments pour une masse surfacique inférieure à la solution acier. [1], [4], [7]

1.1.3. Les différents phénomènes d'impact

La perforation d'une plaque métallique est un phénomène complexe qui induit différentes variables au niveau de la cible elle-même (résistance, ductibilité, propriétés mécaniques, densité) et de la part du projectile (résistance, ductibilité, propriétés dynamiques, densité, dimension, forme de l'ogive, vitesse). Dans ce cas d'impact, le projectile est souvent dévié mais a pénétré dans la cible. Une déchirure radiale et des déchirures circulaires apparaissent ainsi qu'un gonflement de la surface de la cible. [8]

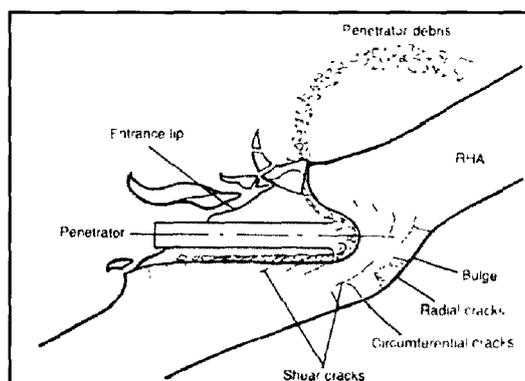


Figure 1. 5: Mécanisme d'impact sur un acier type RHA [8]

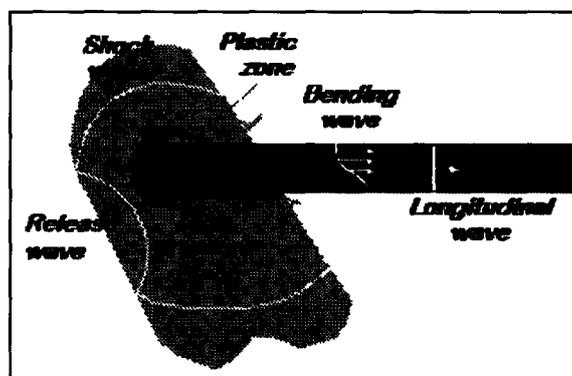


Figure 1. 6: Propagation de l'onde de choc lors de l'impact [8]

Les modes d'endommagement des plaques métalliques sont diverses et différents modèles de ruptures existent comme celui de Zukas [9] qui distingue cinq types d'endommagements possibles selon la nature du matériau, ces cas dépendent de différents paramètres dont principalement la vitesse d'impact.

➤ **1^{er} cas : rupture ductile**

La rupture ductile de la plaque permet d'absorber une partie de l'énergie. On distingue alors la déformation de la plaque en particulier si celle-ci est épaisse. La déformation n'est pas un mode de rupture en lui-même mais correspond au passage de la déformation statique à la déformation dynamique. Lors de cette première phase, on constate à l'arrière de la plaque la formation d'impact en forme de « pétale de fleur » (figure 1.8). Enfin, dans une plaque plus épaisse, une rupture radiale se produit due à la grande résistance en traction lors de la pénétration du projectile.

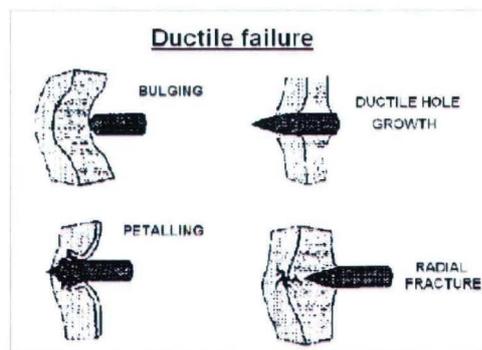


Figure 1. 7: Illustration de la rupture ductile [8]



Figure 1. 8: Illustration de la déformation en forme de pétale de fleur [8]

➤ **2^{ème} cas : fissuration et fragmentation**

La cible est relativement fragile et cassante à cause des fissurations sur la plaque mais aussi de la fragmentation de celle-ci. C'est un phénomène typique des plaques métalliques à haute dureté et des céramiques afin de perturber au maximum l'arrivée du projectile. [10]

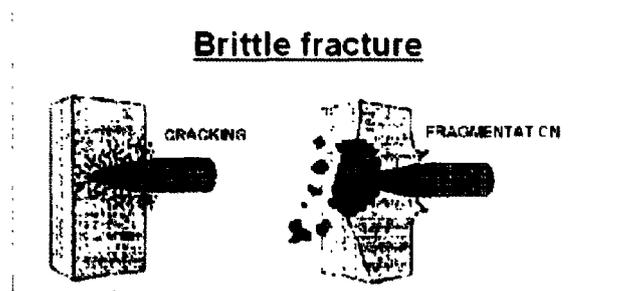


Figure 1. 9: Illustration du phénomène de fissuration et de fragmentation de la plaque [8]

➤ **3^{ème} cas : shear plugging**

La formation d'un bouchon, aussi appelée « shear plugging », causé par le cisaillement adiabatique localisé, conduit à l'éjection d'une forme cylindrique à l'arrière de la plaque. Comparée à un matériau ductile, la déformation est répartie sur une « bande » au lieu d'être répartie sur une plus grande surface de la cible. Pour ce type de bande de cisaillement il y aurait peu d'absorption d'énergie.

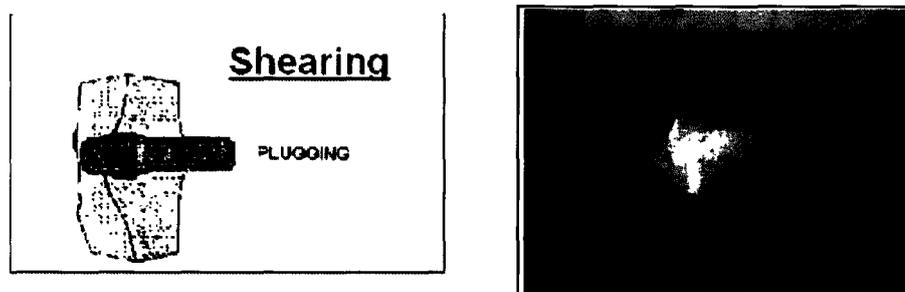


Figure 1. 10: Illustration du phénomène de « shear plugging » [8]

➤ **4^{ème} cas : délaminage**

Le délaminage est causé par la réflexion de l'onde de choc sur la surface arrière de la plaque. Cette onde de choc se transforme ensuite en onde de traction dont l'amplitude peut parfois être supérieure à la résistance en traction de la plaque métallique. Ce phénomène se traduit par la formation d'un « disque éclaté » à l'arrière du matériau.

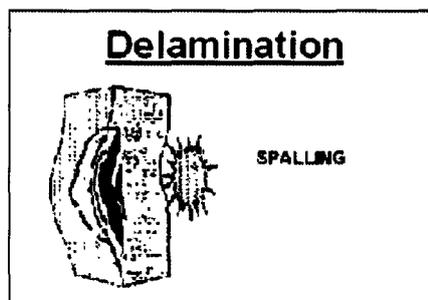


Figure 1. 11: Illustration du phénomène de délaminage [8]

➤ **5^{ème} cas : l'érosion**

Il y a une érosion par un jet de la charge creuse.

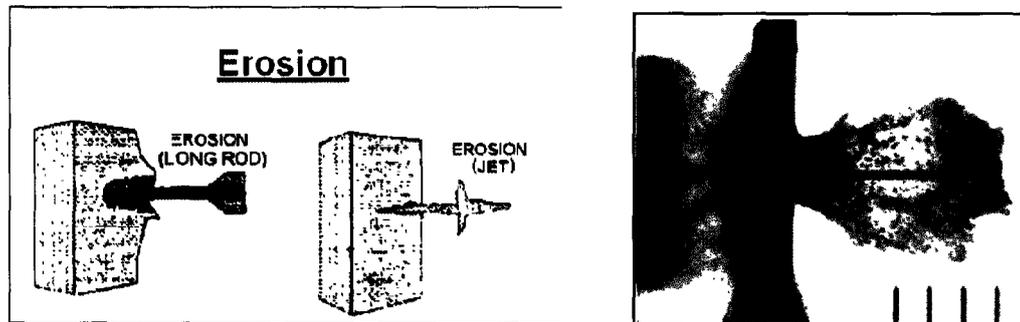


Figure 1. 12: Illustration du phénomène d'érosion [8]

1.1.4. Les solutions émergentes : utilisation de la céramique

Au-delà de l'utilisation des matériaux métalliques, les céramiques ont fait leur apparition afin d'apporter une résistance au moins équivalente aux aciers tout en diminuant leur densité. Ainsi, dans l'industrie du blindage, le carbure de bore, l'alumine ou encore le carbure de silicium sont utilisés. Ces matériaux ont l'intérêt d'avoir une faible densité pour une très grande dureté. Cependant, ils ont l'inconvénient d'avoir un comportement fragile en traction et un faible endommagement à la rupture. Les matériaux céramiques ne peuvent être utilisés seuls et sont souvent associés à des matériaux composites pour augmenter leurs capacités d'absorption d'énergie lors d'impacts balistiques. L'objectif de la céramique est de casser le noyau du projectile, afin que la protection arrière (backing) arrête les fragments, mais aussi d'augmenter la surface d'endommagement pour emmagasiner un maximum d'énergie. Il n'existe pas d'association idéale de matériaux, celle-ci dépendant de différents paramètres comme la menace, la vitesse d'impact, l'angle d'impact et la céramique en elle-même. [11]

Lorsque le projectile pénètre dans la cible « céramique-matériaux composites », on observe l'éclatement du projectile en contact avec la céramique (1^{ère} phase). Une onde de tension se propage alors dans la céramique créant un cône de déformation en arrière de celle-ci et la fissuration du matériau. Dans la plupart des cas la céramique n'arrête pas le projectile ou la propagation d'énergie associée créée, d'où l'utilisation du matériau composite en renfort arrière qui subira lui aussi divers endommagements (2^{ème} phase). Ces matériaux représentent un

avantage de poids non négligeable. Cependant, comparés aux matériaux métalliques, ils ont l'inconvénient de s'endommager très vite. Ainsi, quand un carreau de céramique est impacté, la propagation de la fissure est très importante en raison de la faible résistance au cisaillement transverse (voir aussi figure 1.13). Lors de multiples impacts sur céramique, la résistance du matériau à l'impact du deuxième projectile sera quasi nulle si les distances entre les impacts de projectiles sont faibles. La taille, la profondeur des carreaux mais aussi leur placement sur le panneau balistique sont des facteurs importants et en cours d'étude aujourd'hui. [11]

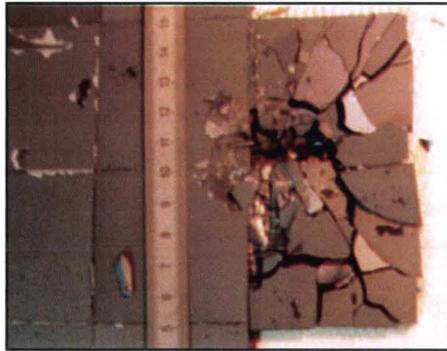


Figure 1. 13: Illustration du phénomène d'endommagement de la céramique après un impact

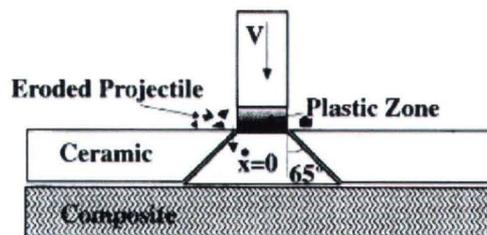


Figure 1. 14: 1^{ère} phase d'endommagement du panneau balistique à base de céramique et de matériau composite [8]

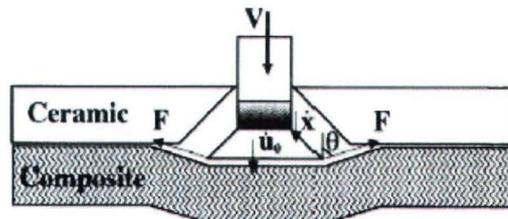


Figure 1. 15: 2^{ème} phase d'endommagement du panneau balistique à base de céramique et de matériau composite [8]

1. 2. COMPORTEMENT A L'IMPACT DES MATERIAUX COMPOSITES FIBREUX

1.2.1. Définition d'un matériau composite fibreux

Un matériau composite peut être défini comme « l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs ». [12] Il nécessite alors l'association intime d'au moins deux composants ; le renfort (pouvant être constitué de fibres synthétiques ou naturelles) et la matrice (pouvant être constituée de résine thermoplastique (TP) ou thermodurcissable (TD)). Ces deux composants doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison appelé interface. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes [12].

Les fibres sont le constituant principal dans un matériau composite à renfort fibreux. Elles supportent la charge et donne aux composites sa rigidité et sa résistance. Ces fibres (figure 1.16) se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Ces matériaux sont caractérisés par la nature de la fibre qu'elle soit minérale ou organique, cela dépend des applications finales recherchées et surtout des performances mécaniques à atteindre. [13] On choisira préférentiellement des fibres avec un pouvoir élastique très élevé mais également une bonne résistance à la rupture. Ces fibres auront alors la capacité d'emmagasiner un maximum d'énergie lors de l'impact. C'est pourquoi, de nombreux fournisseurs cherchent à augmenter cet allongement en diminuant le diamètre des fibres pour accroître leurs résistances mécaniques. De plus l'ensimage des fibres est un facteur important dans les performances balistiques des fibres. Un ensimage adapté à l'application finale du matériau permet d'améliorer sa résistance transversale. La rupture de celui-ci se produisant principalement au niveau de la matrice et non plus au niveau de l'interface fibre-résine. [12]

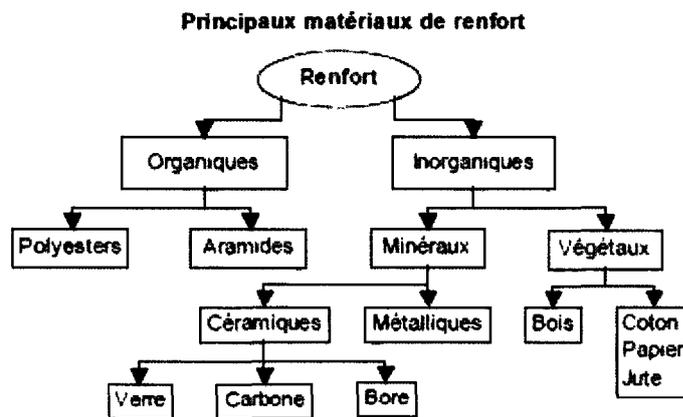


Figure 1. 16: Les principaux types de fibres utilisées dans les renforts composites

Une fois les fibres choisies, celles-ci sont introduites dans des structures dites « architectures de renforts ». La plupart des renforts travaillent en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

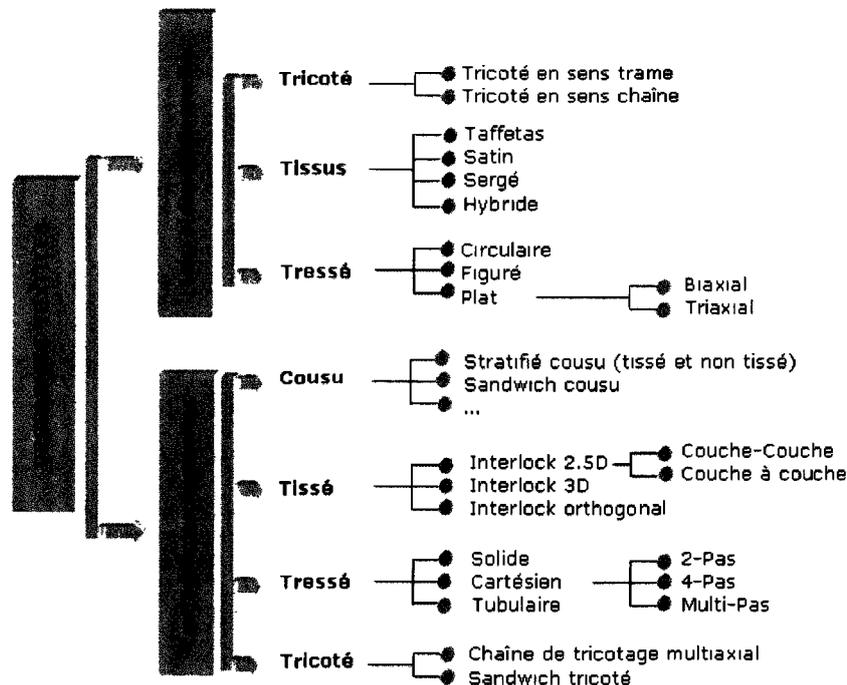


Figure 1. 17: Architectures de renforts pour matériaux composites [14]

La matrice a pour rôle de consolider le renfort. Elle permet de répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. On utilise actuellement des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP)

renforcés de fibres courtes se développe fortement. Le choix de la matrice est important. Il faut, en effet, veiller à avoir une bonne résistance à la rupture ainsi qu'un bon allongement. Les résines TD sont principalement utilisées pour les matériaux composites où des agents qui introduisent une certaine plasticité, sont rajoutés afin d'en améliorer la résistance à la propagation de fissures. Les résines thermoplastiques sont plus performantes car elles absorbent plus d'énergie grâce à leur structure moléculaire. En effet les chaînes polymères glissent les unes par rapport aux autres pour dissiper plus largement l'énergie. Cependant lors des impacts haute énergie, la résistance de ces matrices diminue fortement au profit de l'utilisation de matrices thermodurcissables. [15]

La mise en œuvre d'un matériau composite dépend donc de plusieurs paramètres notamment la nature du matériau, son utilisation finale, sa densité, la nature de la résine utilisée.... Différents procédés de mise en œuvre existent [13], afin de s'adapter aux matériaux et aux contraintes de forme et de sollicitations. Dans le cadre de notre étude nous utiliserons trois procédés de mise en œuvre différents avec une résine TD : une infusion sous vide basse pression, une mise en œuvre par autoclave et une infusion sous vide haute pression. Ces différentes techniques seront décrites au chapitre 2.

1.2.2. Les différents phénomènes d'impact rencontrés

La résistance à l'impact et la tolérance aux dommages d'un matériau composite sont des phénomènes complexes et critiques. Les dommages subis sont souvent cachés et réduisent les propriétés mécaniques des matériaux.

L'endommagement d'un matériau composite peut être défini comme un ensemble de changements structuraux à multiples échelles au sein du matériau (micro, méso et macroscopique). Ainsi pour un matériau composite fibreux à forte anisotropie, l'arrangement géométrique des constituants prédomine sur la direction de la sollicitation lors de l'endommagement de celui-ci.

Selon Grujicic *et al.* [16], il existe deux types de matériaux soumis à l'impact, le matériau homogène type métallique et le matériau hétérogène type composite à base de renforts tissés. De plus on peut diviser les matériaux composites tissés en deux catégories :

- Les composites à haute résistance et haute rigidité qui sont efficaces pour fragmenter et déformer la menace entrante tout en ayant une faible capacité d'absorption de l'énergie cinétique. Ces matériaux sont principalement réalisés avec des fibres de carbone
- Les composites ductiles et à haute résistance, dont les propriétés sont optimisées pour absorber l'énergie d'impact entrante, sont réalisés en fibres aramide, verre ou polyéthylène.

Selon Hashin [17], l'endommagement principal d'un matériau composite est dû à la matrice. On distingue alors :

- *Au niveau microscopique*

Une fissuration de la matrice parallèle aux placements des fibres, une décohésion de la matrice et une rupture des fibres.

- *Au niveau mésoscopique*

Une rupture transversale et longitudinale du matériau.

- *Au niveau macroscopique*

Un endommagement total du matériau.

Greenhalgh et al. [18] apporte plus de précision sur la tolérance à l'impact d'un matériau composite qui, selon eux, consiste en deux aspects qui dépendent des propriétés mécaniques des différents matériaux. Le premier correspond à la capacité du matériau à absorber l'énergie d'impact avec un minimum d'endommagement. Le second est la tolérance aux endommagements dû à l'impact en préservant le maximum de propriétés mécaniques du matériau comme la compression. Ainsi pendant l'impact on distingue différentes phases qui sont :

- La fissuration de la matrice résultant de la contrainte de cisaillement en épaisseur du matériau générée par la force de l'impact
- Le début du délaminage dû à la tension appliquée par la fissure de la matrice
- La propagation du délaminage dirigée par le cisaillement interlaminaire dû à la flexion de la matière durant l'impact
- La rupture des fibres pendant la pénétration du projectile

Pendant l'impact les modules de flexion et de cisaillement déterminent la quantité d'énergie pouvant être absorbée sans endommagements de la structure. Ils

influencent également le début et la propagation du délaminage. Cependant, le paramètre principal régissant la tolérance à l'impact est la ténacité de la matière, c'est-à-dire la quantité d'énergie que la structure peut absorber avant sa mise en tension et son cisaillement. Le cisaillement est considéré ici comme le mécanisme de rupture dominant suivi par le délaminage et la déformation du matériau.

Ces observations rejoignent celles de Bless, Sierakowski et Jena [19], [20] qui montrent que le mécanisme d'une plaque composite impactée entraîne en premier lieu un comportement rigide de la structure lors de la perforation induisant le phénomène de cisaillement transverse des fibres. On observe ensuite un comportement en flexion du matériau créant des délaminages et des ruptures en tension des fibres.

Selon toutes ces études [17-18-19-20], nous pouvons dire que la perforation d'une plaque composite soumise à un impact balistique entraîne alors la présence de trois mécanismes d'absorption d'énergie, à savoir, le cisaillement des fibres, la rupture en tension et le délaminage.

➤ *Le cisaillement transverse des fibres*

On constate que le mode de rupture des fibres est différent selon l'épaisseur du matériau et la forme du projectile. Ainsi Bless *et al.* [19] montrent qu'il y a rupture des fibres principalement en cisaillement transverse alors que Sierakowski *et al.* [19] remarquent une rupture en tension des fibres dans le cas de plaque minces impactées avec le même projectile. Les modes de cisaillement sont souvent liés aux vitesses d'impacts, ne connaissant pas la vitesse ici, nous ne pouvons pas quantifier le cisaillement du matériau.

➤ *La rupture en tension des fibres*

Cette rupture est observée au niveau de la zone d'impact entre le projectile et les fibres. On observe un phénomène de fusion de la fibre (ici le cas d'une fibre Dyneema® figure 1.18) qui peut être dû à la forte température générée par le projectile lors de l'impact. La rupture du matériau semble ainsi se produire après une légère élongation observable sur la figure 1.18 (c). Ce phénomène d'élongation et de fusion suggère que le matériau est entré en rupture ductile pendant l'impact lorsque que celui-ci est soumis à une très grande vitesse (environ 840 m/s pour cette étude).

[20]

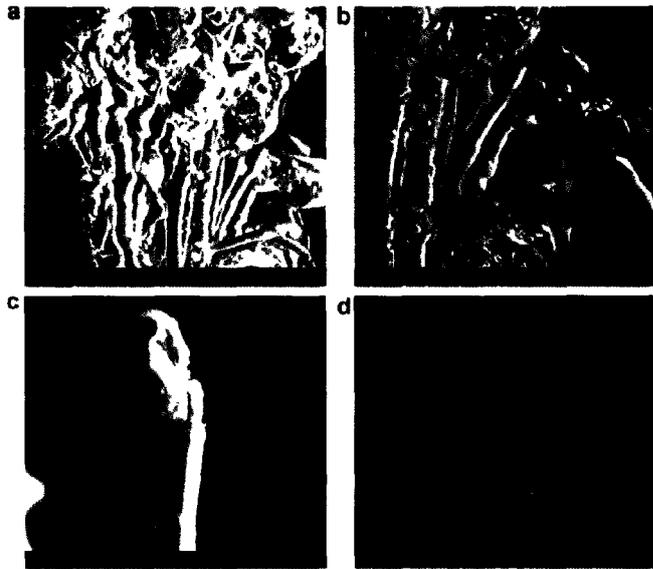


Figure 1. 18: Image SEM d'une fibre Dyneema® après l'impact balistique (a) et (b), phénomène de fusion de la fibre (c) et phénomène d'élongation (d)

➤ *Le délaminage*

Le délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagements. Ce phénomène est observé autour des zones d'impact, résultant de la propagation et de la réflexion des ondes de déformation. Le processus de délaminage survient lorsqu'un morceau de la première couche de la face avant est poussé par le projectile. Le morceau applique une charge transversale sur la seconde couche et crée le délaminage sur les autres couches. La largeur de ce morceau est égale à celle du projectile. La longueur dépend du temps nécessaire à la perforation de la première couche. Le rôle des résines se localise au niveau des interfaces inter-mèches. Une résine fragile et peu tenace confère ainsi au composite rigide une propagation du délaminage marquée par une forte instabilité. L'interface inter-mèches apparaît fragile et sa rupture affaiblit la capacité du composite à mettre en jeu l'ensemble des endommagements possibles dans un processus de délaminage. Une résine assouplie plus tenace confère au composite une croissance stable du délaminage. [21]

Cependant, selon Ayax [19], il est important de ne pas inhiber ce phénomène, car celui-ci contribue à l'absorption de l'énergie lors de l'endommagement et la déformation des plaques composites. Il faudrait alors avoir un compromis entre la résistance aux cisaillements des fibres et la rigidité flexionnelle du matériau.

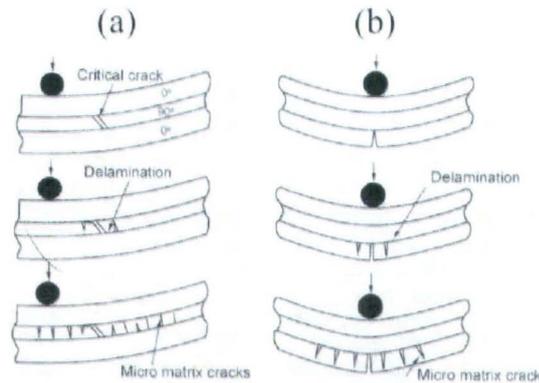


Figure 1. 19: Mécanisme de délaminage : (a) cisaillement transversale, (b) cisaillement flexion

Selon Naik *et al.* [22] le phénomène de choc et d'absorption d'énergie d'un matériaux composites à renfort textile à basse vitesse peut être illustré comme suit :

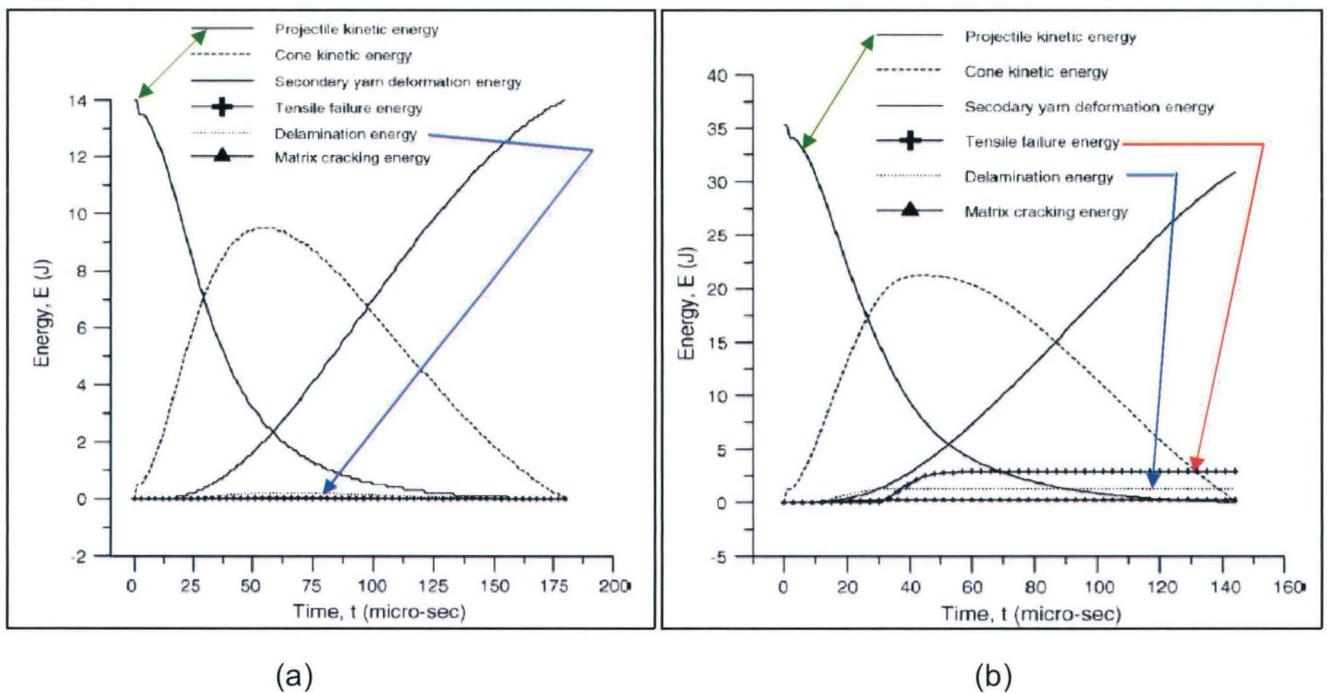


Figure 1. 20: Illustration du phénomène d'impact, cas d'un composite verre/époxy (a) $V_e=100\text{m/s}$ et (b) $V_e=158\text{ m/s}$, masse du projectile $m_p=2.8\text{g}$

Ces résultats sont basés sur une simulation de différents comportements relevés dans la littérature [23] et permettent de comprendre le comportement à l'impact d'un matériau composite verre-époxy. On remarque alors que le délaminage

intervient au bout de 20 μ s après l'impact. Le phénomène se poursuit tout au long de l'impact. On constate également l'influence de la vitesse sur l'énergie de délaminage qui est plus importante dans le cas d'une vitesse plus élevée (cas b).

Pour résumer, la réponse d'un matériau composite à l'impact est la combinaison entre une réponse locale (dynamique) qui résulte de la zone d'impact aboutissant à la perforation et une réponse globale (statique) qui correspond à la réaction du reste du matériau dû au chargement de la plaque. La réponse statique peut être influencée par la dimension du matériau et correspond à la phase de transfert de l'onde de déformation ainsi qu'à la formation d'un cône de déformation. Le comportement local est dirigé par différents mécanismes de rupture comme l'effet de cisaillement, la rupture des fibres et la formation d'amas de fibres. Ces comportements sont caractérisés par la vitesse d'impact, les propriétés du projectile mais aussi du matériau, les conditions de fabrication et de test. En général, la vitesse du projectile et la durée résultante de l'impact semblent être les paramètres déterminants pour connaître le comportement d'un matériau soumis à des sollicitations mécaniques à haute vitesse telles que celles présentes dans le cadre d'une protection balistique. [22]

1.2.3. Les paramètres influençant le comportement à l'impact des matériaux composites

Nous l'avons vu dans le paragraphe 1.2.1 précédent, les fibres et la matrice jouent un rôle important dans les performances mécaniques du matériau composite, mais d'autres paramètres influent également sur le comportement à l'impact de celui-ci comme les vitesses d'impact, les conditions aux limites, la forme et la taille du projectile....

➤ Les vitesses d'impacts

Le mécanisme de pénétration est très dépendant de la vitesse d'impact du projectile. On distingue des gammes de vitesses allant de 10 m/s à 12000 m/s. Pour des matériaux métalliques, les effets de la vitesse se font ressentir sur la pénétration du projectile dans la cible.

Ainsi, pour des vitesses comprises entre 500 et 1000 m/s, vitesses correspondant à des éclats et des projectiles de petits calibres, on constate une déformation plastique du matériau avec un diamètre de cratère légèrement supérieur à celui du projectile. Pour des vitesses allant de 1000 à 2000 m/s, la pénétration survient par cratérisation de la cible avec une augmentation de la profondeur de pénétration quasi linéaire à la vitesse et un diamètre de cratère compris entre 1,2 et 1,8 fois celui du projectile. Pour des vitesses supérieures à 2000 m/s, la pénétration se fait toujours par cratérisation de la cible, on constate ici une augmentation du diamètre du cratère formé par la pénétration ainsi que l'érosion complète du projectile. [4]

Dans ces gammes de vitesses, la densité des matériaux devient le paramètre prépondérant par rapport aux caractéristiques mécaniques de part les pressions générées dans la cible. [4]

Pour des matériaux fibreux, la surface d'impact augmente quasi linéairement avec la vitesse jusqu'à atteindre la vitesse limite de perforation. Au-delà de cette vitesse, la surface délaminée diminue et tend, pour des valeurs de grandes vitesses, ici 900 m/s vers un disque de diamètre égal au projectile. Ainsi les effets du délaminage sont saturés et la résistance mécanique de la plaque est maximale. On observe qu'à partir de la vitesse limite de perforation l'énergie réelle absorbée par le matériau diminue avec l'augmentation de la vitesse incidente. De plus, le phénomène de perforation est différent selon les vitesses d'impact. En effet selon la figure 1.21, un impact à grande vitesse (cas a entre 100m/s et 1000m/s) fera peu de dommage sur la structure composite contrairement à des vitesses moyennes (cas b 10m/s – 100m/s) où le cisaillement des fibres et leur rupture seront plus importantes. Enfin pour des petites vitesses (cas c < 10m/s) la zone d'impact fera moins de dommage, le délaminage sera alors étendue de façon conique. [7]

Selon Gama *et al.* [19], à haute vitesse d'impact, les phénomènes de pénétration ne sont pas identiques. Ainsi, ils constatent que lorsque le projectile atteint le matériau, un bouchon de fibres est d'abord créé puis poussé par le projectile. Un effet de cisaillement apparaît alors autour de la zone pénétrée ainsi qu'un effet de délaminage au voisinage de l'impact.

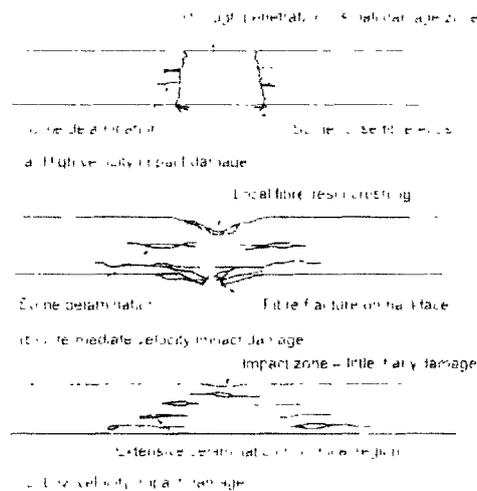


Figure 1. 21: Influence des vitesses d'impact sur l'endommagement du composite [18]

➤ *Les conditions aux limites*

La taille des cibles est un facteur déterminant dans le phénomène d'endommagement. A moyenne vitesse la longueur d'un matériau n'influe pas sur le seuil d'énergie incidente qui initie l'endommagement. Ainsi la réponse à l'impact d'un composite est localisée et ne dépend pas des conditions d'appui [19]

➤ *La forme et la taille du projectile*

Takeda *et al.* [19] ont montré que plus on augmente la longueur d'un projectile cylindrique plus les effets de délaminage sont atténués et donc la pénétration est plus facile. Des résultats similaires sont constatés par Bless *et al* [19] sur des projectiles ogivés. Ainsi un projectile avec un élanement (longueur / calibre) très élevé ayant une surface de contact avec la cible la plus petite présentera la meilleure pénétration dans le matériau. [7]

En dehors des paramètres relatifs à l'impact en lui-même (vitesses, forme et taille du projectile), on retrouve des critères qui influencent le comportement du matériau à l'impact comme ses conditions d'élaboration, la nature des constituants, l'interface fibre-matrice et les paramètres de fabrication (tissus, tricots, nontissés...). Selon Van Corp [24], Savage [25] et Dorey [26] plus l'épaisseur d'un matériau est grande, plus celui-ci résistera à l'impact. De même, plus le taux volumique de fibre est important plus le matériau sera résistant. L'influence des fibres a également une importance. En effet selon Melhman *et al*, [27] il est préférable d'utiliser des fibres raides et résistantes (type verre S2) afin d'augmenter les propriétés balistiques du

composite en favorisant la propagation du délaminage. L'ensemble des auteurs de ces publications [10] [11] [12] s'accordent à dire que les matériaux à base ductile (aramide, PE) absorbent davantage d'énergie par déformation des fibres. Le choix des matrices gouverne également les propriétés balistiques des matériaux. Trois mécanismes surviennent lors de l'impact comme les fissurations de matrice, les délaminages inter et intralaminaires. Enfin les paramètres du tissage jouent un rôle important dans la performance du composite. Il semblerait que la rigidité en flexion des plis et l'épaisseur soient déterminantes sur les performances balistiques du composite. De plus, lors du tissage sur machine à main, les fibres sont beaucoup plus manipulées et sujettes à des contraintes non contrôlables, qui influent sur les performances mécaniques du matériau. L'influence du tissage sur les propriétés des matériaux composites à l'impact et sous contraintes mécaniques sera étudiée dans le chapitre 2 et 3.

1.2.4. Limite d'utilisation

Les matériaux composites présentent l'inconvénient d'avoir peu de déformations plastiques lors de l'impact. Ainsi lorsqu'un certain niveau de charge est appliqué sur le matériau, celui-ci subit des endommagements locaux mais aussi internes aux structures. Les principaux inconvénients des composites reposent alors sur les points suivants [28] :

- *Faible résistance dans la direction transverse*
- *Faible résistance aux cisaillements*
- *Peu de déformations plastiques*
- *Différents placement de fibres selon l'utilisation souhaitée*
- *Procédé coûteux*
- *Fissures de la résine*
- *Problème à l'interface matrice renfort*
- *Délaminage selon certains types de renforts*

1. 3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous l'avons vu, le domaine de la protection balistique souffre de l'émergence des nouvelles menaces et il se doit d'être de plus en plus performant. A la performance s'ajoutent des contraintes de coût et de poids. En effet, les protections utilisées à ce jour sont souvent issues de matériaux métalliques, qui présentent l'inconvénient d'être lourds mais pour un coût de mise en œuvre avantageux.

L'utilisation des matériaux textiles dans la protection personnelle, mais aussi l'émergence des matériaux composites dans divers domaines, ont poussé les industriels à vouloir utiliser ces matériaux afin de remplacer et/ou renforcer les matériaux métalliques dans les véhicules blindés. Ainsi, dans ce dernier domaine d'application, de nombreuses études sont en cours pour essayer de trouver le compromis idéal entre le poids et le coût de mise en œuvre plus élevé des matériaux composites et la performance balistique liée à l'évolution croissante de la complexité de la menace. L'association de ces deux matériaux représente une avancée dans le domaine de la protection. En effet cela permet de diminuer le poids des structures tout en égalant les capacités balistiques d'un matériau métallique seul. La présence d'un renfort textile de part sa grande déformabilité, permet d'absorber le reste d'énergie que le matériau métallique seul ne peut faire. De nombreuses études ont été faites sur l'utilisation de renforts tissés 2D mais peu, ou alors encore en cours, sont publiées sur l'utilisation de renforts tissés 3D. En effet depuis quelques années, les matériaux textiles 3D sont plébiscités dans diverses domaines d'applications avec des résultats très satisfaisants pour certains, mais qu'en est-il de leur utilisation dans des domaines où des énergies d'impact sont importantes ?

Nous avons également pu voir que durant un impact balistique, les matériaux composites subissent différents endommagements notamment au niveau des fibres. Il est donc important de ne pas les endommager en amont de la production mais aussi de ne pas endommager les tissus lors de leur mise en œuvre sous forme de renfort de matériaux composites.

Les chapitres suivants essayeront de répondre à ces questions en étudiant le comportement de structures tissées 3D type Interlocks, de leur fabrication à leur mise en œuvre et par la suite lorsqu'ils sont soumis à des impacts balistiques. Ces structures, nous le verrons, sont en pleine émergence de part leurs avantages

mécaniques comparées aux structures bidimensionnelles actuellement utilisées dans le domaine du blindage. Nous verrons alors plus en détail la définition des structures Interlocks tissées, de leur modélisation à leur conception sur machine à tisser puis insérées en tant que renfort de matériaux composite. Nous mettrons alors en avant l'importance de préserver le matériau dès sa fabrication mais également la difficulté et la complexité à le fabriquer et à le mettre en œuvre comme matériau composite. Afin d'avoir des matériaux balistiques légers et performants, nous testerons nos matériaux à l'impact à l'aide d'un 20 FSP et nous les comparerons aux matériaux existants composés d'assemblage de matériaux métalliques et de textiles bidimensionnels.

1. 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1

[1] « Improvised Explosive Devices (IEDs) » Christophe Cailleau, DGA, ministère de la défense, Source DGA

[2] STANAG 4569, "Procedures for evaluating the protection levels of logistics and light armoured vehicles for KE and artillery threats", January 2004

[3] http://fr.wikipedia.org/wiki/Munition_antiblindage consulté le 17 Septembre 2011

[4] Ashok Bhatnagar, "Lightweight ballistic composites Military and law enforcement applications" Edition WP ISBN 13:978-1-85573-941-3, 2006

[5] SR Reid and G.Zhou "Impact behaviour of fibre-reinforced composite material and structures" chap 1 "An overview of the impact behaviour of fibre reinforced composites", ISBN 978-1-85573-423-4, 2000

[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Rolled_homogeneous_armour consulté le 17 Septembre 2011

[7] William A Gooch, Matthew S Burkins, "Army research laboratory, Analysis of Threat Projectiles for Protection of Light Tactical Vehicles", ARL RP 89, 2004

[8] B. Dodd, F. Coghe "Damage caused to metals by kinetic and chemical energy projectiles Security and Use of Innovative Technologies Against Terrorism" in LWAG Light Weight Armour for Defence & Security, F. Teixeira-Dias, B. Dodd, A. Torres Marques, E. Lach, S. Walley (editors) ISBN 978-972-789-289-1, 2009

[9] Zukas, J.A., "High Velocity Impact Mechanics," Wiley Interscience, ISBN-10: 0471514446, 1990

[10] N.K.Naik, P.Shrirao, B.C.K. Reddy, "Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Parametric Studies" Materials Science and Engineering, n°42 pp104-116, 2005

[11] I.S. Chocron, Benloulou, V. Sanchez Galvez, "A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors" Int. J. Impact Engng Vol. 21, No. 6, pp. 461-471, 1998

[12] Glossaire des matériaux composites,- CARMA, centre d'animation régional en matériaux avancés, 2006

http://www.materiatech-carma.net/html/pdf/GlossaireMateriauxComposites_CARMA.pdf

[13] Louis Berreur, Bertrand de Maillard « L'industrie française des matériaux composites », Etude stratégique réalisée par pour le compte de la DiGITIP / SIM, 2002

[14] Christiane El Hage, « Modélisation du comportement élastique endommageable de matériaux composites à renfort tridimensionnel », thèse soutenue le 27 Octobre 2006 à l'université technologique de Compiègne

[15] Abir Al Maghribi, comportement des matériaux composites à fibres courtes : application à l'impact basse vitesse, thèse de doctorat soutenue le 26 Septembre 2008, ISAE, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.

[16] M. Grujicic, B. Pandurangan, KL. Koudela & B-A Cheeseman, "A computational analysis of the ballistic performance of lightweight hybrid composite armors" Applied surface science n°253 pp 730-745, 2006

[17] Z.Hashin, Analysis of Composite Materials, Journal Applied Mechanics, vol 50, pp 481-505, 1983

[18] Greenhalgh E and M. Hiley, "the assessment of novel materials and processes for the impact tolerance design of stiffened composite aerospace structures", Composites Part A, 2003, 34 (2), pp151-161

[19] Eric Ayax, « caractérisations expérimentales et modélisation du comportement d'une plaque composite tissée en régime balistique », thèse ENSAM soutenue en Juillet 1993

[20] P.K Jena, K. Ramanjeneyulu, K. Siva, T. Balakrishna, Bhat, "Ballistic studies on layered structures", *Materials and Design* 30, pp 1922-1929, 2008

[21] *Annales des composites Délaminage : bilan et perspectives. Journée AMAC / CSMA co-organisée par le LG2MS de l'UTC de Compiègne. Cachan le 25 Mai 1995, O. Allix et ML. Benzeggagh,*

[22] N.K.Naik, P.Shirao, "Composite structures under ballistic impact", *Composites Structures*, 66, p 579, 2004

[23] R.Vaziri, A. Poursartip, A.shahkarami, E. Cetus : "Lightweight ballistic composites, Military and law enforcement applications: Materials response to ballistic impact" ISBN 13 :978-1-85573-941-3, 2006

[24] Van Corp, "Ballistic properties of Dyneema HPPE fibers", *Reports DSM high performance fiber B.V, Netherlands, 1979*

[25] Savage "Fabric and fibre reinforced laminate amours", *Institute of Metal and Materials in defence*, pp 285-290, 1989

[26] Dorey, "Fracture of composite and damages tolerance" *Agards lecture serie n°124*, 1987

[27] Mehlman, Vasudev, "A comparative study of the ballistic performance of glass reinforced plastic materials, *SAMPE Quaterly*, Vol 18, N°4, pp 43-48, 1987

[28] SR Reid and G.Zhou "Impact behaviour of fibre-reinforced composite material and structures" chap 1 "An overview of the impact behaviour of fibre reinforced composites", ISBN 978-1-85573-423-4, 2000

CHAPITRE 2

CHAPITRE 2 : Matériaux composites et blindage à renforts fibreux

Ce chapitre se décompose en deux parties. L'une traite des différentes structures textiles pouvant être utilisées dans le domaine du blindage. La seconde traite plus particulièrement des tissus Interlocks utilisés pour ce travail de recherche, de leur conception à leur mise en œuvre par infusion de résine époxy. Il ressort de ce chapitre qu'il existe une grande diversité de structures textiles utilisées dans le blindage. Cependant, une catégorie, qui consiste à empiler des tissus tissés ou UD, ont l'inconvénient de se délaminer durant l'impact et donc réduit fortement la capacité finale à absorber l'énergie résultante. C'est pour palier au délaminage des couches que les renforts tridimensionnels sont apparus. Cependant, la grande diversité de géométrie ne permet pas une compréhension immédiate de ces structures. Nous avons alors fait le choix d'étudier trois structures Interlocks tissées, en l'occurrence une structure couche à couche « LtoL », un diagonal « TtT » et un orthogonal « Ortho ». Après avoir déterminé les différents paramètres de tissage qui composent ces structures (géométrie, densité en chaîne et trame, nature des fils utilisés...) nous les avons tissé puis mis en œuvre avec la technique d'infusion sous vide. La géométrie des structures a alors un impact réel sur les caractéristiques finales des composites Interlocks, notamment sur les masses et les taux massiques de fibres obtenus. Ces paramètres seront à prendre en compte dans la compréhension du comportement à l'impact des structures de blindage métallique avec un renfort composite

2. 1. INTRODUCTION

2.1.1. Problématique générale

Nous avons vu dans le chapitre 1, le comportement à l'impact de plusieurs matériaux de protection. Nous avons également mis en avant que les matériaux métalliques pour une protection type blindage sont toujours autant utilisés car ils présentent un avantage en terme de performance balistique par rapport au coût de mise en œuvre. Cependant, l'émergence de nouveaux matériaux à renforts textiles a permis de remplacer les protections existantes par des solutions plus légères à performance balistique équivalente.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons plus en détails aux différents renforts tissés utilisés pour assurer une protection balistique suffisante et correspondant aux menaces précédemment étudiées. Nous nous focaliserons sur l'émergence des structures tissées 3D dites Interlocks qui, de part leurs différents avantages et leurs géométries de structures, peuvent être utilisées en tant que renfort supplémentaire d'une protection balistique métallique utilisée pour une application de blindage.

Beaucoup d'études ont été menées pour comprendre le comportement de ces structures à l'impact. En effet, l'émergence de ces matériaux a créé une concurrence assez large dans le domaine textile mais peu d'informations sont disponibles sur les études menées. Ce manque d'informations est d'autant plus accentué dans le domaine de l'industrie de la défense. Les connaissances actuelles, que ce soit au niveau des géométries des structures Interlocks, des vitesses d'essais ou encore des résultats, nous poussent à réaliser une étude, étape par étape, de la fabrication des tissus, de leur mise en œuvre puis de leur comportement à l'impact. Ces points seront repris ultérieurement

2.1.2. Les matériaux composites utilisés dans la protection balistique dure

2.1.2.a. Généralités

Les composites à renforts tissés sont de plus en plus utilisés dans des domaines où l'allègement des structures est nécessaire tout en apportant des performances mécaniques à l'impact, l'endommagement ou encore à la fatigue. Les structures bidimensionnelles, types stratifiés, sont majoritairement utilisées pour les blindages. En effet, grâce à un taux élevé de fibres, ces matériaux ont une grande résistance à la rupture et une grande rigidité. Cependant, lorsque le composite est soumis à une charge dans une autre direction que celle du renfort fibreux, une rupture interlaminaire se produit, rendant le composite inefficace. Cette rupture interlaminaire est aussi connue sous le nom de délaminage. Le délaminage peut se produire au niveau des interfaces entre les fibres et la matrice mais aussi à l'intérieur de celle-ci, ou bien c'est une rupture qui s'amorce dans les couches anisotropes du stratifié. Ce phénomène est très récurrent, c'est pourquoi, de nouvelles solutions ont été envisagées pour palier à ce problème. [1-7]

Les structures tissées présentent un mode de rupture différent de celui des stratifiés. Celui-ci est homogène autour de la zone de rupture et un compromis entre renforts fibreux et matrice assure un effet de délaminage beaucoup moins accentué. Ces structures sont constituées d'un entrelacement orthogonal de fils de chaîne et de trame formant alors un pli de tissu. Cependant, le manque de résistance dans l'épaisseur a fait émerger une autre catégorie de renfort qui sont les préformes tridimensionnelles. Ainsi, dans les structures tissées, les renforts 3D permettent d'introduire des fils dans l'épaisseur du matériau tout en conservant un entrelacement des fils de chaîne et de trame présents dans les tissus 2D. Les structures tridimensionnelles peuvent se présenter également sous la forme de structures tissées, tricotées ou encore tressées.

Nous nous intéresserons dans cette étude aux structures tissées Interlocks. Différentes géométries existent et une classification sera présentée par la suite. Dans le domaine de la protection balistique, les matériaux composites à renforts tissés sont fabriqués à partir de fils à hautes performances mécaniques. Ces fibres sont soit organiques comme les para-aramides, ou les polyéthylènes, soit inorganiques,

comme les fibres de verre, les céramiques ou encore le basalte. De nouvelles fibres font aujourd'hui leur apparition comme des fibres de polyester insaturé type Vectran®.

Dans le domaine des aramides on retrouve le Kevlar® et le Twaron®. Ces fibres sont commercialisées respectivement par Dupont de Nemours et par Teijin. [8], [9]. Les polyéthylènes sont classés en fonction de leur densité qui dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau, déterminant les performances mécaniques des fibres. Ces fibres à haut module sont commercialisées sous les marques Spectra® (Honeywell) [10] et Dyneema® (DSM). [11]

Les fibres de verre sont largement utilisées dans le domaine du renforcement. Dans le domaine de la protection, la fibre de verre S2 est majoritairement utilisée. En effet, la composition chimique de ces fibres leur confère de très bonnes propriétés mécaniques. Ce sont des verres à haute teneur en silice et en alumine sans bore ni alcalin. L'absence de ces composants « fondants » entraîne des conditions de d'élaboration et de fibrage plus difficile et donc des coûts plus élevés que les autres verres. [12]

Ces différentes fibres hautes performances présentent des avantages non négligeables dans des domaines très techniques mais montrent aussi leurs limites. Le graphique 2.1 suivant montre un comparatif des fibres au niveau de leur prix, leur densité et leur résistance à la traction. On constate une nette différence entre les fibres de verre et les autres fibres de part leur coût qui reste le plus bas, leur température de dégradation et leur allongement qui sont très élevés. Cependant, ces fibres présentent une faible résistance en traction pour une densité la plus élevée. Les fibres aramides et de polyesters insaturés présentent quant à elles des propriétés communes pour un coût légèrement plus faible pour le polyester insaturé.

Enfin les fibres de polyéthylène présentent une résistance à la traction plus forte pour une densité plus faible. Cependant leur coût élevé reste un obstacle pour leur utilisation à l'échelle laboratoire et parfois même industrielle.

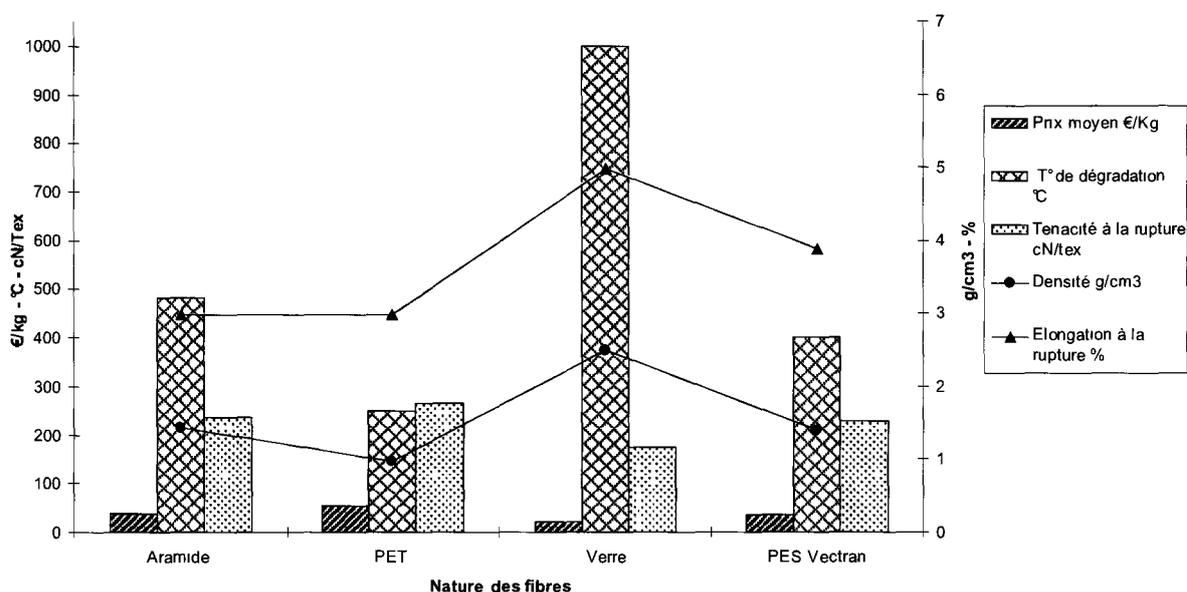


Figure 2. 1: Récapitulatif des fibres à hautes performances utilisées principalement dans la protection balistique

2.1.2.b. Généralités sur les préformes 2D tissées

La majorité des structures bidimensionnelles sont les préformes tissées (cf figure 2.1), les tricotées et la superposition de matériaux unidirectionnels, dont le mode de positionnement des fibres diffère les unes des autres. Les renforts tricotés présentent une bonne « drapabilité » grâce à leur capacité de grande déformation sous faibles contraintes ce qui permet alors de tricoter des préformes complexes. En contrepartie, les fibres étant courbées et de formes bouclées dans le renfort, les propriétés mécaniques du composite restent limitées en comparaison aux composites structuraux comme les préformes tissées. [13]

Selon Tong, Mouritz & Bannister [14], les UD ont l'inconvénient d'avoir une faible résistance mécanique dans l'épaisseur due au manque de fils dans cette direction. L'arrangement des fils dans les deux directions du plan (x et y) apporte une résistance moins importante aux matériaux, car ses propriétés sont majoritairement déterminées par la résine mais aussi par l'interface fibre / résine. Ainsi les 2D stratifiés sont peu utilisés dans des structures devant supporter des sollicitations dans l'épaisseur ou des cisaillements interlaminaires. De plus, comme le montre Hu

2.1.2.c. Généralités sur les préformes 3D tissées

Selon [14] [15] [16] [17] [18], la présence d'un fil dans une troisième direction de l'espace (direction z) assure de meilleures propriétés mécaniques des structures 3D par rapport aux 2D. La majorité des structures tridimensionnelles sont tissées, tricotées, ou encore tressées. Les 3D tricotés ont le potentiel d'avoir une production rapide et automatisée. Cependant leur faible fraction volumique de fibres et aussi les distorsions des fils pendant le tricotage confèrent aux préformes tricotées des faibles propriétés dans le plan. De même les préformes tressées, ne sont pas considérées comme efficace lors d'une sollicitation des fibres dans le plan mais au contraire seraient appropriées pour des applications en torsion types cordage. [19]

Les tissus 3D sont considérés comme ayant une meilleure résistance dans l'épaisseur, une résistance plus importante au délaminage et une augmentation de la résistance à l'impact. Hu *et al.* [15], confirment ces performances en démontrant que les matériaux 3D offrent une très bonne résistance aux cisaillements interlaminaires. On constate (figure 2.4 (a)) que la vitesse augmente dans la zone d'impact de façon plus importante dans une structure UD que pour un tissu 3D Interlock chaîne, de même pour la résistance à la flexion après impact. On montre également que le renforcement en épaisseur d'un matériau 3D donne une meilleure résistance à l'impact et une tolérance aux endommagements en supprimant le délaminage et en limitant la zone d'endommagement due à l'impact (figure 2.4 (b)). La différence de performance est moins flagrante pour la résistance à la compression après impact qui demeure légèrement plus importante pour un composite 3D (figure 2.4 (c)).

Cependant, les travaux de Hu *et al.* [15] mentionnent deux types de composites : un Interlock 3D et un Interlock Orthogonal. Une différence est faite entre les deux types d'Interlocks sans préciser la nature exacte du premier et ses paramètres le définissant précisément. Ce complément d'informations pourrait améliorer la compréhension du mécanisme d'endommagement à l'impact des composites à renforts tissés Interlocks. On met ainsi l'accent sur le manque d'informations qui est un problème récurrent dans le domaine des Interlocks, bien que ceux-ci existent depuis quelques années, et ce quelque soit le domaine d'application.

Les avantages présentés ici, ne révèlent pas un problème présent dans les composites à renforts tissés 3D, à savoir un taux de fibres moins important que les

tissus 2D ou les UD. En effet, les zones de vide, provoquées par la présence des fils de liage dans l'épaisseur, seront comblées par l'insertion de la résine lors de la fabrication du composite. Cela peut représenter un inconvénient dans la mesure où pour certaines applications, notamment en protection balistique, un taux de renfort fibreux élevé semble assurer une bonne protection à l'impact. Les structures tissées Interlocks peuvent contribuer à accompagner un délaminage inter-laminaire de la structure afin d'absorber l'énergie résultante de l'impact par une répartition plus élargie des sollicitations aux matériaux fibreux constituant le renfort 3D. Il nous faut alors trouver un compromis entre le taux volumique de fibres et les performances mécaniques des différents tissus.

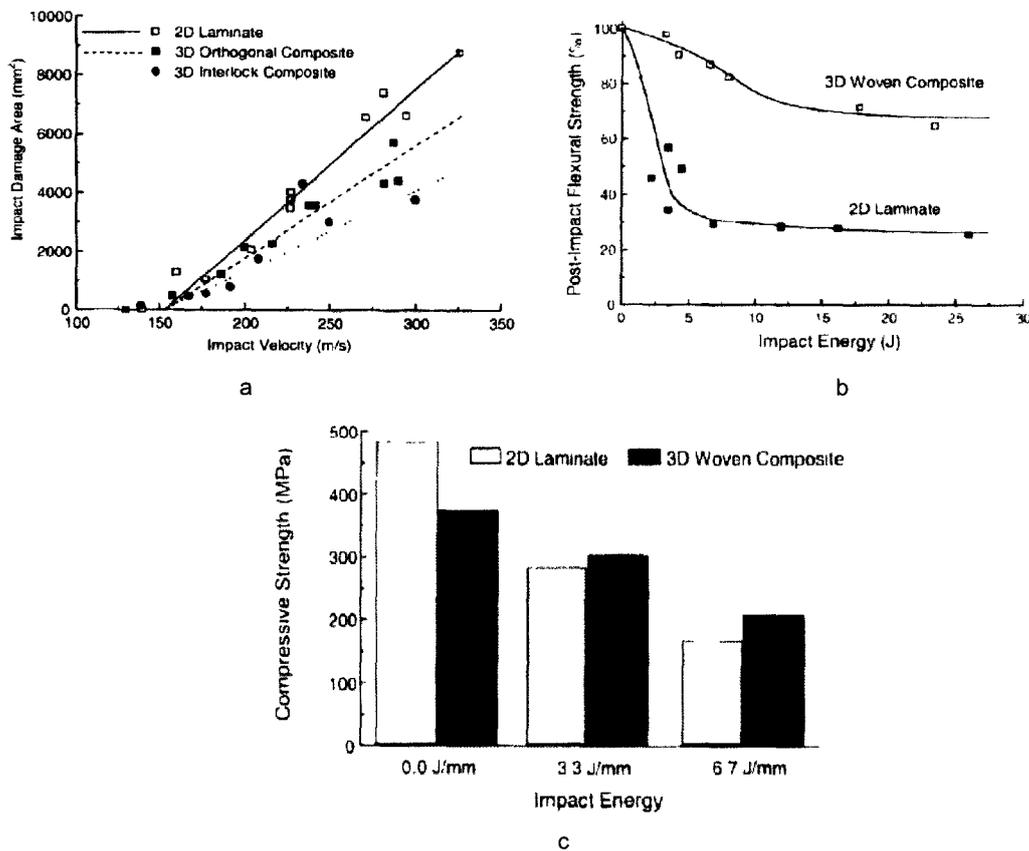


Figure 2. 4: Effet de la vitesse d'impact et de l'énergie d'impact sur les 2D et 3D [15] : cas de la zone d'impact a), de la résistance à la traction b) et compression c)

2.1.3. L'émergence des structures interlocks

2.1.3.a. Généralités sur les interlocks

La structure fibreuse des 3D tissés consiste en l'assemblage de fils de chaîne et de trame dans le plan mais aussi dans l'épaisseur de la structure. Plusieurs arrangements de fils peuvent être réalisés et permettent d'obtenir une grande quantité de structures 3D. [20] Les structures 3D tissées sont communément appelées « angle Interlock » ou « Interlock ». Selon Tong, Mouritz & Bannister [14], la fabrication des tissus 3D permet de réduire le temps de fabrication global comparé à l'empilement et la cohésion des tissus 2D. Cependant, les structures Interlocks ne sont pas produites en quantités suffisantes à faible coût. En effet, même si elles présentent de nombreux avantages, les tissus 2D continuent d'être principalement utilisés par les industries et notamment dans la protection balistique.

Comparées aux structures 2D tissées, les préformes 3D présentent les avantages suivants : [20]

- Meilleure résistance inter-laminaire grâce aux fils de renfort dans l'épaisseur
- Meilleure résistance à l'impact balistique à petite vitesse (le cas des grandes vitesses est en cours d'études, peu de publications sont disponibles) comparée aux 2D laminés. Le liage dans l'épaisseur augmente la résistance à l'impact
- Possibilités d'intégrer des natures et des types de fils différents dans ces structures
- Augmentation de la résistance par l'utilisation des fils supplémentaires insérés sans entrecroisement et entre les couches des tissus
- Manipulation plus aisée et en monobloc du renfort fibreux 3D lors de la mise en forme pour réaliser une structure composite non plane.

Ces observations rejoignent celles de Hu *et al*, [15] qui montrent en particulier que les structures 3D ont les avantages suivants :

- La présence du renfort dans la troisième direction permet une augmentation de la résistance dans le plan transverse et un meilleur comportement à l'impact,
- On constate une augmentation de la résistance en compression après impact et une réduction de la zone délaminée,

- Les composites 3D présentent un taux de fibres plus important par rapport à des structures types toiles ou préimprégnés.
- Le peu d'entrelacement des fibres dans certaines architectures permet aux tissés de se plier plus facilement contrairement aux 2D. On peut ainsi aisément les manipuler et leur imposer une forme souhaitée lors d'une mise en œuvre sous forme de matériaux composites.

Cependant, l'introduction d'un fil dans l'épaisseur peut réduire certaines propriétés du matériau. En effet, la dureté dans le plan et la résistance à la fatigue peuvent être diminuées suite à des endommagements des fibres causés par les ondulations, le gonflement des filaments dans la fibre.... Cette même étude [15] a démontré que l'introduction de fils dans l'épaisseur n'influence pas le module d'Young dans le plan ni la résistance à la traction. Au contraire, plus il y a de fils dans l'épaisseur plus le composite sera résistant à l'endommagement.

Cette étude [15] n'est cependant pas généralisable à tous les tissés 3D. L'introduction du fil dans l'épaisseur doit donc se faire de façon appropriée afin de limiter les ondulations, les frottements inter-fibres et la perte de résistance à la fatigue du composite. [20]. Afin de mieux comprendre et de visualiser les structures Interlocks et les différents fils y intervenant, le schéma suivant (figure 2.5) regroupe une majorité de fils qui interviennent dans la fabrication des structures tissées Interlocks et d'en comprendre leur rôle.

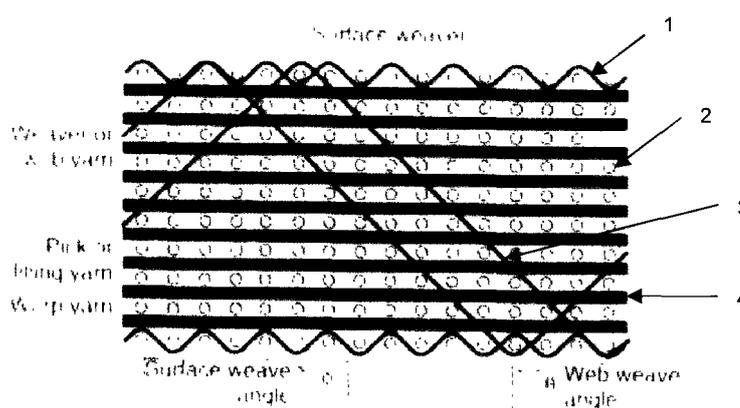


Figure 2. 5: Illustration d'un tissu Interlock, rôle de chaque fils

➤ 1- *Surface weave – fils de surface*

Ces fils sont intégrés dans une structure, lorsque celle-ci requiert une surface lisse, et n'ont pas une grande influence sur les propriétés mécaniques du tissu, ils ont plutôt un rôle « esthétique »

➤ 2- *Fill yarn – fils de trame*

Ces fils sont perpendiculaires aux fils de chaîne provenant d'un stockage cylindrique sur bobines et associé à la machine à tisser. Plus communément appelés fils de trame, ils n'ont pas beaucoup d'ondulations par rapport aux fils de chaîne. Ces fils apportent les propriétés mécaniques transversales aux tissus.

➤ 3- *Weavers ou web yarns – fils de chaîne*

Ce sont les fils de chaîne et proviennent, soit d'un stockage cylindrique sur ensouple de la machine à tisser, soit à partir d'un cantre composé de bobines avec chacune la longueur de fil de chaîne suffisante. Ils subissent des ondulations car ils travaillent dans l'épaisseur du tissu. Ces fils peuvent soit traverser l'épaisseur entière de la structure soit lier au moins deux couches entre-elles avec un angle d'inclinaison inférieur ou égal à 90°.

➤ 4- *Stuffers yarns - fils longitudinaux*

Ces fils sont également des fils de chaîne. Ils sont peu ondulés et apportent une résistance et une dureté dans le sens longitudinal.

2.1.3.b. Classification des tissus interlocks

Différentes études ont été menées concernant le tissage des structures Interlocks et leurs comportements sous différentes sollicitations (impact basses vitesses, caractérisations mécaniques...). Cependant, il est assez difficile de trouver une classification unique de ces structures. Or, il est très important de savoir les classer afin de les comparer selon des paramètres identiques. [21], [22], [20] Ainsi, trois classifications ont retenu notre attention. Celle de Bogdanovitch [21] permet seulement de différencier les formes des structures. Les structures 3D sont classées soit par formes tubulaires soit sous forme de tissus.... Cette classification reste très globale et n'est pas adaptée à notre étude. Boussu *et al.* [22] ont classifié les structures Interlocks tissées en trois groupes :

- Les orthogonaux, où le fil dans l'épaisseur appelé fil Z est perpendiculaire au plan du tissu et traverse l'épaisseur du tissu entre deux colonnes de fils de trame.
- Le couche à couche d'angle, où le fil de chaîne lie au moins deux couches du tissu.
- Le diagonal d'angle, où le fil de chaîne lie la totalité de l'épaisseur du tissu en liant au moins deux colonnes de fils de trame.

Cette classification reste claire mais ne permet pas dans notre étude de différencier deux catégories de matériaux entre eux.

Ainsi, nous nous sommes intéressés plus en détail à la classification de Hu *et al.* [25] qui distingue quatre groupes selon la figure 2.8:

- « angle interlock/through thickness bonding » (A/T) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur

Dans cette configuration, les fils de chaîne lient toute l'épaisseur de la structure dans une direction diagonale. Cette structure peut présenter l'inconvénient d'avoir beaucoup plus d'ondulations et de points de croisement au niveau des fils de chaîne et de trame et donc induire une faiblesse du matériau dans ces zones.

- « angle interlock/layer to layer bonding » (A/L) - interlock d'angle avec liaison des fils de chaîne couche à couche

Dans cette structure, les fils de chaîne lient les couches entre elles dans une direction diagonale. Comme pour la configuration précédente, il existe un certain nombre de croisements entre les fils de chaîne et de trame de la structure ce qui induit des zones de faiblesse.

- « orthogonal interlock/through thickness bonding » (O/T) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne dans l'épaisseur

Les fils de chaîne lient la structure selon deux directions. Une partie des fils vont lier ainsi les couches entre elles dans l'épaisseur de la structure avec un angle d'inclinaison orthogonal. Les autres fils de chaîne sont insérés longitudinalement entre les couches de fils de trame. Les fils longitudinaux ne présentent aucune ondulation comparés aux deux fils de chaîne dans l'épaisseur. Le tissage de cette structure sur machine à insertion de trame manuelle est très complexe et demande

une vérification constante de la tension des fils dans l'épaisseur afin de ne pas avoir de défaut visuel en surface de tissu mais aussi de bien aligner les fils les uns en dessous des autres. Ces défauts seront illustrés dans la deuxième partie de ce chapitre.

- « orthogonal interlock/layer to layer bonding » (O/L) - interlock orthogonal avec liaison des fils de chaîne couche à couche

Les fils de chaîne lient ici au moins deux couches entre elles entre deux colonnes de fils de trame. Les croisements entre fils de chaîne et de trame sont ainsi limités. Cette architecture est facile à tisser mais reste très flexible et donc déformable. Cela doit donc être pris en compte pour le choix de l'application finale du tissu.

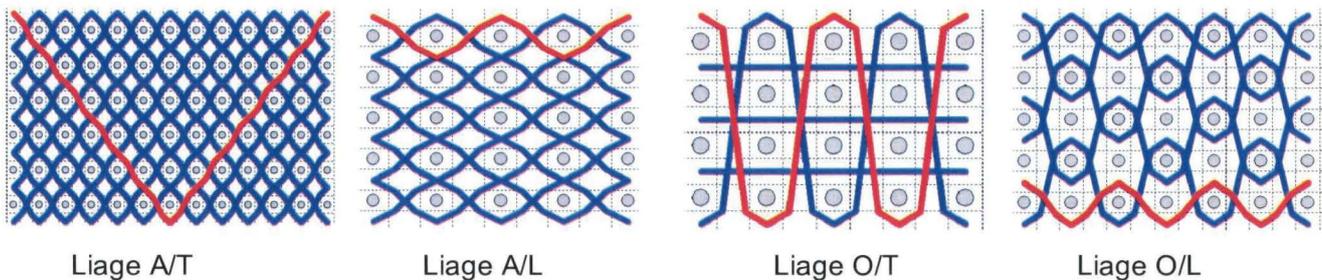


Figure 2. 6: Illustration d'une classification de structures Interlocks [23]

2.1.3.c. Performances mécaniques des tissus Interlocks

Il est intéressant ici de pouvoir comparer les performances mécaniques des différentes structures Interlocks selon différents paramètres de tissage (densité, épaisseur, fibres...). Cependant, comme nous l'avons mentionné précédemment peu d'études détaillées existent sur les performances des structures Interlocks. Les différentes études [20], [21], [22] distinguent les Interlocks Orthogonal des 3D Interlocks sans pour autant mentionner quel est leur liage, le nombre de couches.... Nous supposons que les 3D Interlocks regroupent les différents liages proposés par Hu (figure 2.6) excepté le liage O/T correspondant à l'orthogonal.

Ainsi, selon Tong, Mouritz & Bannister [14], on constate que le taux de fibres dans la direction de l'épaisseur n'influence pas les propriétés en tension des différents Interlocks ni les propriétés en compression et cisaillement.

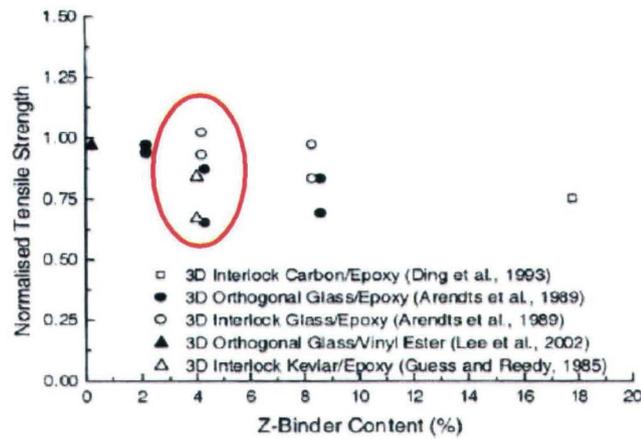


Figure 2. 7: Influence du taux de fibre dans la direction en z sur les propriétés de tension des architectures

Ces résultats peuvent être corrélés avec une autre étude de Hu *et al* [20]. Cependant, peu d'informations sont données sur la nature exacte de ces Interlocks ainsi que leur liage ce qui ne permet pas dans notre cas une exploitation possible mais présente juste une information utile quant au choix des matériaux à préférer pour notre étude à savoir au moins un orthogonal et un interlock avec un liage d'angle.

Type of fabric	Tensile strength (kN)			Average (kN)
Orthogonal structure with layer-to-layer binding	2.20	1.90	2.00	2.03
Orthogonal structure	2.75	2.70	2.80	2.75
Angle interlock structure	2.50	2.60	2.60	2.57
Modified angle interlock structure	2.95	2.80	3.00	2.92

Tableau 2. 1: Résistance à la rupture de certains matériaux 3D Interlocks

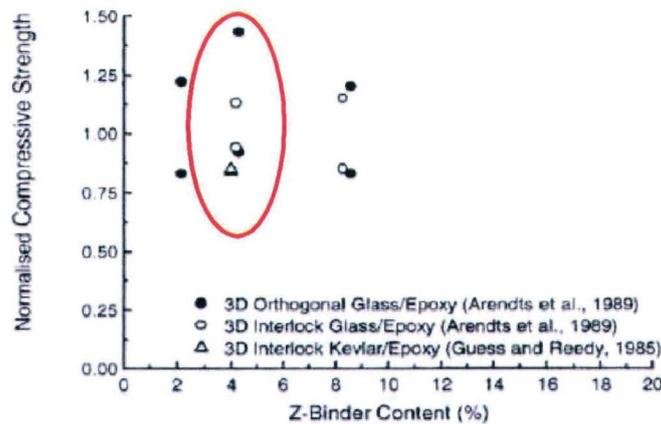


Figure 2. 8: Influence du taux de fibre dans la direction en z sur les propriétés de compression des architectures [14]

Pour un taux de fibres équivalent, seule la géométrie de la structure semble avoir une influence sur les propriétés de compression et de cisaillement. De plus, pour différents taux de fibres (4 et 9%) la différence de propriétés mécaniques n'apparaît pas significative.

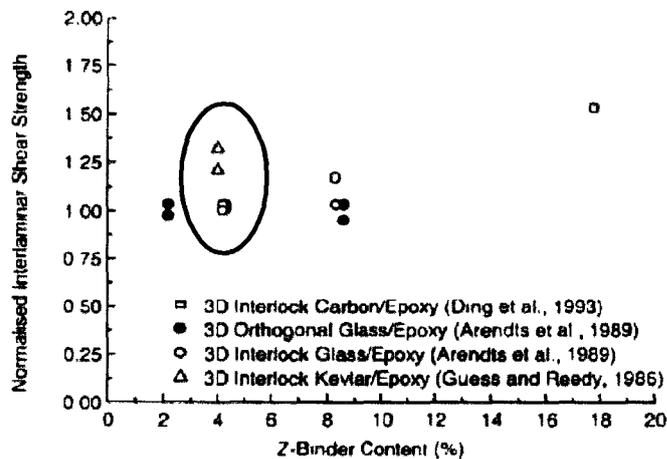


Figure 2. 9: Influence du taux de fibre dans la direction en z sur les propriétés de cisaillement des architectures [14]

Selon ces résultats graphiques plusieurs hypothèses peuvent être formulées considérant un même taux de fibres dans la direction de l'épaisseur et pour certains échantillons :

➤ *Résistance à la rupture*

Pour un taux de fibres équivalent, un meilleur comportement est observé pour les « Interlocks » en fibres de verre par rapport aux structures « Orthogonales » en fibres de verre également. De même pour les Interlocks à base de fils d'aramide (type Kevlar®) qui présentent des performances plus faibles que ceux en fibres de verre.

Les graphiques précédents peuvent être corrélés à la figure 2.10. Selon [24], le comportement général diffère suivant la vitesse de sollicitation en tension dans la direction plane ou dans l'épaisseur. On distingue alors trois phases :

1- *Déformation élastique du matériau, la matrice commence à se fissurer, les fibres commencent à se cisiller*

2- *Délaminage du matériau*

3- *Autres dommages subis par le matériau*

Ces résultats sont valables pour un matériau Interlock non orthogonal composé de fils d'aramide (Kevlar®). Ces conclusions ne sont pas forcément applicables à tous les types de matériaux mais peuvent néanmoins nous orienter sur leurs comportements.

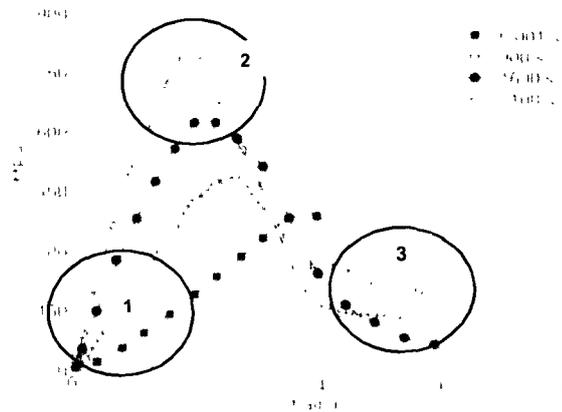


Figure 2. 10: Courbe de tension pour des composites 3D aramide (Kevlar) époxy dans l'épaisseur du tissu

➤ *Résistance au cisaillement*

Les structures Interlocks autres que les « Orthogonaux » en fibre aramide ont une meilleure résistance au cisaillement que les « Interlocks » en fibre de verre. En effet, lorsque la vitesse de déformation en cisaillement des fils de chaîne augmente, la contrainte de rupture en cisaillement reste identique (150 MPa en passant de 0 à 2800 s⁻¹). Au contraire, pour les fils de trame, plus la vitesse de déformation augmente plus la valeur de la contrainte de rupture en cisaillement augmente (220 à 280 MPa de 0 à 3500 s⁻¹). [24]

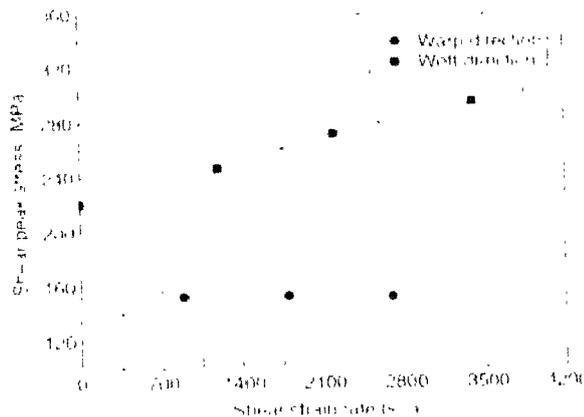


Figure 2. 11 : Contrainte de rupture en cisaillement des fils des fils de chaîne (warp) et de trame (weft) en fonction de la vitesse de déformation en cisaillement [28]

De plus, cette même étude montre que la résistance au cisaillement d'un matériau Interlock est plus sensible à la contrainte de cisaillement dans le sens chaîne plutôt

que dans le sens trame. Ainsi des matériaux composites à renfort 3D auront plus de résistance au cisaillement interlaminaire que des tissus 2D du fait de l'insertion des différents liages de fils de chaîne dans l'épaisseur du matériau.

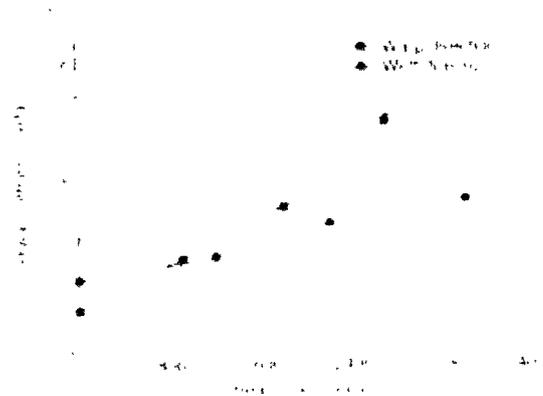


Figure 2. 12: Comportement au cisaillement des fils de chaîne (warp direction) et de trame (weft direction) en fonction de la vitesse de cisaillement [24]

➤ *Le module d'Young*

Le module d'Young de certaines préformes 3D est moins important par rapport aux tissus 2D avec un taux de fibres quasi similaire. Ainsi, le module d'Young peut être réduit de 10 à 35 %. Cette diminution serait la cause de l'ondulation des fils de liage dit Z mais aussi des endommagements des fils pendant le tissage. Cependant, ces résultats ne sont pas généralisables pour toutes les structures 3D. En effet, le module d'Young peut varier et surpasser ceux des tissus 2D en augmentant le taux de fibres dans la structure. [14]

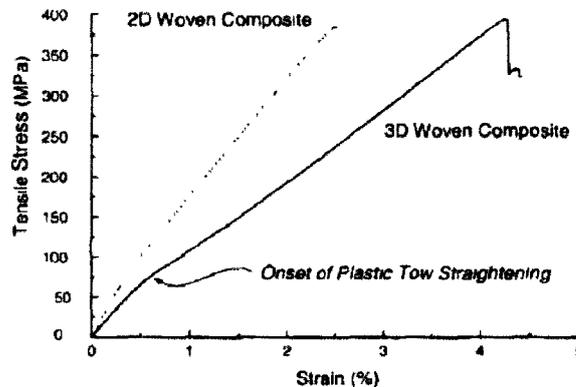


Figure 2. 13: Courbe résistance à la traction en fonction de la contrainte pour des composites 2D et 3D [14]

➤ *Résistance à la compression*

Tong *et al.* [14] ont montré que le module en compression des architectures 3D est légèrement moins important que pour les tissus 2D. Cette baisse est due aux ondulations et à la charge exercée sur les fils dans la direction de l'épaisseur. Les tissus 3D ont une faiblesse en compression axiale à cause des nœuds et des charges exercées sur les fils. Ce phénomène intervient quand la compression atteint ici 1400 MPa, pour induire une déformation plastique dans la résine à l'intérieur et au dessus d'un fil. Les fils entrent alors en rotation sous l'action de la charge jusqu'à ce qu'ils deviennent instables et cassent. Il est intéressant de noter que les composites 3D ont un comportement plus élastique en compression mais résistant à une charge plus faible que les composites 2D. [14] Cependant Hirokawa *et al.* [19] ont montré que les interlock orthogonaux présentent un meilleur comportement en compression que les tissus 2D du à un meilleur alignement des fils de chaîne et à la suppression du délaminage avec l'insertion du fil dans l'épaisseur des tissus.

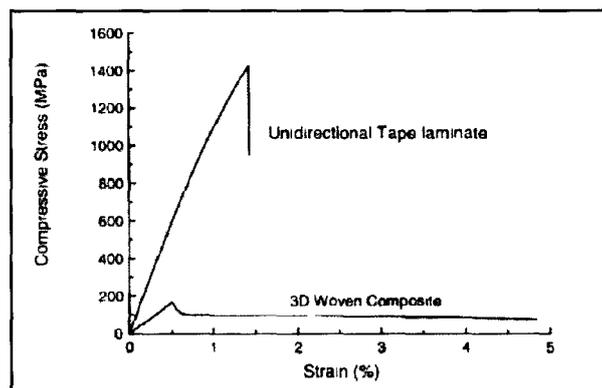


Figure 2. 14: Résistance à la compression d'un composite 2D et d'un composite 3D [14]

➤ *Les ruptures inter-laminaires*

L'un des avantages des tissus 3D par rapport aux tissus 2D réside dans la résistance au délaminage. Le délaminage des tissus 3D est caractérisé par le mode I (rupture en tension) et II (rupture en cisaillement). [14]

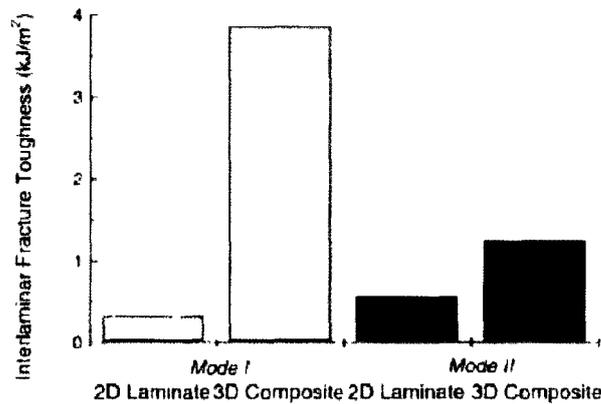


Figure 2. 15: Résistance inter-laminaire en mode I et II d'un tissu 2D et d'un tissu 3D [14]

La rupture en mode III (déchirement) n'est pas encore déterminée à cause de la difficulté de mise en œuvre du test de caractérisation.

Différentes études ont donc montré que la résistance en mode I des tissus 3D est supérieure à celle des tissus 2D. La résistance au délaminage est influencée par le taux de fibres dans la structure, le module élastique des fibres, leur résistance à la rupture et par une diminution de la résistance dans l'épaisseur bien qu'un fort taux de fibres dans cette direction soit un bon moyen de prévenir le délaminage.

Ainsi, lorsque le délaminage commence à se propager entre les plis du composites, la fissure passe aux alentours des fils dans la direction de l'épaisseur sans leur causer des dommages.

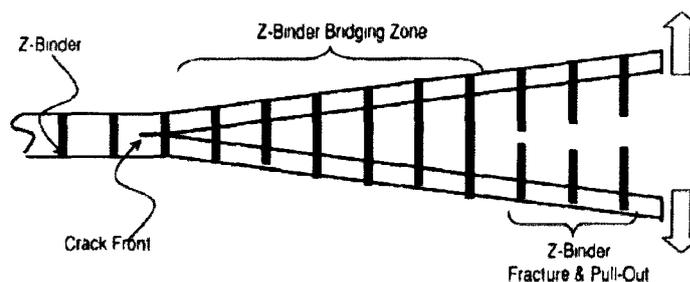


Figure 2. 16: Endommagement d'un fil dans la direction de l'épaisseur dit en Z pendant la phase de délaminage en mode I [14]

Tarnopol *et al.* [25] ont montré à travers l'étude d'un tissu 2D, d'un tissu 3D orthogonal et d'un tissu 3D à liage couche à couche que le module et la résistance en cisaillement dans le plan xy sont plus performants selon le classement suivant :

- Le stratifié 2D
- L'interlock à liage couche à couche
- L'orthogonal

Cependant, en cisaillement inter-laminaire les études menées par Brandt *et al.* [17] démontrent l'efficacité des tissus 3D et la diminution du délaminage en mode I. De plus en compression post impact les tissus 3D montrent leur intérêt par rapport aux tissus 2D par une augmentation de l'énergie d'impact.

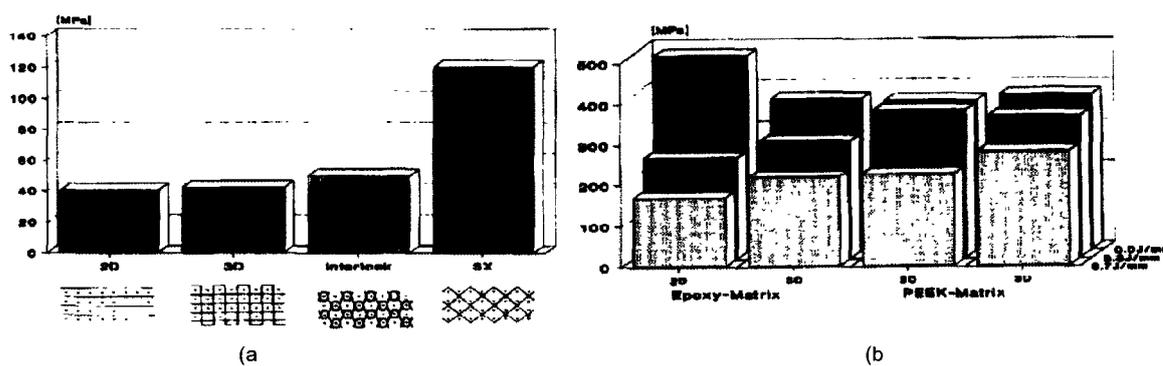


Figure 2. 17: a) Effet du renfort textile sur la contrainte inter-laminaire. b) Effet du renfort textile et de la résine sur la contrainte en compression post impact [17]

Ces différentes études nous ont permis de nous rendre compte de certains paramètres non négligeables :

- La diversité des champs de travail pour les textiles 2D et 3D
- La limitation des travaux de recherche et de publications sur les textiles 3D et leur diffusion

En effet, aucune étude sur les tissus 3D ne permet de faire une généralisation par type de tissage ni de définir complètement leurs avantages et inconvénients, surtout dans le domaine de la balistique et plus particulièrement à l'impact à haute vitesse. Afin de comprendre le comportement d'un matériau composite à base de renfort fibreux 3D soumis à l'impact, des études expérimentales doivent être réalisées. C'est pourquoi, notre étude vise à comprendre ces différents points en mettant en évidence que certains paramètres comme le taux de fibres, l'endommagement du matériau pendant le tissage et suivant l'évolution du fil dans les différentes structures, jouent un rôle prépondérant dans le mode d'endommagement des structures.

2. 2. MISE EN ŒUVRE DES TISSUS 3D

2.2.1. Introduction sur le tissage Interlock

L'application des tissus Interlock est limitée par le manque d'informations et de compréhension de leur procédé de tissage et des différents paramètres imposés. En effet, le tissage de structure Interlocks nécessite des adaptations de machines à tisser afin d'éviter des problèmes de « tissabilité » ou de géométrie de structures non conformes.... Il existe bien évidemment des entreprises parmi lesquelles 3Tex [26] et Shape 3 [27] qui développent de nouvelles machines adaptées au tissage Interlock. Ainsi, 3Tex a développé un procédé de tissage dans lequel les couches de fils de trame sont insérées simultanément dans les nappes de fils de chaîne, augmentant ainsi les vitesses de production. Cependant, peu d'informations sont données sur la compréhension du procédé de tissage ce qui ne nous permet pas aujourd'hui d'obtenir des méthodes à adopter pour le tissage Interlock sans endommagement des fils au sein de la structure. Seules des études à l'échelle laboratoire et des connaissances en tissage technique permettent d'en comprendre le principe.

Ainsi, le tissage de structures Interlocks se fonde sur la technique de tissage des tissus 2D. La première étape consiste à établir, à partir d'une géométrie de structure, la carte de générale du tissu répertoriant les évolutions des fils de chaîne et de trame. La seconde étape consiste à répartir le nombre de fils de chaîne exact sur le machine à tisser selon la densité exprimée en nombre de fils par centimètre choisie et la largeur de tissu désirée exprimée en centimètre.

Comme le montre la figure 2.18 suivante, le principe de tissage est presque équivalent pour les tissus 2D et 3D. Les éléments du métier comme les cadres, les lisses et l'insertion du fil de trame à travers la foule sont identiques. La différence majeure repose sur la distribution des fils de chaîne.

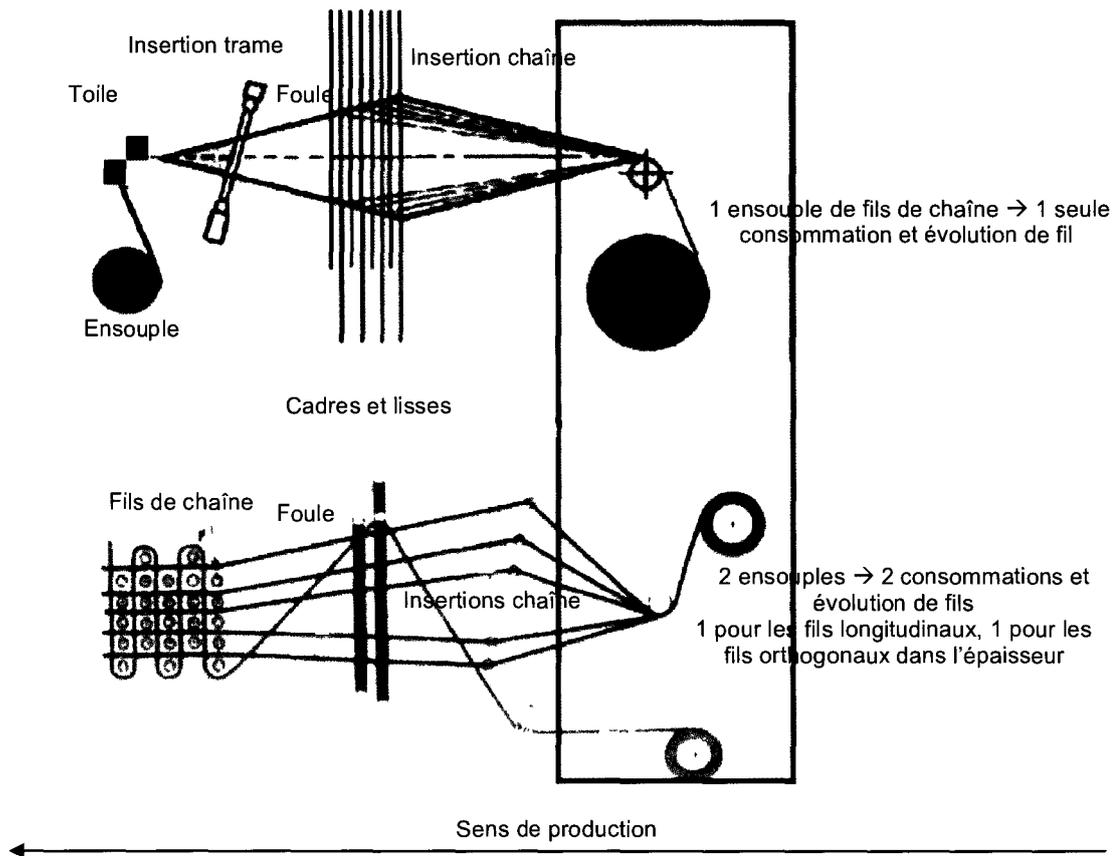


Figure 2. 18: Illustration du tissage 2D et 3D, cas d'un tissu 2D toile et d'un tissu 3D Orthogonal

2.2.2. Tissage des tissus interlocks, problèmes rencontrés, amélioration du procédé de tissage

Lors du tissage, les fibres subissent des dégradations relatives à leur manipulation, aux contacts avec les éléments de la machine mais aussi selon l'architecture du tissu 3D. Ce phénomène est d'autant plus accentué lorsque l'on tisse des tissus 3D puisque le nombre de croisements et d'ondulations de fils augmente avec l'introduction du fil dans l'épaisseur. Rudov-Clark *et al.* [24] ont ainsi montré qu'une fibre de verre composant un tissu Interlock 3D perdait jusqu'à 50 % de sa résistance à la rupture et 7 % pour son module. Cette perte de propriété peut être imputée à la fragilité de la fibre mais aussi aux différentes manipulations du fil durant le tissage 3D.

Lee *et al.* [28] ont étudié le comportement de fibres de carbone lors du tissage 3D. Ils ont mis en évidence la perte de ténacité à la rupture à hauteur de 12 % ainsi

que l'influence du matériel utilisé pour le tissage des structures Interlocks. Quelque soit le matériel utilisé, les fils subissent des abrasions dues au frottement avec la machine mais aussi des fils entre eux notamment lors du montage des fils de chaîne et l'ouverture de foule.

La géométrie des structures joue également un rôle important dans la dégradation des fils. Ainsi, Obaid *et al.* [29] ont montré qu'après le tissage, les fils peuvent subir jusqu'à 35 % de dégradations. Nauman *et al.* [30] ont étudié l'effet du tissage Interlock. Ils ont également remarqué que l'ouverture de foule et le mouvement des cadres endommageaient fortement les fils avec une perte de ténacité à la rupture de 42 %. Prenant en compte ces différentes observations, nous nous sommes intéressés à notre procédé de tissage et avons mesuré l'influence des étapes de préparation du fils Kevlar® de la réception du fil à sa mise en place sur la machine à tisser en considérant trois architectures de tissus 3D Interlocks.

De plus, toujours selon Clark *et al.* [19] le fil liant l'épaisseur est la principale source de distorsion des fils et de leur déplacement dans la direction chaîne et trame. La tension causée par l'insertion du fil liant entraîne des frottements entre les fils mais aussi des points de compression aux croisements des fils liants et des fils chaîne et trame comme le montre la figure 2.19. Ainsi, on remarque dans ces zones de compression, des placements de fils différents de ceux souhaités qui rendent la géométrie de l'interlock erronée, mais aussi des zones de vide. Ces zones seront ainsi propices à un fort taux de résine dans le cas d'une mise en œuvre composite future. Enfin, la présence de plis entre les fils varie d'une architecture à l'autre avec un degré plus ou moins important selon les paramètres de tissage appliqués. Ainsi, la façon de lier la structure mais aussi la pression utilisée lors de la mise en œuvre du matériau, les propriétés mécaniques du fil, sa densité linéique, vont influencer la présence de plis. Selon [19], l'insertion du fil liant dans la direction trame entraînera plus d'ondulations et de frottements que l'insertion dans la direction chaîne. C'est pourquoi nous nous appliquerons à insérer le fil liant dans la direction chaîne afin d'éviter toutes autres dégradations des fils durant le tissage.

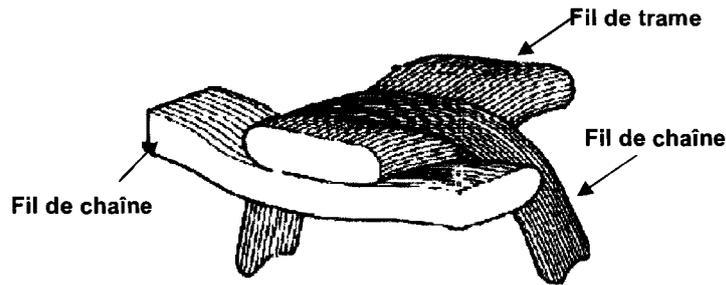


Figure 2. 19: Illustration de la compression des fils de chaîne liant avec les fils chaîne et trame du tissu

2.2.3. Mise en œuvre des tissus interlocks pour notre étude

2.2.3.a. Introduction

Notre étude vise à étudier le comportement des architectures Interlocks pendant le tissage, pendant leur mise en œuvre en tant que renfort de matériaux composites, et de pouvoir établir une corrélation entre les différents paramètres des architectures (masses, taux de fibres, densité chaîne et trame..) et leurs performances lors d'un impact balistique de type 20 FSP. Le nombre important de paramètres caractérisant une structure Interlock, nous a conduit à sélectionner des architectures spécifiques selon la figure 2.20, avec les paramètres suivants:

- 3 architectures Interlocks type O/L, O/T et A/L

Nous avons opté pour trois catégories d'Interlocks ayant chacun un liage et un nombre de couches différents (figures 2.21, 2.23 et 2.25).

- Deux fils hautes performances

Aramide type Kevlar® 29, 3300 dtex et polyester insaturé type Vectran® 2x1650dtex, retordu. Le choix du Kevlar® 29 s'est imposé de part l'utilisation majeure de ce matériau dans les blindages existants. L'utilisation du Vectran® permet de comparer les deux fils entre eux de part ses propriétés équivalentes pour un coût d'achat légèrement plus faible.

- Deux densités en fils de chaîne, 40 fils/cm et 20 fils/cm :

La densité en fils de trame étant dépendante du tissage à insertion manuelle de la trame.

- Comparaison avec deux matériaux existants

Un empilement de tissus toiles préimprégnés avec de la résine Phénolique / PVB à 12% de résine, en Kevlar® 29, 3300 dTex et un empilement de tissus toiles en Kevlar® 29, 3300 dTex, infusés dans les mêmes conditions que les Interlocks.

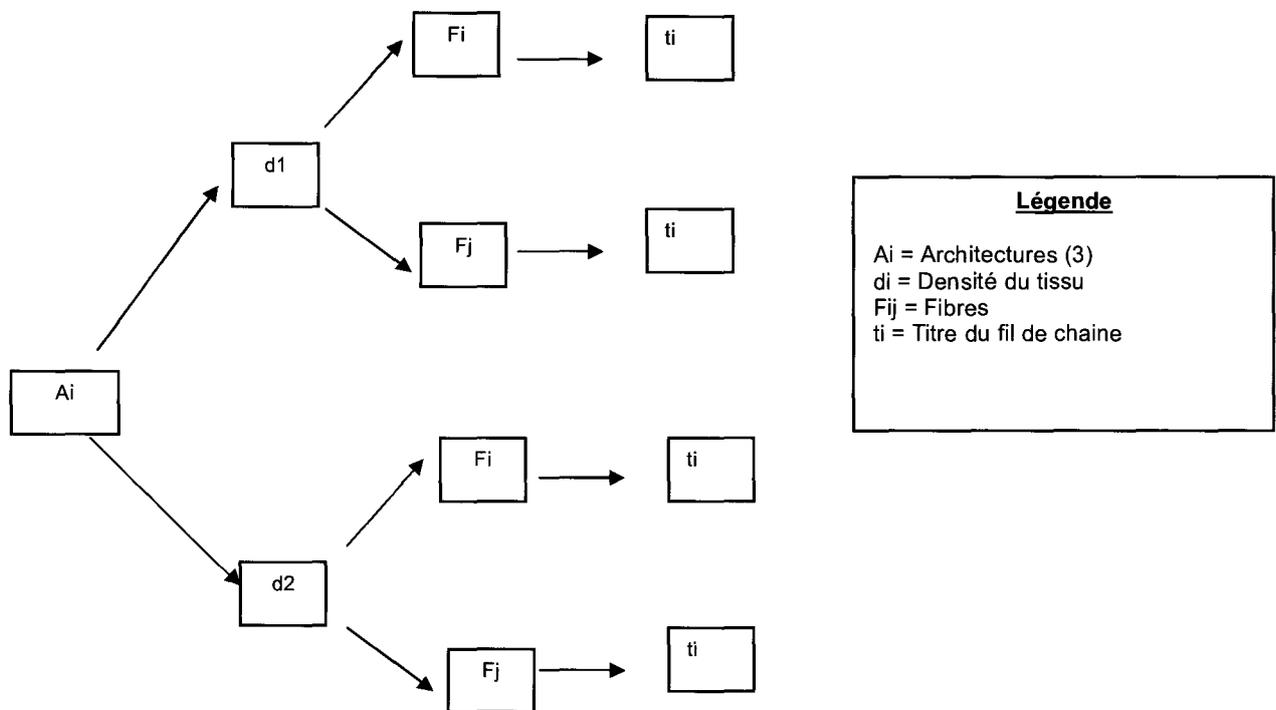


Figure 2. 20: Matrice des architectures à réaliser

2.2.3.b. Les renforts fibreux utilisés dans l'étude

Les renforts fibreux sont de trois types différents O/L, O/T, et A/T en fonction de leur géométrie. En effet chacune de ces architectures présentent une évolution de fils dans l'épaisseur ainsi qu'un nombre de couches différent. On distingue alors :

- L'Interlock « LtoL », 13 couches, 24 fils de chaîne présents dans le motif de répétition

L'interlock « LtoL » appartenant au groupe des O/L, permet de lier au moins deux couches entre elles. Les fils de chaîne traversent deux couches successives de fil de trame. Cela permet de limiter les ondulations tout en liant les couches entre elles. En comparaison du tissu 2D, nous avons ici un empilement de 13 tissus en armure toile dans une seule structure, deux tissus pouvant être considérés comme liés entres eux.

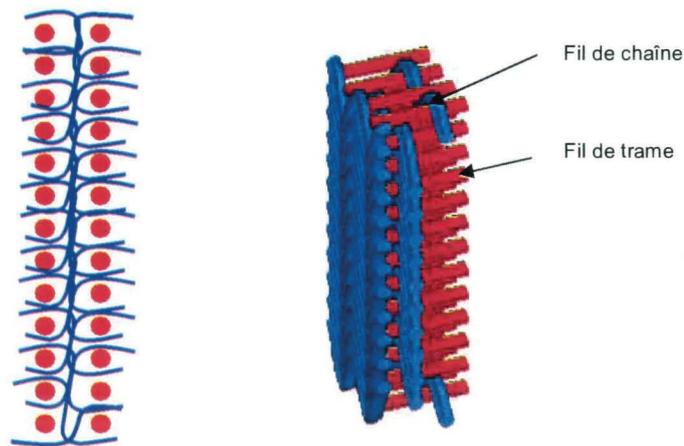


Figure 2. 21: Illustration de l'Interlock « LtoL », 13 couches [26]



Figure 2. 22: Illustration du liage dans un tissu 2D toile [26]

- L'Interlock « Ortho », 11 couches, 12 fils de chaîne (2+10) présents dans le motif de répétition

L'interlock « Ortho », du groupe des O/T, présente la particularité d'avoir deux fils symétriques qui traversent toute l'épaisseur de la structure les autres fils sont longitudinaux. Ces derniers ne présenteront pas d'ondulations fortes, comparés aux deux fils dans l'épaisseur. Ce sont eux qui apporteront majoritairement les propriétés mécaniques du tissu. Ce tissu se présente comme un assemblage de tissus unidirectionnels (UD) liés par deux fils de chaîne traversant l'épaisseur de la structure et présentant un liage « toile » en surface de celle-ci et des fils longitudinaux entre les couches afin d'apporter une résistance mécanique supplémentaire.

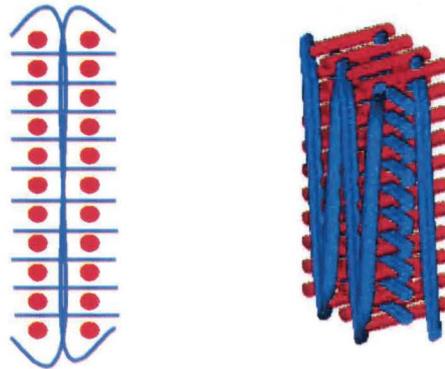


Figure 2. 23: Illustration de l'Interlock « Ortho », 11 couches [26]

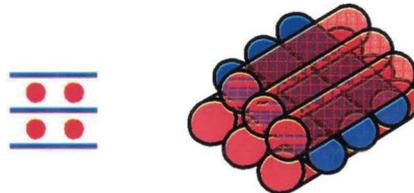


Figure 2. 24: Illustration du liage dans un tissu UD [26]

- L'Interlock « TtT », 6 couches, 12 fils de chaîne présents dans le motif de répétition

L'interlock « TtT » du groupe A/T, possède des fils de chaîne qui traversent toute l'épaisseur de la structure. Ce type d'armure peut présenter l'inconvénient d'avoir beaucoup d'ondulations et de croisements au niveau de ses fils de chaîne pouvant alors causer des dégradations de fils. C'est ce que nous essayerons de vérifier en comparaison des Interlocks « Ortho » et « LtoL ».

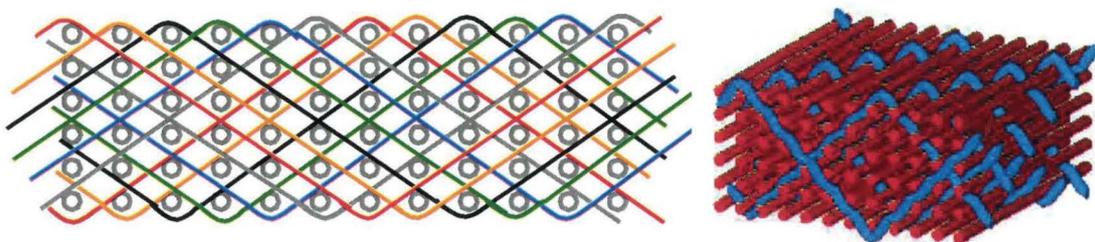


Figure 2. 25: Illustration de l'Interlock « TtT », 6 couches [26]

2.2.3.c. Tissage des structures Interlocks ; étude de la dégradation des fils et modifications de la machine à tisser

Nous avons vu au paragraphe 2.2.2 que le tissage Interlock n'était pas sans conséquences sur la dégradation des fils, d'une part à cause du frottement des fils sur les éléments du métier, du nombre plus important de fils présents dans les structures, comparé à un tissage bidimensionnel, mais aussi dû à la présence du renfort dans la troisième direction induisant des ondulations et des croisements de fils entre les couches des tissus.

Ces observations nous poussent alors à vouloir modifier certains éléments de la machine à tisser afin d'endommager le moins possible les fils. Cependant la modification de machine peut s'avérer être très coûteuse surtout lorsqu'il s'agit de machine de prototypage. Rudov *et al.* [36] montrent qu'une tension maîtrisée des fils de chaîne et notamment des fils liant l'épaisseur assure une géométrie d'architecture proche de celle souhaitée. Pour cela, un système individuel de tension des fils de chaîne doit être adopté ainsi qu'une séparation des nappes de fils selon leur évolution dans le plan et l'épaisseur du matériau. De plus, lors de la mise en œuvre sous forme de matériau composite, une mauvaise tension des fils pendant le tissage entraîne, lors de la compaction sous vide du matériaux, un réarrangement des fibres et donc une structure géométriquement inutilisable.

Ainsi, nous avons choisi d'utiliser plusieurs ensouples de fils de chaîne ayant chacun leur évolution propre dans le tissu (figure 2.26). Nous pouvons ainsi contrôler la tension de chaque nappe de fils de chaîne et obtenir des géométries proches de la définition de l'Interlock voulu. Nous avons également utilisé le principe des planches « d'empoutage » présentes sur des machines automatiques pour permettre une séparation des fils pendant le tissage, nous rendant la tâche plus aisée lors d'une casse de fil par exemple (figure 2.27). Enfin, une dernière interrogation s'est posée quant à savoir comment stocker le tissu après sa fabrication. En effet, sur une machine à tisser le stockage se fait par un système d'ensouple où le tissu final est enroulé à mesure qu'avance la production. Ce principe bien qu'efficace induit un empilement et un écrasement des tissus. Nous avons voulu éviter ce phénomène compte tenu des épaisseurs tissées ici, plus importantes que pour des tissus toiles classiques. De plus, certaines des architectures Interlocks étant plus déformables que d'autres, l'enroulement sur ensouple pourrait modifier la géométrie du tissu. Nous avons donc monté la machine à tisser sur des rails afin de tisser une très

grande longueur de tissus sans procéder à son enroulement. A mesure que le tissu se fabrique la machine glisse sur des rails jusqu'à une longueur donnée mais suffisante pour notre production. (figure 2.27).



Figure 2. 26:Mise en place du système d'ensouple pour délivrer le fil de chaîne



Figure 2. 27: Illustration du système de rail et des planches « d'empoutage »

Suite aux modifications de la machine, nous avons voulu étudier la dégradations des fils durant le procédé et vérifier qu'ils ne subissaient pas les conséquences de notre montage. De plus, nous avons comparé la dégradation des fils de chaîne et de trame présents dans les différents Interlocks une fois tissés afin de valider ou non le fait que les ondulations et croisement de fils induisaient une dégradation précoce des différentes structures.

Nous avons alors pris soin de tester nos fils durant divers étapes de mise en œuvre : dès la réception du fil, après application d'une torsion, après préparation des fils de chaîne, et après le tissage. Nous avons utilisé une machine de traction selon la norme NF EN ISO 2062. Le fil est placé entre deux mors à serrage manuel (figure 2.28). Le fil est étiré à une vitesse quasi statique à savoir 250 mm/min, avec une charge appliquée de 1 kN.

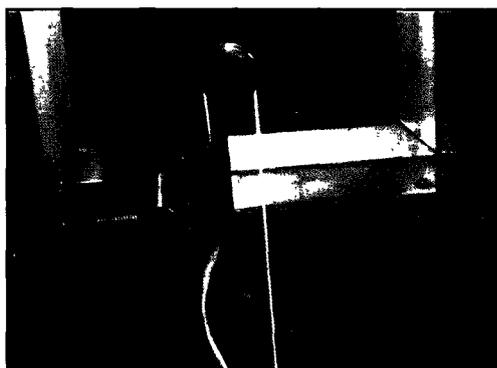


Figure 2. 28: Dispositif de serrage manuel sur la machine de traction utilisée pour nos tests

➤ Réception du fil : Une fois le fil réceptionné au sein du laboratoire, nous avons effectué des tests de traction en vitesse quasi statique. Nous pouvons constater une différence de 17 % pour la ténacité à rupture, de 32 % pour le module et un gain d'élongation à hauteur 40 % entre les données du fournisseur et celles mesurées.

➤ Application d'une torsion : Lors de précédentes études internes au laboratoire, nous avons remarqué que l'application d'une torsion apportait une cohésion supplémentaire au fils et empêchait la formation importante de fibrilles durant le tissage. Ces fibrilles empêchaient l'ouverture de la foule pour y insérer le fil de trame, rendant cette opération difficile et très dégradante pour les fils de chaîne. De plus, une mauvaise ouverture de foule impliquait des erreurs de tissage rendant la structure inutilisable et géométriquement non conforme. Ainsi, nous nous sommes assurés avant notre étude que la torsion appliquée sur nos fils n'endommagerait pas leurs propriétés.

➤ Préparation chaîne de la machine à tisser: Lors de la préparation des fils de chaîne (étape d'ourdissage et d'ensouplage), les fils sont soumis à diverses manipulations et parfois soumis à des tensions à haute vitesse. Aussi nous avons mesuré l'influence de cette préparation sur la perte de propriétés mécaniques des fils.

➤ Influence du tissage : Enfin la dernière étape de cette étude consistait à étudier l'influence du tissage 3D sur les fils de chaîne et de trame.

Les résultats de cette étude sont regroupés dans les figures suivantes:

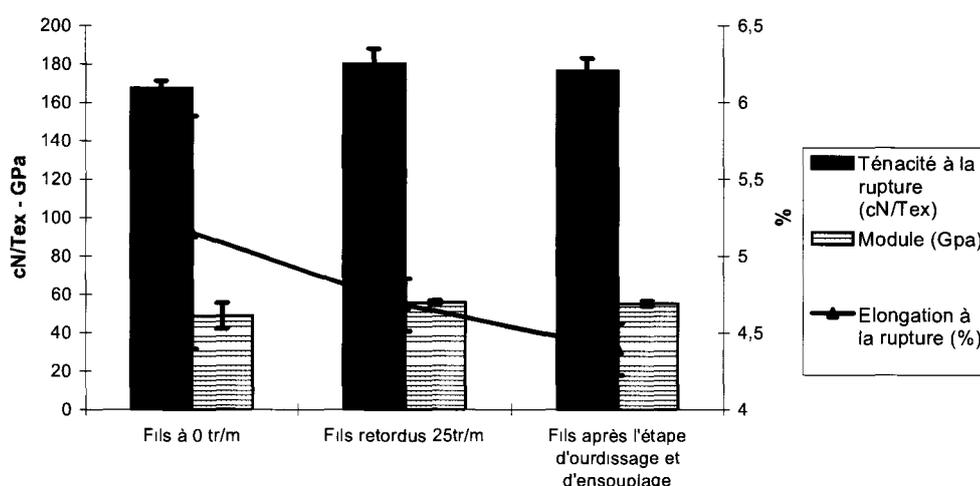


Figure 2. 29: Influence de la torsion et de la préparation du fil de chaîne Kevlar® sur les propriétés mécaniques du fil

Pourcentages de pertes comparées aux valeurs de l'étape 2 (torsion à 25tr/m)	Etape d'ensouplage et d'ourdissage	Fils de trame dans le liage type LtoL	Fils de chaîne dans le liage type LtoL	Fils de trame dans le liage type Ortho	Fils de chaîne dans le liage type Ortho	Fils de trame dans le liage type TtT	Fils de chaîne dans le liage type TtT
Ténacité à la rupture (cN/Tex)	2	2	10	8	5	6	5
Elongation à la rupture (%)	6	5	11	11	7	9	8
Module (Gpa)	1	3	3	3	16	4	2
Nombre d'échantillons	15	15	15	6	5	12	10

Tableau 2. 2: Influence de la structure sur les propriétés mécaniques des fils de chaîne et de trame pour les architectures interlocks en Kevlar® à 40 fils/cm

Nous remarquons une nette influence de la torsion, de l'ourdissage et de « l'ensouplage » sur les propriétés d'allongement du fil. L'ajout d'une torsion à hauteur de 25 tours par mètre (tr/m) a permis d'augmenter le module et la résistance à la rupture du matériau d'environ 10 cN/tex et de 10 GPa comblant ainsi les pertes occasionnées par la préparation du fil pour la machine à tisser, 1 % de perte pour la ténacité à la rupture et 2 % pour le module. Cependant l'ajout d'une torsion a des effets négatifs sur l'élongation qui diminue de 1 %. Cette perte peut être imputée au fait que la torsion apporte une cohésion aux filaments ce qui rigidifie le fil et empêche un allongement adéquat. Concernant les architectures, nous remarquons que les fils de trame de la structure type « LtoL » montrent un meilleur comportement que les autres structures pour la ténacité à la rupture avec une perte de 2 % contre 8 et 6 % pour « l'Ortho » et le « TtT ». Cependant cette structure est la plus dégradante pour les fils de chaîne avec 10 % de dégradation pour la résistance à la rupture.

Concernant l'élongation à la rupture, les fils de trame subissent de fortes dégradations dans la structure « Ortho » et « TtT » avec respectivement 11 et 9 % de pertes. Au contraire ce sont les fils de chaîne de la structure « LtoL » qui subissent une forte dégradation à hauteur de 11%.

Enfin le module des fils ne subit pas de fortes dégradations, sauf dans la structure « Ortho » où les fils de chaîne perdent 16% de la valeur initiale du module. On remarquera que la structure TtT endommage moins les fils. Ces observations seront en corrélation ou non avec les résultats balistiques dans la partie suivante. Les faibles valeurs de perte de module indiquent qu'un faible pourcentage de fibres dans les fils ont été cassées. Les pertes de propriétés observées pour la ténacité à la rupture peuvent être imputées au fait que les fibres subissent de fortes dégradations durant le tissage entre les frottements subis entre les fils et contre les éléments de la machine à tisser. L'abrasion engendrée a ainsi enlevé l'agent de surface des fils rendant les fibres très fragiles et cassantes. La casse des fibres contribue à la perte de résistance mais celle-ci peut être retrouvée en imprégnant le tissu final avec une résine adéquate qui favorise le transfert de charge entre la résine et les fibres

2.2.3.d. Caractéristiques des tissus Interlocks après tissage

Un tissu est souvent caractérisé par son poids, son épaisseur, sa densité en fils de chaîne et de trame, son retrait et son embuvage. La densité en fils de chaîne influe sur l'épaisseur finale du matériau ainsi que sur la masse surfacique. La densité en fils de trame influe sur le calcul de l'embuvage des fils de chaîne, l'embuvage étant la consommation en longueur du fil de chaîne dans le tissu.

Selon la « tissabilité » du matériau, un retrait plus ou moins important peut se créer sur le tissu. Le retrait est la différence entre la largeur finale du tissu, et la largeur initiale des fils sur ensouple. Un retrait trop important indiquerait que le tissu a des fils de chaîne au bord du tissu beaucoup trop tendus et donc fortement plus dégradés et susceptibles de rompre pendant la mise en œuvre mais aussi après. Le tableau 2.3 suivant indique ces différentes valeurs selon le type d'architectures Interlock.

A titre indicatif, il est également mentionné les caractéristiques des tissus témoins, pré-imprégnés et empilement de toile. Nous l'avons vu précédemment, l'Interlock « Ortho » est une structure complexe car c'est la seule où les fils de chaîne

traversent toute l'épaisseur de la structure pour lier les couches. Ainsi, on constate que les fils de chaîne orthogonaux présentent des fortes ondulations qui sont corrélées avec l'embuvage important mesuré après tissage.

Pour illustrer ce phénomène, la figure 2.30 montre l'état d'un fil de chaîne orthogonal prélevé entre les couches du tissu et un autre prélevé dans l'épaisseur. De plus à la vue des embuvages mesurés pour les structures « Ortho », on constate alors que le fil de chaîne longitudinal ne présente aucune déformation ni ondulation contrairement au fil de chaîne dans l'épaisseur qui lui ondule et a besoin de plus de longueur pour pouvoir être inséré dans toute l'épaisseur du tissu.



Figure 2. 30: Illustration de l'influence du tissage d'une structure orthogonal sur la consommation des fils de chaîne et de l'embuvage résultant

Les structures « TtT » souffrent également du liage dans l'épaisseur de la structure. Le fil de chaîne en plus de travailler dans l'épaisseur prend un chemin en diagonal au sein de la structure. Nous avons ici un embuvage plus faible que pour la structure « Ortho » du fait que nous travaillons ici en 6 couches. Nous pouvons alors nous demander quelles seraient les conséquences sur les ondulations des fils pour une structure « TtT » ayant beaucoup plus de couches.

Enfin, le faible embuvage des structures « LtoL » montre l'intérêt de ce liage afin de ne pas dégrader les fils de chaîne par les ondulations présentes dans les structures. Le liage progressif couche par couche permet de limiter la consommation des fils et les ondulations.

Nous avons vu dans la première partie de ce chapitre, que la présence d'ondulation était un facteur d'endommagement du matériau. Nous pouvons alors supposer que l'Interlock « Ortho » verra ses propriétés mécaniques à l'impact

diminuées suivi de l'interlock « TtT ». Cependant l'effet inverse se produira et nous verrons que d'autres paramètres interviennent dans les bonnes performances à l'impact de nos matériaux.

Cibles sèches										
Architectures Interlocks Kevlar® 29, 3300 dtex	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Embuvage fils de chaîne longitudinal x (%)	Embuvage fils de chaîne Z (%)	Densités fil de trame (duites/cm)	Retrait (%)	Masses surfaciques moyennes (kg/m²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Masse volumiques moyenne(kg/m³)
LtoL	40	Pas de fils de chaîne	1,6	52	2,6	2,9	0,1	5,3	0,0	547,2
	20		2,1	130	5,7	6,0	0,3	11,0	0,0	549,1
Ortho	40	0	66,8	55	0,5	3,9	0,3	6,8	0,2	571,0
	40	2	23,3	18	0,4	2,1	0,1	4,8	0,0	443,8
	20	3	14,2	42	0,0	1,8	0,0	4,0	0,0	445,0
TtT	40	Pas de fils de chaîne	8,3	40	1,3	2,3	0,1	5,8	0,0	393,1
	20		10,5	48	0,0	2,1	0,1	5,5	0,0	376,4
Architectures Interlocks Vectran® 2x1650 dtex	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Embuvage fils de chaîne longitudinal x (%)	Embuvage fils de chaîne Z (%)	Densités fil de trame (duites/cm)	Retrait (%)	Masses surfaciques moyennes (kg/m²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Masse volumiques moyenne(kg/m³)
LtoL	40	Pas de fils de chaîne	3,7	38	0,0	2,7	0,0	6,0	0,0	446,7
	20		0,0	130		4,3	0,0	8,7	0,3	494,3
Ortho	40	2	77,0	54		4,7	0,0	10,0	0,9	467,6
	20	1	63,4	53		2,5	0,0	5,7	0,3	438,0
TtT	40	Pas de fils de chaîne	10,5	28		2,2	0,1	6,5	0,2	332,3
	20		12,4	40		2,0	0,0	6,0	0,3	328,9
Préimprégné Toile Kevlar®	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Embuvage fils de chaîne (%)		Densités fil de trame (duites/cm)	Retrait (%)	Masses surfaciques moyennes (kg/m²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Masse volumiques moyenne(kg/m³)
11 plis	7	Non spécifié		7	Non spécifié	6,0	0,0	5,5	0,0	1090,9
15 plis	7		7	8,2		0,0	7,7	0,3	1069,1	
21 plis	7		7	11,4		0,0	10,5	0,5	1089,5	
Toile Kevlar®	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Embuvage fils de chaîne (%)		Densités fil de trame (duites/cm)	Retrait (%)	Masses surfaciques moyennes (kg/m²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Masse volumiques moyenne(kg/m³)
5 plis	7	Non spécifié		7	Non spécifié	2,0	0,0	3,4	0,0	588,2
11 plis	7		7	4,2		0,0	7,4	0,0	566,8	

Tableau 2. 3: Caractéristiques des tissus 3D Interlocks, et des tissus témoins après tissage ou assemblage

2.2.4. Mise en œuvre en tant que renfort de matériaux composites

Différents procédés de mise en œuvre existent, afin de s'adapter aux matériaux et aux contraintes de géométrie. Nos tissus étant d'épaisseur mais surtout de densités fibreuses variables, nous devons contrôler le plus possible le procédé. Nous avons donc préféré l'utilisation de la méthode d'injection sous vide de résine sans moule.

2.2.4.a. Mise en œuvre des structures *Interlocks*

Durant l'injection de résine sous vide (cf figure 2.31), le renfort textile est placé entre une bâche de support ne présentant aucun défaut de surface et un tissu d'arrachage en avant du tissu pour permettre un meilleur démoulage du matériau après infusion.

Une grille d'infusion est placée sur le dessus du renfort afin de répartir de façon homogène la résine et d'en faciliter son imprégnation.

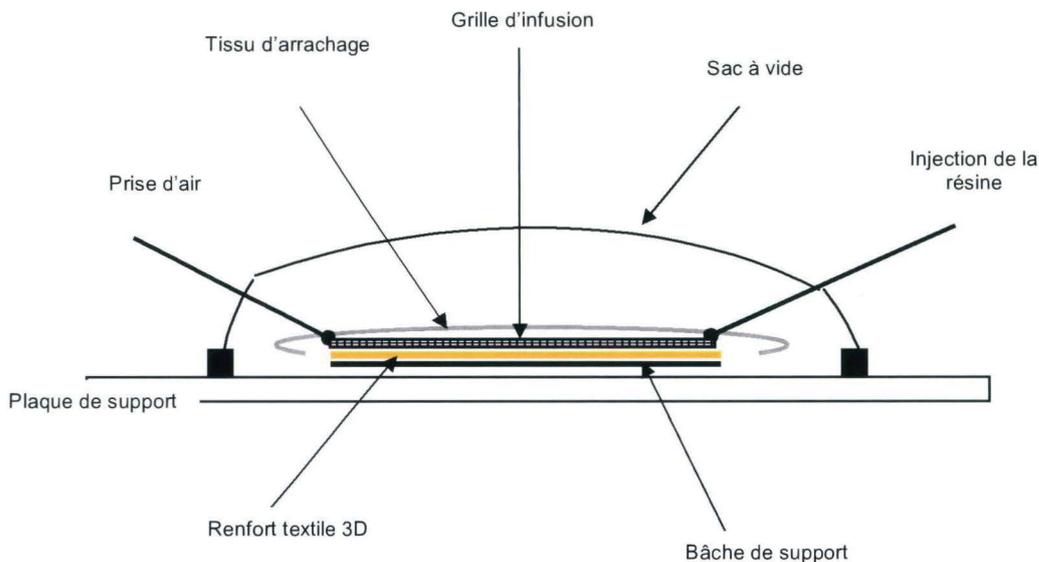


Figure 2. 31: Schéma de l'injection sous vide utilisée pour nos tissus *Interlocks*

Les tissus étant d'épaisseurs et de densités variables, ils ne présentent pas le même comportement à l'infusion. Nous avons ainsi des temps d'infusion variables et des taux de résine différents pour chaque architecture et densité. Afin de pouvoir comparer les taux de résine dans les structures nous avons injecté la même quantité de résine pour l'infusion des tissus *Interlock*. Cependant, lors de l'arrêt de l'injection

nous ne maîtrisons pas le pouvoir absorbant des tissus et la quantité restante en pot après l'arrêt de l'infusion.

Cependant, nous pouvons supposer que le flux de résine arrive à saturation lorsque le matériau est totalement imprégné en surface et en épaisseur, le surplus de résine est directement évacué par l'aspiration du vide.

Dans un premier temps, nous avons voulu préserver l'épaisseur et la géométrie des matériaux et ne pas appliquer une pression trop grande en l'occurrence 0,5 bar. Cependant, des taux massiques de résines importants nous ont poussé à revoir notre procédé. Nous avons donc atteint la capacité maximale de notre pompe à vide à savoir 1 bar de pression appliquée sur les tissus Interlocks.

Afin de comparer nos structures 3D, des matériaux témoins ont été réalisés suivant deux techniques d'infusion :

➤ Empilement de tissus pré-imprégnés

Ces matériaux sont utilisés en tant que renfort complémentaire en face arrière d'un matériau métallique pour du blindage de véhicules. Ces tissus se présentent sous la forme d'un tissu toile composé de fibre de Kevlar® 29, 3300 dTex. Ils sont imprégnés sur une seule face par de la résine Phénolique / PVB à hauteur de 12 % en masse. Les tissus sont mis en œuvre par autoclave sous 7 bars de pression, pendant 60 minutes et sous 160 °C.

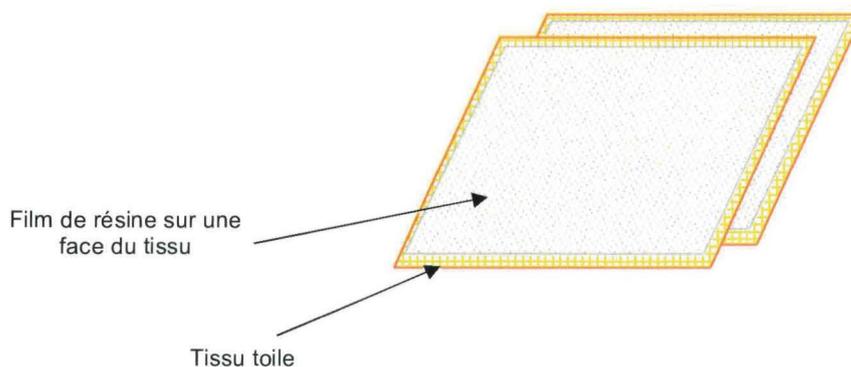


Figure 2. 32: Illustration de l'empilement de x plis de pré-imprégnés avant passage en autoclave

➤ Empilement de tissus toiles

La comparaison avec des tissus pré-imprégnés est intéressante car elle nous permet de nous rendre compte de la réalité et de l'avancée réelle du marché des matériaux composites pour le blindage de véhicule. Cependant, la mise en œuvre par autoclave est très différente de l'infusion sous vide utilisée avec les tissus Interlocks

notamment sur la pression utilisée pour infuser la résine. Aussi, d'autres tissus témoins qui consistent en un empilement de tissus toiles $[0/90]_s$ ont été infusés de façon identique aux structures 3D Interlocks. Les tissus utilisés sont composés de fils de type Kevlar® 29, 3300 dTex, et sont tissés selon l'architecture toile. Une fois les tissus empilés, nous les infusions sous vide selon les mêmes conditions que les tissus Interlocks.

Le schéma suivant synthétise l'ensemble des structures réalisées par ce procédé d'infusion.

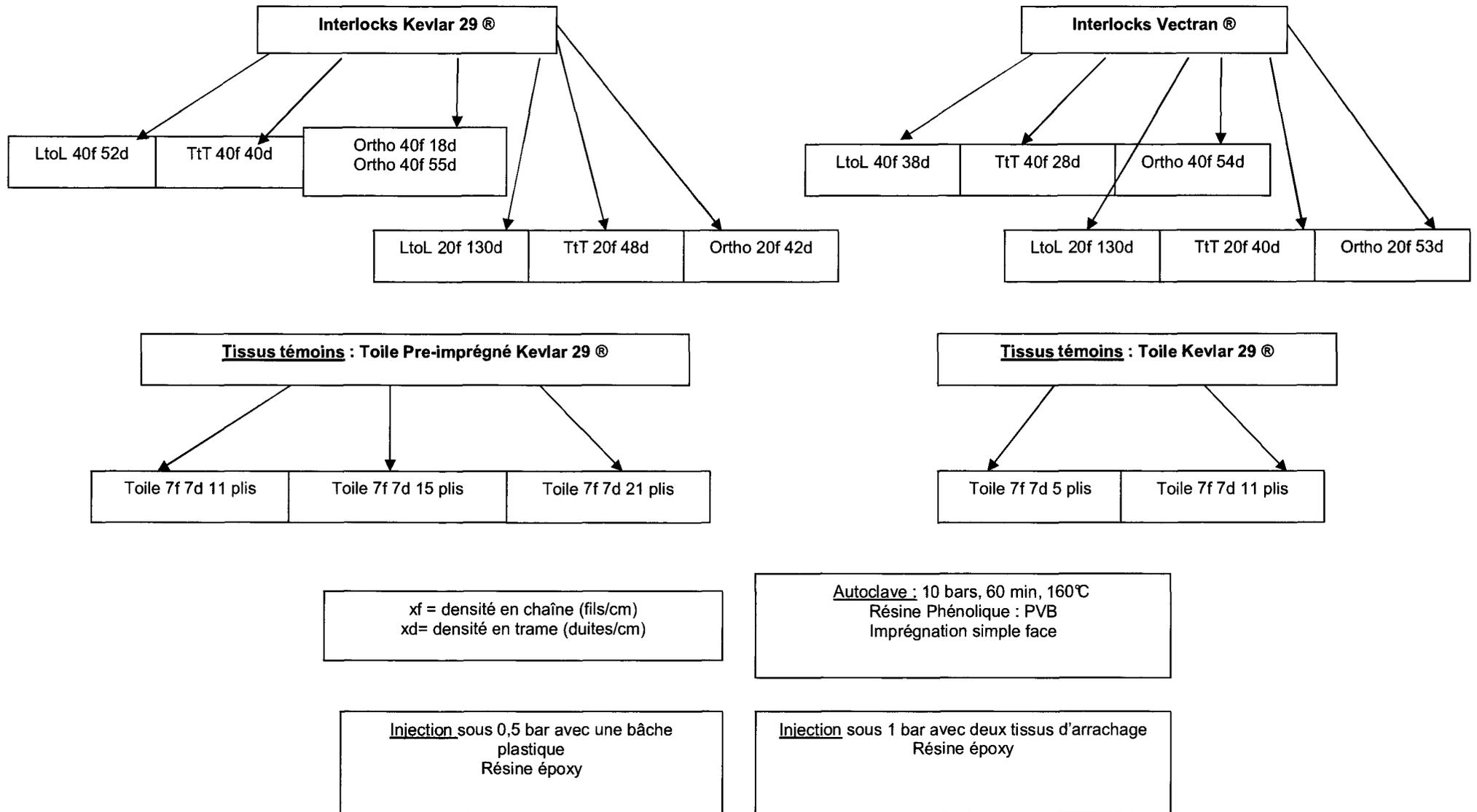


Figure 2. 33: Les différents procédés de mise en œuvre des renforts tissés Interlocks et témoins

2.2.4.b. Caractéristiques des matériaux obtenus

Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques des matériaux après infusion. Nous nous intéressons ici seulement à leurs masses surfaciques et leurs taux volumiques et massiques de fibres nommés respectivement « Tvf » (figure 2.34) et « Tmf » (figure 2.35) pour l'exploitation finale des résultats après impact. Le taux de vide n'étant pas déterminé ici, nous négligerons ce paramètre pour obtenir les valeurs de « Tvf » et « Tmf ».

$$Tvf (\%) = 1 - [(m_r/d_r)/(m_f/d_f) + (m_r/d_r)]$$

Figure 2. 34 : Calcul du taux volumique de fibres

Avec: m_r = masse de résine (g)

d_r = densité de la résine (g/cm^3)

m_f = masse de fibres (g)

d_f = densité de la fibre (g/cm^3)

$$Tmf (\%) = (m_c - m_s)/m_c * 100$$

Figure 2. 35 : Calcul du taux massique de fibres

Avec: m_c = masse du composite (g)

m_s = masse du tissu sec (g)

Le taux volumique de fibres pour les pré-imprégnés n'est ici pas connu du fait du manque d'informations lors de leur réception sur la densité de résine. Nous avons seulement une indication sur les taux massiques de fibres et de résine présents dans le composite final à savoir 88 % de taux massique de fibres.

Cibles composites										
Architectures Interlocks Kevlar ® 29, 3300 dtex	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Densités fil de trame (duites/cm)	Masses surfaciques moyennes (kg/m ²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Taux massiques de fibres (Tmf%)	Ecart type	Taux volumiques de fibres (Tvf %)	Ecart type
LtoL	40	52	5,6	0,2	5,0	0,2	52	2,4	45	2
	20	130	9,4	0,5	9,3	0,3	65	1,3	58	1
Ortho	40	55	7,2	0,3	7,1	1,1	55	1,9	48	2
	40	18	4,1	0,2	4,6	0,5	51	0,5	45	0
	20	42	3,4	0,2	3,7	0,3	53	1,4	46	1
TtT	40	40	5,9	0,7	5,8	0,8	39	3,5	33	3
	20	48	4,5	0,6	4,8	0,3	46	4,4	40	4
Architectures Interlocks Vectran ® 2x1650 dtex	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Densités fil de trame (duites/cm)	Masses surfaciques moyennes (kg/m ²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Taux massiques de fibres (Tmf%)	Ecart type	Taux volumiques de fibres (Tvf %)	Ecart type
LtoL	40	38	6,0	0,0	6,3	0,3	45	0,8	38	0
	20	130	7,5	0,2	7,4	0,2	57	0,3	50	1
Ortho	40	54	9,7	0,3	9,3	0,3	48	0,6	42	1
	20	53	5,1	0,4	5,3	0,4	49	2,7	42	3
TtT	40	28	5,3	0,2	5,5	0,1	41	1,5	35	1
	20	40	3,8	0,3	4,6	0,4	52	2,3	45	2
Préimprégné Toile Kevlar ®	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Densités fil de trame (duites/cm)	Masses surfaciques moyennes (kg/m ²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Taux massiques de fibres (Tmf%)	Ecart type	Taux volumiques de fibres (Tvf %)	Ecart type
11 plis	7	7	5,8	0,1	5,8	0,4	88	0,0		
15 plis	7	7	7,9	0,1	8,0	0,5	88	0,0		
21 plis	7	7	10,8	0,3	10,8	0,8	88	0,0		
Toile Kevlar ®	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Densités fil de trame (duites/cm)	Masses surfaciques moyennes (kg/m ²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Taux massiques de fibres (Tmf%)	Ecart type	Taux volumiques de fibres (Tvf %)	Ecart type
5 plis	7	7	3,0	0,0	3,0	0,6	70	0,5	64	1
11 plis	7	7	6,6	0,2	6,4	0,2	64	1,8	58	2

Tableau 2. 4: Caractéristiques des matériaux composites pour les tests à l'impact

2.2.4.c. Modification du procédé d'infusion

Suite aux paramètres après infusion des différents matériaux utilisés nous avons voulu, après les tests à l'impact (cf chap 3), augmenter le taux de fibres dans certaines architectures. Pour cela, nous avons utilisé le procédé d'infusion proposé par le PPE (Pôle de Plasturgie de l'Est) qui infuse le matériau tout en le compactant sous haute pression afin d'obtenir des taux volumiques de fibres souhaités en fonction de leur épaisseur. Les tissus Interlocks sont ainsi compactés sous une pression de 70 bars par tissu. Ce paramètre est commun à l'ensemble des pièces. En effet, à la vue de la diversité d'épaisseurs de préformes à réaliser un bridage en épaisseur n'est pas envisageable. La température d'infusion est fixée à 50°C pendant 8h afin de garantir la polymérisation suffisante de la résine. Les caractéristiques des matériaux après infusion au PPE sont présentées dans le tableau suivant.

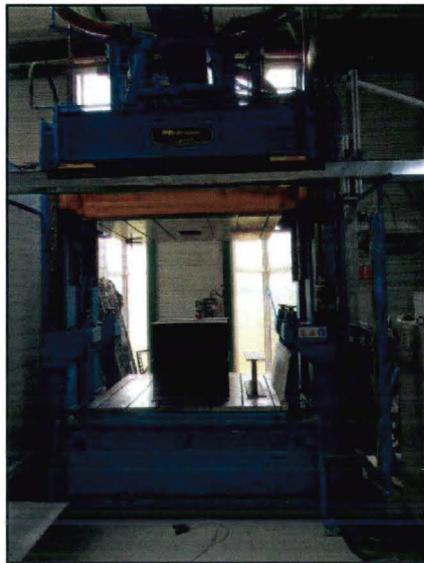


Figure 2. 36: Presse utilisée au PPE pour réaliser les matériaux à un Tvf % donné

Cibles composites après infusion au PPE											
Cibles	Interlocks	Densité fils de chaîne (fils/cm)	Densités fil de trame (duites/cm)	Masses surfaciques moyennes (kg/m ²)	Ecart type	Epaisseurs (mm)	Ecart type	Taux massiques de fibres (Tmf%)	Ecart type	Taux volumiques de fibres (Tvf %)	Ecart type
E	TtT	20	40	3,1	0,11	2,80	0,26	76,10	1,50	71,00	0,02
F	TtT	20	48	2,9	0,06	2,87	0,12	68,00	0,03	73,40	2,50
G	Ortho	20	42	2,8	0,25	2,73	0,21	63,00	0,01	69,60	1,10
H	Ortho	20	53	4,3	0,19	3,67	0,29	67	0,01	73,2	0,8

Tableau 2. 5: Caractéristiques des cibles après infusion au PPE

2. 3. CONCLUSION CHAPITRE 2

Le chapitre 1 présentait les différents matériaux existants dans le domaine d'application de la protection ainsi que leur comportement à l'impact. Nous l'avons vu, le comportement mécanique à l'impact d'un matériau composite entraîne des phénomènes complexes qui dépendent essentiellement du renfort textile utilisé qu'il soit tissé, tricoté, bidimensionnel ou tridimensionnel.

Ce second chapitre s'axe plus sur les matériaux composites à renforts tissés 3D utilisés dans le domaine du blindage. L'analyse bibliographique effectuée sur les renforts tissés 3D dits Interlocks révèle le réel potentiel de ces tissus pour des applications à haute résistance mécanique. Cependant ces études restent incomplètes. En effet, soit les tissus Interlocks présentés ne sont pas clairement définis notamment dans le nombre de couches présentes, la géométrie du liage ou encore les densités en chaîne et trame, soit le domaine d'étude est à l'échelle

laboratoire et ne correspond pas à la vitesse de sollicitation qui nous intéresse, ce qui ne nous renseigne pas sur le comportement à l'impact dans nos conditions d'utilisation. Les différentes études répertoriées dans ce chapitre nous permettent d'avoir une vue globale sur le comportement des tissus Interlocks mais nous devons ici nous focaliser sur plusieurs types d'architectures afin d'en comprendre le mécanisme correspondant aux vitesses d'impact de notre étude. En effet à la vue de ces études, nous pouvons nous demander s'il existe une structure universelle répondant à différents critères relatifs aux applications données. Les différentes observations faites durant ce travail de recherche nous poussent à envisager le contraire, et à devoir étudier pour chaque application et performances mécaniques souhaitées, quelle architecture est la plus adaptée.

La seconde partie de ce chapitre se consacre à la mise en œuvre des tissus Interlocks. Nous avons vu que le tissage n'était pas sans conséquence sur la dégradation des fils et que différentes précautions étaient à prendre dans le cas d'un tissage 3D. Les différents frottements inter-fibres et l'introduction du fil dans l'épaisseur influent sensiblement l'aspect final du fil et ses propriétés. En effet le fil dans l'épaisseur aura plus de point de contact avec les autres fils et plus de croisements ce qui induira des endommagements visibles et mesurables sur les fils. Nous avons également détaillé les différents matériaux utilisés pour notre étude, de leur fabrication à leur mise en œuvre sous forme de matériaux composites. Un ensemble de solutions composites a été ainsi réalisé, tout en s'assurant de la mise en œuvre depuis le fil sur bobine jusqu'à l'infusion, afin de fournir des protections différentes pour les essais balistiques en association avec un matériau métallique structurant.

Le chapitre 3 détaillera les différents résultats obtenus lors des essais balistiques réalisés sur les structures composites fabriquées. Ces structures seront placées en arrière d'une plaque métallique dont le comportement à l'impact est connu.

2. 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2

- [1] Abir Al Maghribi, comportement des matériaux composites à fibres courtes : application à l'impact basse vitesse, thèse de doctorat soutenue le 26 Septembre 2008, ISAE, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.
- [2] Eric Ayax, « caractérisations expérimentales et modélisation du comportement d'une plaque composite tissée en régime balistique » thèse ENSAM soutenue en Juillet 1993,
- [3] B-A. Gama, J-W. Gillespie "Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites" Composite Structure vol 86 pp 356-369, 2008
- [4] Mehlman, Vasudev, "A comparative study of the ballistic performance of glass reinforced plastic materials, SAMPE Quaterly, Vol 18, N°4, pp 43-48, 1987
- [5] Bhatnagar, Lin, Chang, "Ballistic energy absorption of composites", 22nd International SAMPE Technical Conference, pp 1-13, 1990
- [6] Hsieh, Mount, Jang, Zee , "Response of polymer composites to high and low velocity impact", 22nd International SAMPE Technical Conference, pp 14-27, 1990
- [7] Cuniff, Song, Ward, "Investigation of high performance fibers for ballistic impact resistance", 21st International SAMPE Technical Conference, pp840-851, 1989
- [8] <http://www.teijinaramid.com>, consulté le 17 Septembre 2011
- [9] http://www2.dupont.com/Law_Enforcement_and_Military/en_US/, consulté le 17 Septembre 2011
- [10] <http://www51.honeywell.com/sm/afc/ind-apps-details/armor.html>, consulté le 17 Septembre 2011
- [11] <http://www.dyneema.com/> consulté le 17 Septembre 2011

[12] V.I Kostikov, "Fibre science and technology" Edition Chapman&Hall, ISBN 978-0412584404

[13] Laura Balea, Gilles Dusserre et Gérard Bernhart « Composites à renfort tricoté : Relations entre contexture, nature du renfort et propriétés mécaniques du composite infusé », Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers 2011

[14] L.Tong, A-P Mouritz & M-K. Bannister, « 3D fibre reinforced polymer composites » ISBN 0-08-043938-1 Elsevier science, 2002

[15] Julian HU, "3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structures", WP number 74, ISBN 978-1-84569-377-0, 2008

[16] Christiane El Hage, « Modélisation et comportement élastique endommageable de matériaux composites à renforts tridimensionnels », thèse soutenue en Octobre 2006, à l'Université technologique de Compiègne

[17] J.Brandt, K.Drechsler & FJ.Arendts, "Mechanical Performance of composites based on various three dimensional woven fibre preforms" Composites sciences and technology Vol 56, pp 381-386, 1996

[18] S. Lomov, A-E.Bogdanovich, D-S.Ivanov, D.Mungalov,M.Karathan & I.Verpoest , "A comparative study of tensile properties of non crimp 3D orthogonal weave and multi layer plain weave e-glass composites. Part1: Materials, Methods and Principal Results" Doi: 10.1016/j.composites.2009.03.012

[19] Shoshanna D. Rudov-Clark, "Experimental Investigation of the tensile properties and failure mechanism of three-dimensional woven composites", School of Aerospace Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, these soutenue en Mars 2007

[20] Julian HU, "3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structures", WP number 74, ISBN 978-1-84569-377-0, 2008

- [21] A.E. Bogdanovich, M.H. Mohamed, "Three dimensional reinforcements for composites", SAMPE journal, vol 45, pp 8-28, 2009
- [22] F. Boussu, X. Legrand, A. Serret, "General clustering of warp interlock structures", proceeding of ITMC International Conference, Casablanca November 2007
- [23] Wisetex software, developed by Stepan Lomov, Department MTM, Katholieke Universiteit Leuven, 2005
- [24] S.Rudov-Clark, A.P.Mouritz, L. Lee, M.K. Bannister. Fibre damage in the manufacture of advanced three dimensional woven composites. Composites part A 2003; 34: 963-970
- [25] Tarnopol'skii, Y.M., V.L. Kulakov, and A.K. Aranautov, "Measurements of shear characteristics of textile composites". Computers & Structures, 2000. **76**(1-3): pp. 115-123.
- [26] <http://www.3tex.com/> Consulté le 27/07/11
- [27] http://shape3.com/Frameset_Shape3.htm Consulté le 27/07/11
- [28] B. Lee, K.H Leong, I. Herszberg. The effect of weaving on the tensile properties of carbon fibre tows and woven composites. Journal of reinforced Plastics and Composites, 2000; 20 pp 652-670
- [29] Abu Obaid, A., Andersen, S.M., Gillespie Jr., J.W., Dickinson, B., Watson, A., Chapman G., Coffelt. R. A. Effects of Weaving on S-2 Glass™ Tensile Strength Distribution (3TEX, Inc.). In: Proceeding of TEXCOMP 09 Conference. Delaware, October, 2008. pp.78-88
- [30] S. Nauman, F. Boussu, I. Cristian, and V. Koncar. Impact of 3D woven structures onto the high performance yarn properties. In: 2nd ITMC conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation, Casablanca, November, 2009.

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3 : Caractérisation et optimisation des structures tissées Interlock à l'impact

Ce chapitre fait état des différentes campagnes de tirs effectuées dans le cadre de notre étude. Ces tests s'appuient sur la détermination de la vitesse limite de perforation (Vlp) de chaque cible. Suite à la diversité des structures produites, nous avons mis en place un critère de comparaison. Ce critère se rapproche plus d'une évaluation des performances énergétiques que balistiques et permet ainsi de comparer les matériaux composites à masses équivalentes. On obtient alors un panel de résultats selon différents paramètres de tissage et de mise en œuvre. Cela nous permet alors de positionner certaines structures Interlocks, en l'occurrence « Ortho » et « TtT » comme des structures équivalentes aux structures préimprégnées ou toiles, utilisées comme référence dans ce travail de recherche. Par ailleurs, nous avons mis en évidence l'importance de la maîtrise de la mise en œuvre des renforts tissés afin d'obtenir des matériaux très secs (à fort taux de volume de fibres) pouvant alors se déformer pendant l'impact, comportement similaire aux tissus préimprégnés.

3. 1. INTRODUCTION

Nous avons vu au chapitre 1 et 2, l'importance de bien définir le contexte de notre étude à savoir les différentes menaces rencontrées, les protections existantes et émergentes. Ces dernières représentent un réel challenge dans les différents domaines concernés à savoir le textile et la protection balistique. Nous avons ainsi vu que les structures Interlocks tissées peuvent représenter un avantage non négligeable pour une utilisation à l'impact. Cependant, peu d'informations circulent ou permettent une compréhension complète des phénomènes d'impact. En effet, soit les caractéristiques du tissu viennent à manquer, ce qui a une réelle influence sur le comportement à l'impact du matériau, soit les gammes de vitesses sont faibles et ne correspondent pas au domaine étudié ici.

Enfin, nous avons vu dans la seconde partie du chapitre 2 les différentes structures étudiées ainsi que leur mise en œuvre au niveau du tissage mais aussi de leur infusion. Nous avons également fait mention de l'influence du procédé du tissage sur la dégradation mécanique des fils qui pourra être corrélée avec les résultats d'impact.

Ce dernier chapitre fait mention des différents essais réalisés qui correspondent à une menace précise. Nous avons essayé de balayer un ensemble d'architectures rencontrées dans la bibliographie et qui méritent une étude plus poussée. Nous avons du faire des choix concernant les densités chaîne et trame choisies, les fils utilisés, la géométrie des matériaux notamment au niveau du liage et du nombre de couches. Nous verrons tout d'abord la démarche entreprise pour déterminer les conditions à l'impact ainsi que l'interprétation des résultats obtenus. Nous essayerons alors d'établir une corrélation entre la géométrie des tissus, les différentes étapes de mises en œuvre (préparation du fil, tissage, infusion) et les résultats obtenus. Nous verrons alors que la mise en œuvre et la géométrie du tissu peuvent avoir une influence sur le comportement à l'impact des différents matériaux.

3. 2. COMPORTEMENT A L'IMPACT DES STRUCTURES MULTICOUCHES DANS LE CAS D'UN LINER

3.2.1. Les tests à l'impact

Les essais ont été menés au Banc National d'Epreuve (BNE) de Saint Etienne à l'aide d'un canon à poudre, avec une munition de 20 mm FSP dont le schéma est disponible au chapitre 1, figure 1.4, tirée à différentes vitesses afin de déterminer la vitesse de perforation de chaque panneau balistique (V_{lp}). Seule la vitesse d'impact est mesurée. Les cibles sont constituées d'un bloc d'aluminium à blindage en face avant, sur lesquelles ont été fixés les panneaux composites. Une feuille d'aluminium est placée en arrière. Sur la figure 3.1, nous pouvons voir différents canons à poudre utilisés pour les tests d'impact.

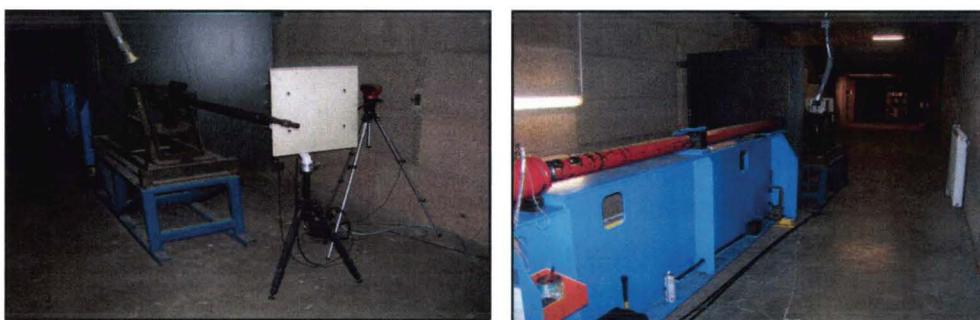


Figure 3. 1: Présentation du tunnel de tir au Banc National d'Epreuve (BNE)

Les différents essais ont été menés en fonction des disponibilités du laboratoire de tirs mais aussi selon la production des cibles. Ainsi, nous avons effectué trois campagnes de tirs selon le schéma suivant. Contrairement à de nombreuses configurations d'essais en dynamique sur les composites, il n'est pas ici possible de tester plusieurs fois la même configuration. En effet, les temps de production des échantillons constituant les éprouvettes testées sont très longs selon un schéma de production de prototypes sur machine à tisser à insertion manuelle à faible vitesse. D'autre part, dans ce type d'expérimentation, il est primordial de pousser les essais jusqu'à l'obtention d'une vitesse limite de perforation. En phase d'industrialisation, la vérification d'une même configuration reproductible pourra être envisagée.

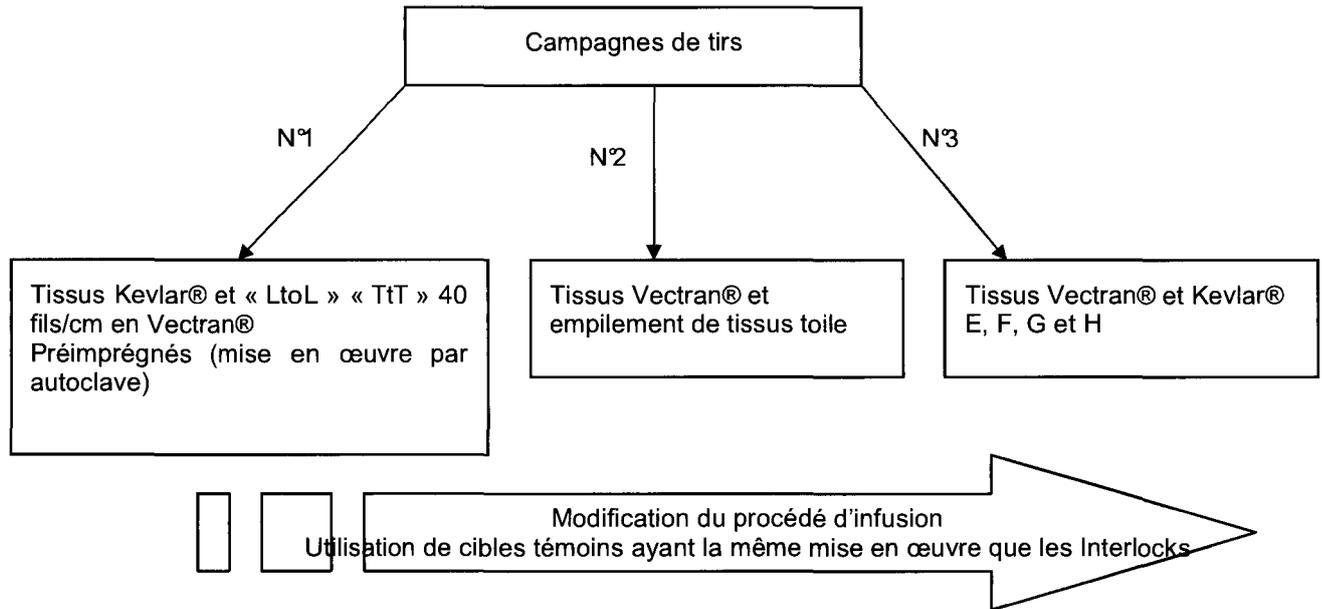


Figure 3. 2: Schématisation des différentes campagnes d'essais pour notre étude

La première campagne repose principalement sur les tests à l'impact des matériaux en fibres de Kevlar® infusés sous vide basse pression avec de la résine époxy. Cette campagne a été aussi l'occasion de tester les premiers échantillons témoins de tissus préimprégnés.

La seconde campagne s'est portée sur les structures en Vectran® dont le procédé d'infusion a été ajusté suite à la première campagne de tirs. En effet, nous nous sommes aperçus que les premiers échantillons infusés présentaient des taux de résine bien trop importants notamment dus à la présence d'une couche de résine en surface du matériau pendant l'infusion. Ainsi, nous avons appliqué un tissu d'arrachage sur les deux surfaces du matériau afin d'avoir un tissu plus sec en absorbant plus de résine. Nous verrons alors que ces matériaux présentent une légère différence sur les taux massiques et volumiques de fibres. De plus, nous avons voulu comparer les structures avec des tissus ayant eu le même procédé d'infusion, c'est pourquoi, nous avons composé des cibles à base d'empilement (orientation 0-90°) de tissus toiles Kevlar® de même densité linéique de fils. Les infusions se sont déroulées dans les mêmes conditions afin de pouvoir comparer les différences de taux volumiques de fibres ainsi que les résultats obtenus à l'impact.

La dernière campagne de tests repose sur l'idée que des tissus très secs comme les préimprégnés ont l'avantage de se déformer plus facilement à l'impact entraînant alors une absorption d'énergie plus importante. Suite aux deux

précédentes campagnes, nous avons sélectionné deux tissus Interlocks en l'occurrence le « TtT » Vectran® 20 fils/cm et « l'Ortho » Kevlar® 20 fils/cm, afin d'obtenir des taux massiques de fibres proches des préimprégnés. Nous avons alors fait le choix de comparer ces deux structures avec leurs homologues en Kevlar® et Vectran®. (Échantillons E à H). Ces structures ont été pressées au PPE afin d'obtenir des taux massiques de fibres très élevés. Nous verrons alors que cette modification du procédé n'a pas été sans conséquences pour la géométrie du matériau mais également pour ses propriétés balistiques finales.

Nous essayons de comprendre ici le comportement à l'impact des structures Interlocks choisies. Nous avons choisi d'effectuer trois tests à l'impact sur trois structures interlocks identiques afin de déterminer la vitesse limite de perforation (V_{lp}) de chaque structure. Nous procédons alors par dichotomie selon les résultats à l'impact obtenus pour cibler une nouvelle vitesse d'impact pour la seconde cible (cf figure 3.3). La vitesse limite de perforation est alors calculée sur la moyenne des vitesses ayant perforées la cible et celles pour lesquelles le projectile a été arrêté. L'idéal ici aurait été d'avoir au moins cinq cibles afin de réduire l'écart type entre les vitesses d'impact mais dans la plupart des cas nous avons réussi à réduire cet écart et nous rapprocher de la vitesse limite de perforation.

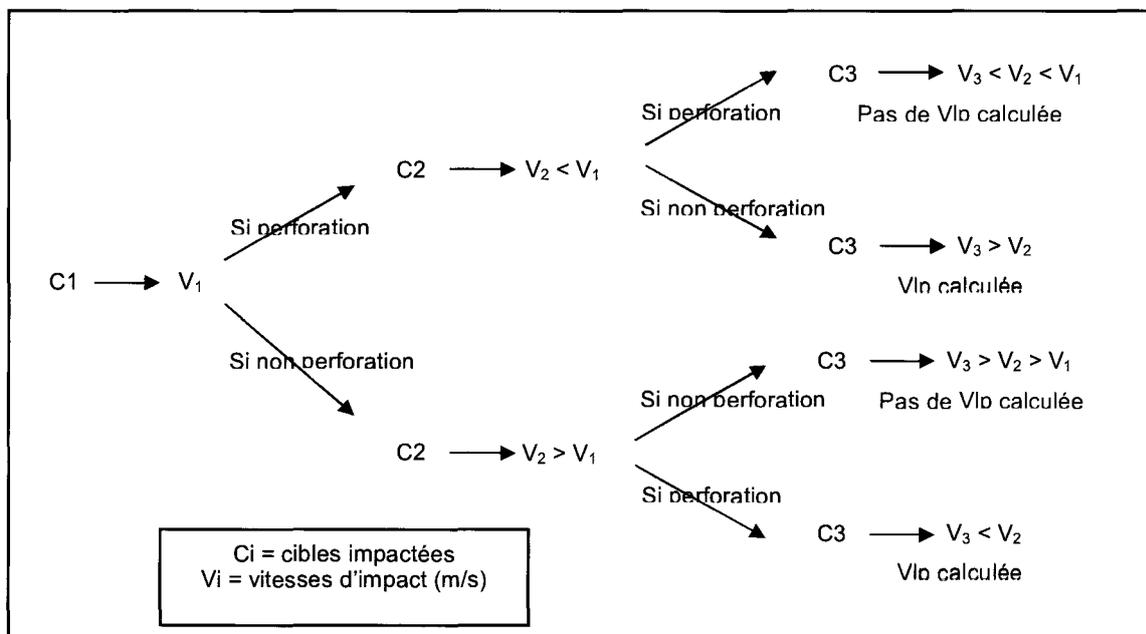


Figure 3. 3: Détermination des vitesses d'impacts choisies pour le calcul de la vitesse limite de perforation

3.2.2. Modes d'endommagement des structures après impact

Au cours des différentes campagnes d'essais, nous avons observé différents modes d'endommagements des tissus pendant l'impact.

Avant cela il nous faut comprendre le comportement à l'impact du matériau métallique placé en avant du matériau fibreux. Le matériau métallique, un aluminium à blindage référencé, permet de fragmenter le FSP pendant l'impact. Ce matériau possède une V_{lp} donnée quelque soit la vitesse d'entrée du projectile. Durant l'impact, trois cas d'endommagement peuvent se produire.

➤ Cas de l'arrêt du projectile par l'aluminium : ce cas se produit lorsque la vitesse du projectile correspond à la V_{lp} du matériau métallique.

➤ Cas de l'arrêt avec éjection d'un bouchon : ce cas se produit lorsque la vitesse d'entrée est supérieure à la V_{lp} de l'aluminium. Ainsi le projectile pénètre dans le matériau métallique et le perce en éjectant un bouchon d'aluminium correspondant à la matière érodée durant l'impact. Le liner fibreux joue alors tout son rôle, en contrôlant la pénétration de ce bouchon (figure 3.4).

➤ Cas de la perforation de la plaque : ce cas se produit lorsque la vitesse d'entrée est supérieure à la V_{lp} de l'aluminium et que le matériau fibreux ne réussit pas à ralentir l'éjection du bouchon. On observe alors une déformation de l'aluminium en forme de pétales de fleurs (figure 3.5).



Figure 3. 4: Cas de l'arrêt du projectile dans l'aluminium avec formation de bouchon à l'arrière



Figure 3. 5: Cas de la perforation de la plaque avec la formation d'un cratère « pétales de fleur »

Une fois le comportement à l'impact du matériau métallique compris, nous pouvons nous intéresser aux différents cas de déformation de chaque structure textile. Nous verrons que les déformations ne dépendent pas forcément des architectures mais aussi des taux massiques de fibres dans les structures qui permettent d'avoir des déformations plus ou moins importantes.

Nous distinguerons alors quatre cas de déformation :

➤ Cas 1

Il correspond à ce que l'on pourrait appeler un cisaillement des fils dans la direction chaîne et trame des structures quelque soit la vitesse d'impact.

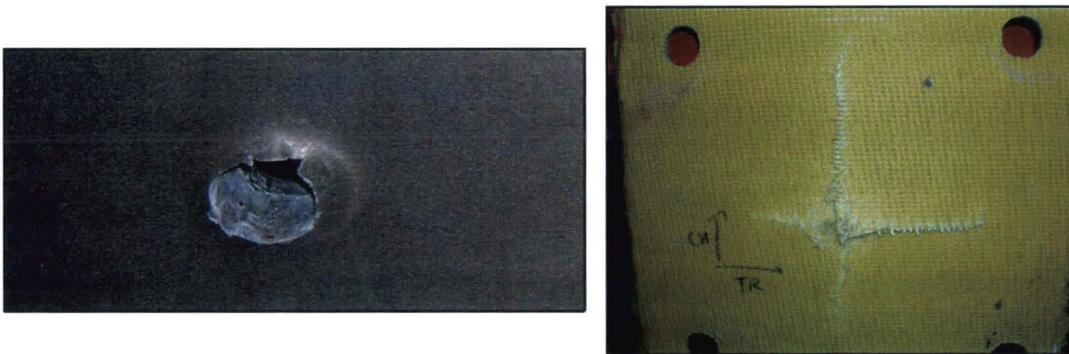


Figure 3. 6: Illustration de l'endommagement suivant le cas 1, avec l'exemple du « TtT » 40 fils/cm 40 duites/cm avec une $V_e = 640$ m/s

➤ Cas 2

Il laisse penser à un endommagement suivant un cône de déformation localisé dans la zone d'impact. Plus la cible sera sèche plus la déformation sera importante.

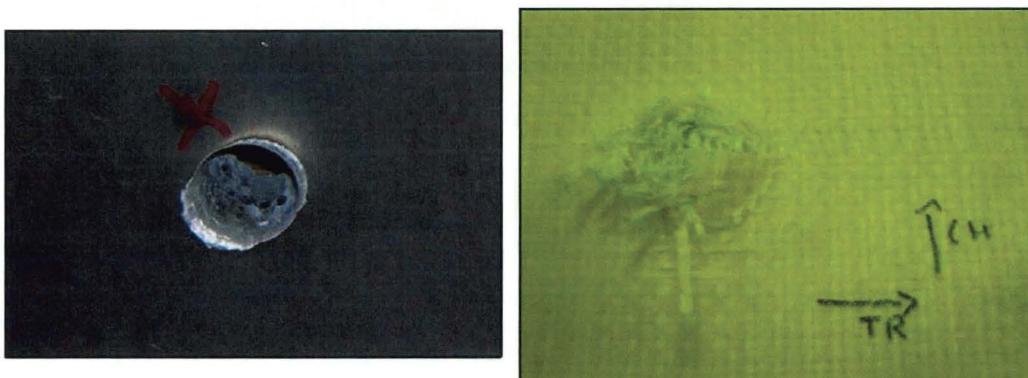


Figure 3. 7: Illustration de l'endommagement suivant le cas 2, avec l'exemple du « LtoL » 40 fils/cm 52 duites/cm avec une $V_e = 620$ m/s

➤ Cas 3

L'endommagement ici est prédominant suivant la direction trame. Cet endommagement reflète un déséquilibre entre les deux densités chaîne et trame entraînant une rupture des fils selon une direction privilégiée du matériau.



Figure 3. 8: Illustration de l'endommagement suivant le cas 3, avec l'exemple du « LtoL » 20 fils/cm 130 duites/cm avec une $V_e = 700$ m/s

➤ Cas 4

Il regroupe les cibles qui n'ont pas été perforées et qui présentent un très large cône de déformation correspondant à l'absorption d'énergie faite par la structure au moment de l'impact.



Figure 3. 9: Illustration de l'endommagement suivant le cas 4, avec l'exemple du préimprégné 7 fils/cm 7 duites/cm avec une $V_e = 1000$ m/s

Le schéma suivant est un récapitulatif des différents endommagements suivant les densités des structures et leur nature de fibres.

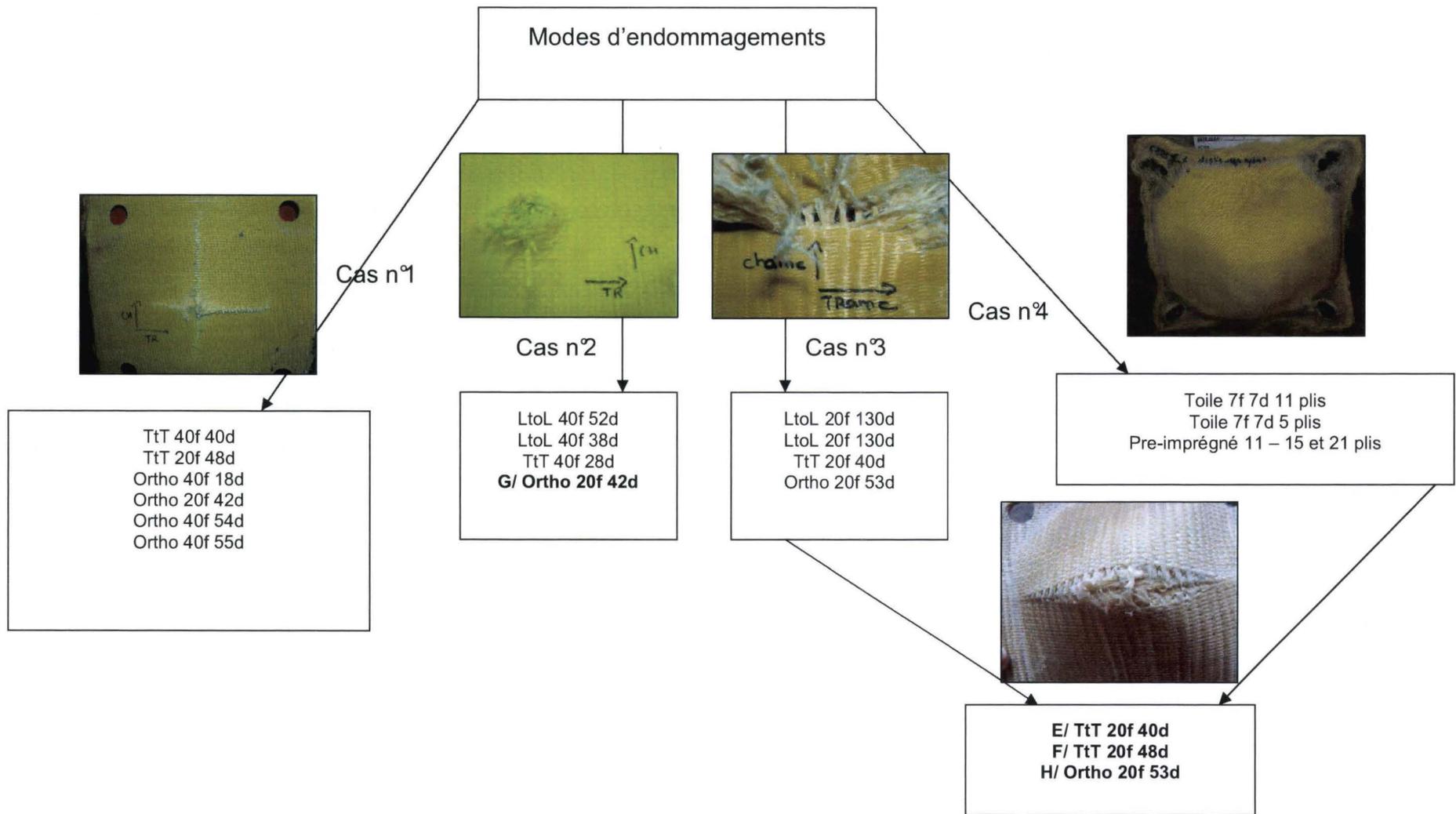


Figure 3. 10: Les différents modes d'endommagements des structures Interlock, préimprégnés et empilement de toiles

3. 3. RESULTATS A L'IMPACT

L'objectif de cette étude est de pouvoir comparer les différentes structures fabriquées lors des essais d'impact avec comme critère de comparaison la mesure de la vitesse limite de perforation (Vlp).

La Vlp est très bien adaptée pour la caractérisation à l'impact des matériaux métalliques de part leurs caractères homogènes. Il n'en est pas de même pour un matériau textile. En effet, le caractère hétérogène des matériaux composites Interlocks présents ici, nous laisse penser que l'appréciation seule de la Vlp ne serait pas un choix de comparaison judicieux. Alors que le matériau métallique utilisé possède des masses et des épaisseurs identiques, les matériaux composites présentent quant à eux, des paramètres géométriques différents (masse surfaciques, épaisseurs, taux massiques et volumiques de fibres, nombre de couches, géométries de structures différentes....).

Lors des différentes campagnes d'essais, nous nous sommes aperçu que d'un matériau à l'autre les Vlp pouvaient être doublées. C'est le cas par exemple des préimprégnés avec des Vlp supérieures à 1000 m/s alors que la plupart des structures Interlocks ne dépassent pas les 600 m/s.

Prenons l'exemple de deux types de structures, « Ortho 20f 42d » et l'empilement de tissus toile noté « Toile 11 plis 7f 7d » (figure 3.11). Ces deux tissus sont différents de part leurs tissages et leurs densités chaîne/trame. Les Vlp respectives de ces matériaux sont de 551 m/s et 670 m/s. Dans une logique de comparaison, la conclusion serait de dire que l'empilement de tissus toiles est plus performant car possède une Vlp plus importante.

Cependant, nous constatons que ces deux structures, bien qu'infusées dans les mêmes conditions et présentant le même nombre de couches, 11 en l'occurrence, n'ont pas les mêmes masses surfaciques 6,57 kg/m² pour l'empilement de toiles et 3,52 kg/m² pour l'Interlock. Comment alors affirmer qu'un tissu toile d'une masse surfacique proche de 3,52 kg/m² aura toujours une Vlp supérieure à l'Interlock « Ortho 20f 42d » ?

L'idéal serait de pouvoir trouver un modèle regroupant à la fois les masses des matériaux, leurs géométries, leurs densités chaîne et trame, leurs nombres de couches, leurs taux volumiques et massiques de fibres

Or d'un matériaux Interlocks à l'autres ces paramètres différent. Le seul paramètre pouvant être pris en compte serait alors d'utiliser la masse surfacique de chaque matériau composite.

Ainsi, nous nous retrouvons devant le problème suivant :

- Doit-on considérer que les Vlp représentent le critère principal pour le comparatif sachant que les masses surfaciques sont différentes ?
- Ce critère doit-il être revu ? Faut –il le ramener à masse équivalente ?

Nous avons fait le choix de ramener la Vlp sur la moyenne des masses surfaciques pour chacune des architectures en utilisant le critère « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques ». On constate alors avec notre exemple que le tissu 11 plis n'aura pas une performance balistique égale à un tissu Interlock pour une masse surfacique équivalente. Le critère choisi est doublé avec l'utilisation du tissu Interlock « Ortho 20f 42d »

Le choix d'utiliser ici le carré de la Vlp et non pas la Vlp seule, permet d'obtenir des écarts plus significatifs et d'introduire non plus une notion de performance balistique mais de capacité d'absorption d'énergie à l'impact pour une configuration donnée.

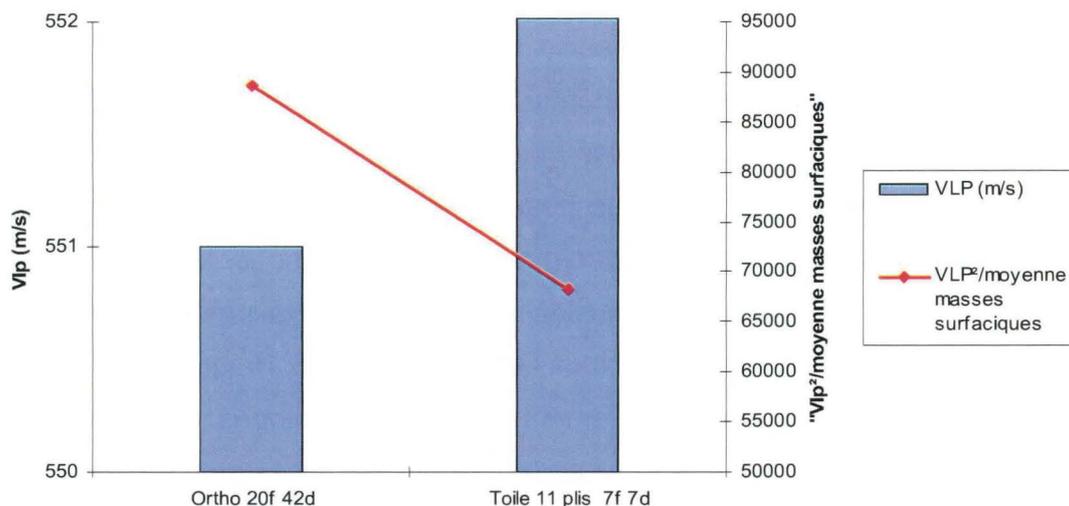


Figure 3. 11: Choix du critère « $Vlp^2/moyenne$ masses surfaciques »

Une fois ce critère établi les différentes les structures ont été comparées selon plusieurs paramètres entrant en jeu dans le comportement à l'impact du matériau à savoir :

- L'influence de la mise en œuvre. Nous verrons que celle-ci est très importante notamment dans le cas des Interlocks qui, comme nous l'avons vu dans les précédents chapitres, peuvent présenter des taux de résine importants de part la présence du fils dans l'épaisseur du matériau
- L'influence de l'architecture en fonction des ondulations de fils pouvant causer des dégradations plus ou moins importantes dans la structure
- L'influence de la matière utilisée, Kevlar® ou Vectran®
- L'influence de la manipulation du fil pendant le tissage des structures Interlocks

Ainsi nous essayerons de comparer les résultats à l'impact selon ces trois paramètres tout en gardant le critère « Vlp^2 /moyenne des masses surfaciques » pour rester à masse équivalente.

3.3.1 *Ratio « Vlp^2 /moyenne des masses surfaciques » en fonction de la mise en œuvre*

La mise en œuvre du matériau composite est une étape importante dans la fabrication du produit final. En effet, le choix du procédé, ici l'infusion sous vide, influe sur les caractéristiques du matériau ainsi que sur ses propriétés mécaniques. Durant cette étude nous avons utilisé trois mises en œuvre différentes. La première est une infusion sous vide classique pour les tissus Interlocks et les cibles témoins en toile Kevlar®. Comme mentionné au chapitre 2, nous avons en cours de production modifié le procédé d'infusion en augmentant la pression appliquée afin d'évacuer un maximum de résine. Nous verrons la figure 3.15, que cette modification n'a pas permis d'augmenter réellement les taux massiques de fibres dans les matériaux. La seconde est une mise en œuvre par autoclave pour les tissus témoins en préimprégnés. Enfin la troisième correspond à une infusion sous presse à forte pression afin d'évacuer un maximum de résine durant le procédé.

L'infusion sous vide est un procédé bien adapté aux Interlocks de notre étude, de part leurs caractéristiques qui diffèrent d'une structure à l'autre (épaisseurs, masses surfaciques, taux volumiques et massiques de fils...). Cependant, cette mise en œuvre reste aléatoire notamment dans le contrôle de l'injection de résine. C'est pourquoi après infusion, on constate que certains tissus ont mieux réagi que d'autres à la mise sous vide et l'on remarque alors des nettes différences d'épaisseurs, de masses et de taux massiques de fibres après infusion. Ces différences, nous le verrons, auront une influence sur le comportement des structures à l'impact.

Avant d'étudier les différences entre les matériaux suivant le type de mise en œuvre, il est important de noter les défauts visuels constatés après l'infusion. En effet, ces défauts peuvent expliquer les différences de masses et d'épaisseurs constatés sur les matériaux mais aussi pendant les tests à l'impact. La figure 3.12 illustre le cas où un dépôt de résine se fait sur les bords du matériau. Nous pouvons expliquer ce phénomène par la différence entre le support du moule et l'épaisseur de la plaque. Ainsi après infusion le surplus de résine non évacuée a pris la forme de la bêche d'infusion. Le cas suivant (figure 3.13) reflète un problème de stabilité de la structure durant la mise sous pression et d'un dépôt de résine dû à la bêche. On constate en effet, un gonflement du tissu à l'endroit précis d'un dépôt d'une quantité importante de résine.



Figure 3. 12: Dépôt de résine sur les côtés de la structure, illustration avec le « LtoL » Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm



Figure 3. 13: Illustration du problème de stabilité durant la mise sous vide, cas du « TtT » Kevlar® 40 fils/cm 40 duites/cm

Enfin, l'infusion sous vide à l'échelle laboratoire peut s'avérer aléatoire puisque l'on ne maîtrise pas forcément les différents problèmes liés à la pression durant l'infusion mais aussi pendant la réticulation de la résine. Ainsi, nous avons rencontré un problème de réticulation de résine pour une plaque qui présente des défauts de surface importants pouvant influencer sur les caractéristiques du matériau (épaisseur, masse surfacique, taux volumique de fibres...) et aussi sur les résultats balistiques finaux. C'est le cas pour l'une des plaques de l'Interlock « LtoL » en Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm (figures 3.14 et 3.15).



Figure 3. 14: Illustration du problème de pression lors de la réticulation de la résine après l'infusion, cas du « LtoL » Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm, face arrière



Figure 3. 15: Illustration du problème de pression lors de la réticulation de la résine après l'infusion, cas du « LtoL » Vectran® 40 fils/cm 38 duites/cm, face avant

Ces défauts de surface ont alors un impact sur les épaisseurs et masses surfaciques finales des structures, d'où les différences constatées entre les structures de géométries identiques ou non comme le montre la figure 3.16

La figure 3.17 présente différents taux volumiques ($Tvf\%$) et massiques ($Tmf\%$) de fibres pour chaque échantillon testé ainsi que les résultats à l'impact obtenus grâce aux critères « Vlp^2 /moyenne masses surfaciques ».

On observe alors que la plupart des structures ayant des $Tvf\%$ et des $Tmf\%$ supérieurs à 70 % présentent un critère « Vlp^2 /moyenne masses surfaciques » élevés. L'interlock « TtT 20f 40d » reste une exception car pour un taux de fils

Interlocks. Ainsi, les cibles « TtT » et « Ortho » Vectran® en 20 fils/cm et 40 fils/cm – 18 duites/cm pour « l'Ortho », présentent un meilleur comportement à l'impact et permettent l'orientation des choix de cibles futures pour la continuité de l'étude, à savoir atteindre des T_{vf} % et des T_{mf} % proches des préimprégnés pour concurrencer ces matériaux.

➤ Les structures Interlocks

Les résultats sont divers et variés dans certains cas. Nous pouvons supposer que des structures très équilibrées présenteraient des résultats satisfaisants sachant que des structures type toile 2D ont déjà prouvé leurs performances dans le domaine de la protection balistique. Cependant, selon les résultats obtenus, cette hypothèse ne semble pas être confirmée. De plus, lors des essais, nous avons observé des V_{lp} très faibles pour certaines structures. Cependant pour des masses surfaciques équivalentes, ce sont ces mêmes structures qui se démarquent. D'où le choix du critère « V_{lp}^2 /moyenne masses surfaciques » afin de comparer au mieux nos structures.

Ainsi, la tendance se porte vers des structures non équilibrées (x fils de chaîne pour $x/2$ ou $2x$ fils de trame) pour obtenir de bonnes performances balistiques.

Lorsque nous reprenons la figure 3.17, nous remarquons que les structures « TtT » en 20 fils/cm et les structures « Ortho » en 20 fils/cm et 40 fils /cm-18 duites/cm toutes deux en Kevlar® et Vectran® ont un ratio « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » le plus élevé. Ces structures ont par ailleurs des comportements à l'impact différents qui sont relatifs à leur géométrie et à la densité chaîne/trame introduite. Ainsi les structures « Ortho » Kevlar® auront tendance à avoir une rupture des fibres dans les directions chaîne et trame (cas 1), alors que celles en Vectran® auront une rupture préférentielle selon la direction trame (cas 3), où la densité en fils de trame est la plus importante comparée aux structures en Kevlar®. Les structures « TtT » en Vectran® ont également une rupture préférentielle dans le sens trame (cas 3) alors que les architectures en Kevlar® présenteront un cône de déformation ciblé après impact (cas 2). Ce constat ne s'explique pas vraiment ici car la densité en fils de trame est plus importante dans les structures Kevlar® que Vectran®. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que la vitesse d'impact respectivement de 584 m/s et de 620 m/s a une influence sur le mécanisme

d'endommagement des plaques. Cependant, à la vue de leur T_{vf} % et T_{mf} % respectifs, les structures Interlocks ne présentent pas de résultats convaincants par rapport aux préimprégnés d'où le choix d'assécher certaines structures Interlocks.

➤ Les structures Interlocks E, F, G, H

Ces structures sont issues d'une production identique aux Interlocks de même architecture mais présentent une mise en œuvre d'imprégnation de résine différente. En effet, suite aux résultats des cibles en préimprégnés et empilement de toiles, nous avons voulu assécher au maximum certaines structures Interlocks afin de vérifier l'hypothèse d'une plus grande capacité de déformation d'un matériau sec durant l'impact. Nous avons donc pris deux structures présentant le critère « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » le plus élevé, et nous les avons comparé avec leur homologue en fibres de Kevlar® ou Vectran® afin d'avoir un comparatif à structures équivalentes.

Nous remarquons alors que les structures présentent toutes des taux massiques et volumiques de fibres importants avec une augmentation de plus de 30 % des taux volumiques et massiques de fibres pour chaque architecture (figure 3.18). Le critère « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » a lui aussi augmenté (de 90000 à 130000), se rapprochant du ratio obtenu pour les préimprégnés. Nous retrouvons également la même tendance que pour les précédents tissus Interlocks, à savoir que les structures « TtT » présentent les ratios « V_{lp}^2 /moyenne des masses surfaciques » les plus élevés (130000 contre 120000 pour les structures « Ortho »). Ces structures ont en effet une déformation à l'impact plus importante comparée aux structures « Ortho ». Le fait d'assécher le matériau a accru ce paramètre, nous rapprochant alors des résultats obtenus avec les préimprégnés.

inférieur à 50 % la structure présente un comportement à l'impact intéressant. Nous pouvons alors supposer que la géométrie de la structure entre en jeu ici, ce que nous verrons dans le paragraphe 3.3.2 suivant.

Enfin on constate également que certaines architectures présentent des taux volumiques et massiques de fibres élevés sans pour autant avoir de bonnes performances balistiques, c'est le cas par exemple pour les Interlocks « LtoL » en 130duites/cm. Ce constat sera expliqué par la suite, nous verrons alors que la géométrie compactée du matériau influe sensiblement sur le comportement à l'impact.

En regardant les différentes mises en œuvre utilisées, on constate que l'assèchement du matériau par effet de pression (autoclave ou presse durant l'infusion) a permis d'obtenir des matériaux à la fois à taux de résine faible et performants à l'impact.

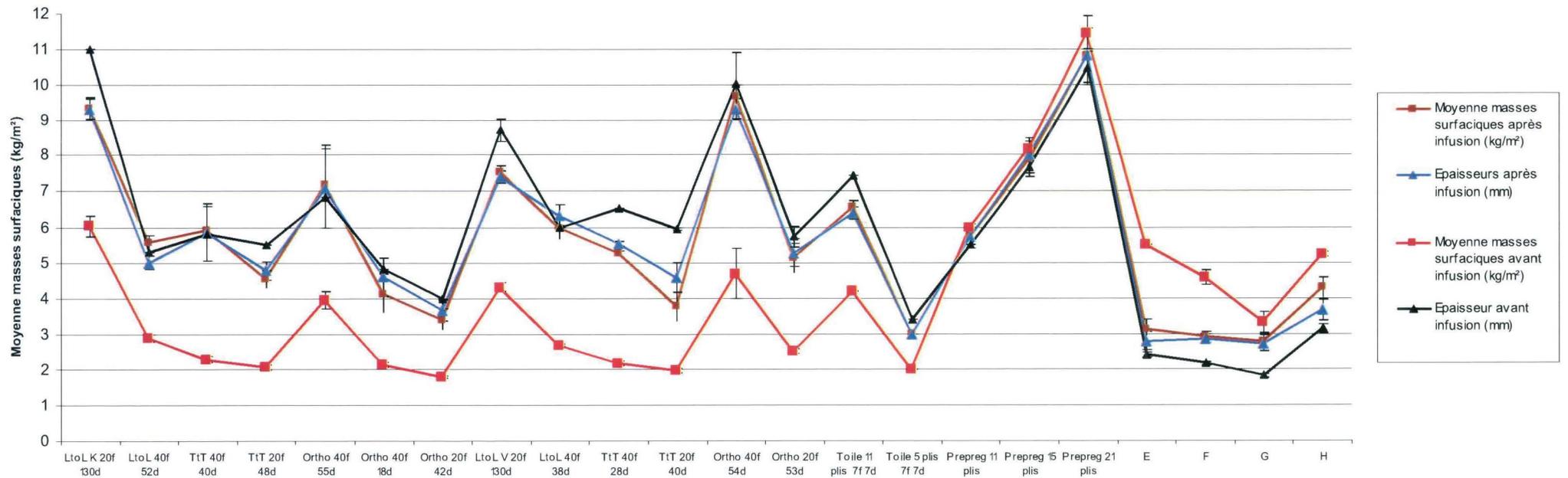


Figure 3. 16: Epaisseurs (mm) et masses surfaciques (kg/m²) de l'ensemble des structures avant et après infusion

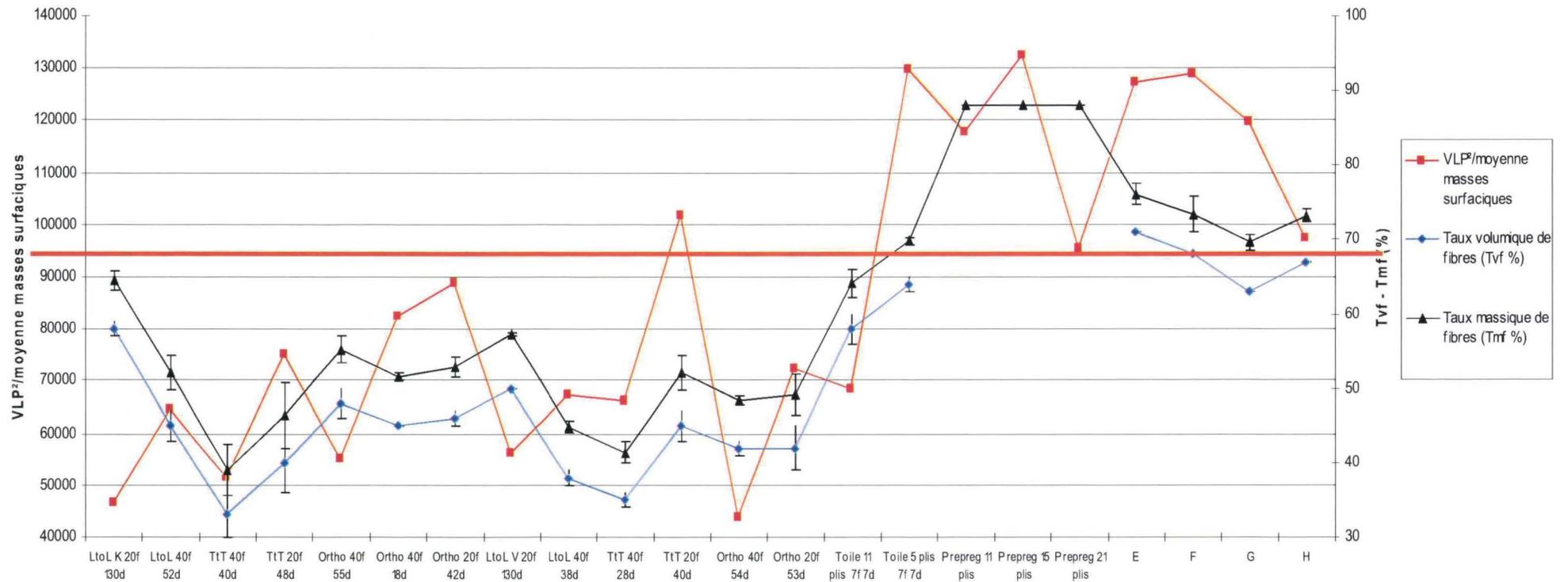


Figure 3. 17: Influence du procédé de mise en œuvre en tant que renfort de matériaux composites sur le critère « Vlp²/moyennes masses surfaciques »

3.3.2 **Ratio « Vlp^2 /moyenne des masses surfaciques » en fonction des architectures**

➤ Les préimprégnés

En reprenant la figure 3.17 précédente, nous remarquons que les préimprégnés présentent un ratio « Vlp^2 /moyenne masses surfaciques » très élevé comparé aux structures toiles ou Interlocks. La faible masse de résine dans ces structures reflète la nécessité d'assécher le plus possible les différents matériaux pour atteindre un taux de fibres très élevé et avoir des déformations importantes lors de l'impact et donc une forte absorption d'énergie. Utiliser les préimprégnés comme outil de comparaison nous a permis de nous positionner sur le marché du blindage. Nous voyons donc ici la nécessité d'utiliser des matériaux à faible taux de résine afin d'augmenter le critère « Vlp^2 /moyenne masses surfaciques » et concurrencer ces matériaux. (Ce qui a été fait avec les échantillons E, F, G et H).

Cependant, la mise en œuvre des préimprégnés reste très éloignée de celle utilisée pour les Interlocks. Nous avons utilisé ici une mise en œuvre par autoclave avec une pression et une température très élevée, respectivement 10 bars et 160°C, afin d'évacuer l'excédent de résine. C'est pourquoi nous avons voulu comparer les Interlocks avec une mise en œuvre équivalente d'où l'utilisation des empilements de tissus toiles.

➤ Les structures toiles

Les toiles infusées montrent un résultat surprenant. En effet les 11 plis de toile présentent un ratio « Vlp^2 /moyenne masses surfaciques » presque deux fois moins important qu'une structure 5 plis comme nous pouvons le constater sur la figure 3.16. L'infusion basse pression d'un empilement de tissus toiles supérieur à 5 plis rigidifie probablement la structure empêchant alors une absorption d'énergie plus importante que dans le cas d'un 5 plis. Cela se remarque dans les observations après tirs où les toiles 5 plis présentent un cône de déformation plus important.

Les structures à 11 plis de toile qui présentent un taux volumique de fibres de 58 % ne présentent pas des résultats convaincants par rapport aux structures

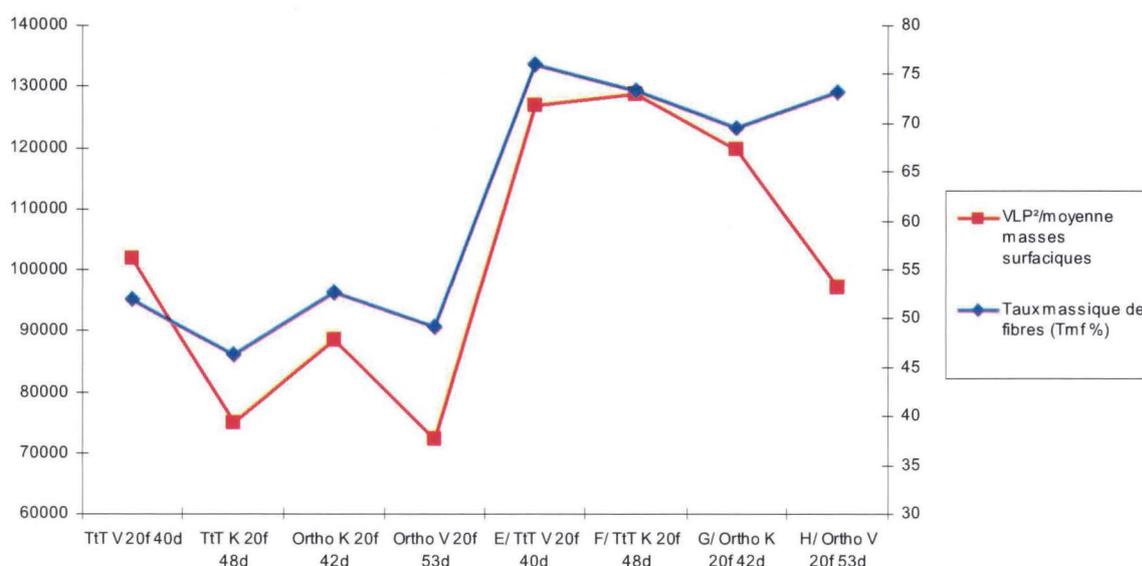


Figure 3. 18: Comparaison entre les tissus Interlocks infusés en basse pression et les tissus E à H infusés au PPE

3.3.3 Ratio « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques » en fonction des fils utilisés

Nous avons vu aux paragraphes précédents que beaucoup de critères entrent en jeu dans l'étude du comportement à l'impact des différents matériaux. Une autre originalité de l'étude repose également sur le choix d'utiliser deux types de fibres, l'une connue et l'autre en marge de l'être. Nous avons d'un côté le fil de Kevlar® 29, fil d'aramide, bien connu dans le domaine de la balistique, qui a prouvé son efficacité à la fois dans les domaines de la balistique souple et dure. De l'autre côté, nous avons le fil de Vectran® issu du polyester insaturé, qui présentent des propriétés mécaniques équivalentes au Kevlar® pour un coût moins important à l'échelle industrielle. Il est donc intéressant ici de pouvoir comparer ces fibres selon le comportement à l'impact de nos structures.

Les tableaux 3.1, 3.2, 3.3, suivants présentent un comparatif entre les fibres pour les différentes géométries d'Interlocks. Les structures en Kevlar® sont notées en bleu, celles en Vectran® en rouge.

Les structures « LtoL » (tableau 3.1) et « TtT » (tableau 3.2) en fils de Vectran® présentent un ratio « $Vlp^2/moyenne$ masses surfaciques » supérieur aux structures en fils de Kevlar®. Cette différence peut s'expliquer par les propriétés

mécaniques du fil en lui-même qui présente des valeurs supérieures au fil de Kevlar®. Si nous reprenons la figure 2.1 du chapitre 2, nous remarquons que le Vectran® présente une elongation à la rupture 25 % plus importante que le Kevlar®, la ténacité à la rupture (cN/tex) ainsi que le module (GPa) étant équivalents bien que légèrement supérieurs pour le Vectran®. Ces différences constatées expliquent, en partie, les résultats à l'impact obtenus et supérieurs dans la plupart des cas pour les Interlocks en Vectran®.

Ce constat n'est cependant pas généralisable pour les structures « Ortho ». Ces structures, ayant la particularité d'avoir un renfort dans toute son épaisseur, peuvent avoir une nette influence sur les propriétés mécaniques des fils. Nous verrons alors dans le paragraphe suivant qu'au cours du procédé de tissage le fil est dégradé de part sa manipulation mais aussi dû à la géométrie d'Interlock choisie. Cette étude n'a pu être faite que sur des fils d'aramide pour les structures Interlocks en 40 fils de chaîne par centimètre. Il faudrait également faire des tests sur les fils de Vectran® afin d'observer si il y a effectivement une dégradation plus marquée pour ces structures après tissage ce qui pourrait expliquer la différence de performances pour ce type d'Interlock.

	LtoL K 20f 130d	LtoL V 20f 130d	LtoL 40f 52d	LtoL 40f 38d
VLP (m/s)	660	650	600	635
Moyenne masses surfaciques après infusion (kg/m ²)	9,36	7,52	5,58	5,98
Ecart type	0,46	0,23	0,15	0,04
Epaisseurs après infusion (mm)	9,33	7,40	5,00	6,33
Ecart type	0,29	0,17	0,20	0,29
Taux volumique de fibres (Tvf %)	58,00	50,00	45,00	38,00
Ecart type	1,00	0,00	2,00	1,00
Taux massique de fibres (Tmf %)	64,58	57,29	52,05	44,85
Ecart type	1,25	0,25	2,41	0,81
VLP²/moyenne masses surfaiques	46538	56184	64516	67429

Tableau 3. 1: Comparaison entre les fils de Kevlar® et Vectran® pour les Interlocks type « LtoL »

	TtT 40f 40d	TtT 40f 28d	TtT 20f 48d	TtT 20f 40d
VLP (m/s)	552	590	584	620
Moyenne masses surfaciques après infusion (kg/m ²)	5,90	5,26	4,54	3,77
Ecart type	0,69	0,22	0,59	0,31
Epaisseurs après infusion (mm)	5,83	5,53	4,77	4,57
Ecart type	0,76	0,06	0,25	0,40
Taux volumique de fibres (Tvf %)	33,00	35,00	40,00	45,00
Ecart type	3,00	1,00	4,00	2,00
Taux massique de fibres (Tmf %)	39,13	41,43	46,34	52,03
Ecart type	3,50	1,46	4,37	2,29
VLP²/moyenne masses surfaciques	51645	66179	75122	101963

Tableau 3. 2: Comparaison entre les fils de Kevlar® et Vectran® pour les Interlocks type « TtT »

	Ortho 40f 55d	Ortho 40f 18d	Ortho 40f 54d	Ortho 20f 42d	Ortho 20f 53d
VLP (m/s)	630	585	652	551	609
Moyenne masses surfaciques après infusion (kg/m ²)	7,20	4,14	9,70	3,42	5,12
Ecart type	0,34	0,18	0,28	0,22	0,35
Epaisseurs après infusion (mm)	7,08	4,60	9,33	3,67	5,27
Ecart type	1,09	0,53	0,29	0,29	0,40
Taux volumique de fibres (Tvf %)	48,00	45,00	42,00	46,00	42,00
Ecart type	2,00	0,00	1,00	1,00	3,00
Taux massique de fibres (Tmf %)	55,19	51,49	48,36	52,78	49,21
Ecart type	1,85	0,49	0,60	1,36	2,70
VLP²/moyenne masses surfaciques	55125	82663	43825	88772	72438

Tableau 3. 3: Comparaison entre les fils de Kevlar® et Vectran® pour les Interlocks type « Ortho »

3.3.4 *Influence de la dégradation des fils durant le tissage sur le critère « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques »*

Nous avons vu au chapitre 2 l'importance de ne pas dégrader les fils durant le procédé de tissage. Cette dégradation est due à la fois aux frottements des fils sur les différents éléments du métier mais aussi pendant l'insertion des fils dans l'épaisseur du tissu qui créent des zones de compaction et de croisement. Nous avons alors pu distinguer les structures entre elles selon la dégradation des fils de chaîne et de trame après le tissage. En comparant cette dégradation avec les résultats à l'impact observés nous pouvons établir une certaine corrélation entre les deux. (voir figure 3.19).

NB : Cette étude ayant été menée sur les tissus Interlocks en Kevlar® nous nous baserons seulement sur les résultats concernant ces structures. Les résultats de la structure « Ortho » concernent les densités 40 fils/cm en chaîne et 55 duites/cm en trame.

Ainsi, nous remarquons que la structure « Ortho » a subi le plus de dégradations notamment au niveau de la ténacité à la rupture et du module des fils. Le critère « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques » est également le plus faible. La structure « Ortho » est la plus dégradante du fait du tissage très compact réalisé pour obtenir la géométrie souhaitée. L'introduction du fil dans toute l'épaisseur de la structure a fortement dégradé le fil.

Les structures types « LtoL » voient ses fils de trame moins dégradés en terme de ténacité à la rupture. Ces fils ne présentent pas d'ondulations dans la structure et peuvent être assimilés à des fils longitudinaux qui apportent la majorité des propriétés mécaniques du tissu d'où le critère « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques » qui reste le plus élevé des trois structures testées ici.

Enfin, la structure type « TtT » possède une géométrie équilibrée dans la mesure où les fils de chaîne ont une évolution identique aux fils de trame. Le critère « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques » reste quant à lui plus faible que pour la structure « LtoL ».

En extrapolant aux différents tissus fabriqués ainsi que les résultats à l'impact obtenus nous avons remarqué aux graphiques précédents que les structures « TtT » présentent un critère « $Vlp^2/moyenne$ des masses surfaciques » plus important, suivi des structures « Ortho » non équilibrées et les structures « LtoL ».

Nous pouvons expliquer ces résultats par plusieurs hypothèses :

Les structures « LtoL » possèdent plus de liages entre les couches que les autres structures. Nous avons en effet une succession de liage couche par couche qui induit des frottements entre les couches et les fils présents dans la structure d'où des dégradations de fils plus importantes à hauteur du nombre de couches présentes dans la structure.

Les structures types « Ortho » non équilibrées présentent de bons résultats. Dans le cas de l'Interlock « Ortho 40f 55d », nous pouvons attribuer ces résultats à la compacité de la structure qui induit des dégradations plus importantes pour les structures les plus denses.

Les structures « TtT » ont une géométrie régulière en chaîne et trame. Leurs structures les moins denses ont été moins dégradées du fait du nombre de croisements en chaîne et trame réduits.

En reprenant le constat fait au chapitre 2, nous remarquerons également que les structures présentant un embuvage fort au niveau des leurs fils de chaînes sont effectivement les structures les plus dégradantes pour les propriétés mécaniques du fil (cas de l'Interlock « Ortho »). Cependant, ces structures ne sont pas forcément les moins performantes balistiquement parlant. Nous mettons en évidence ici le fait qu'allier un renfort textile avec une matrice permet d'accroître les propriétés à l'impact du matériau, d'autant plus quand le procédé de mise en œuvre est maîtrisé pour atteindre des taux massiques de fibres élevés.

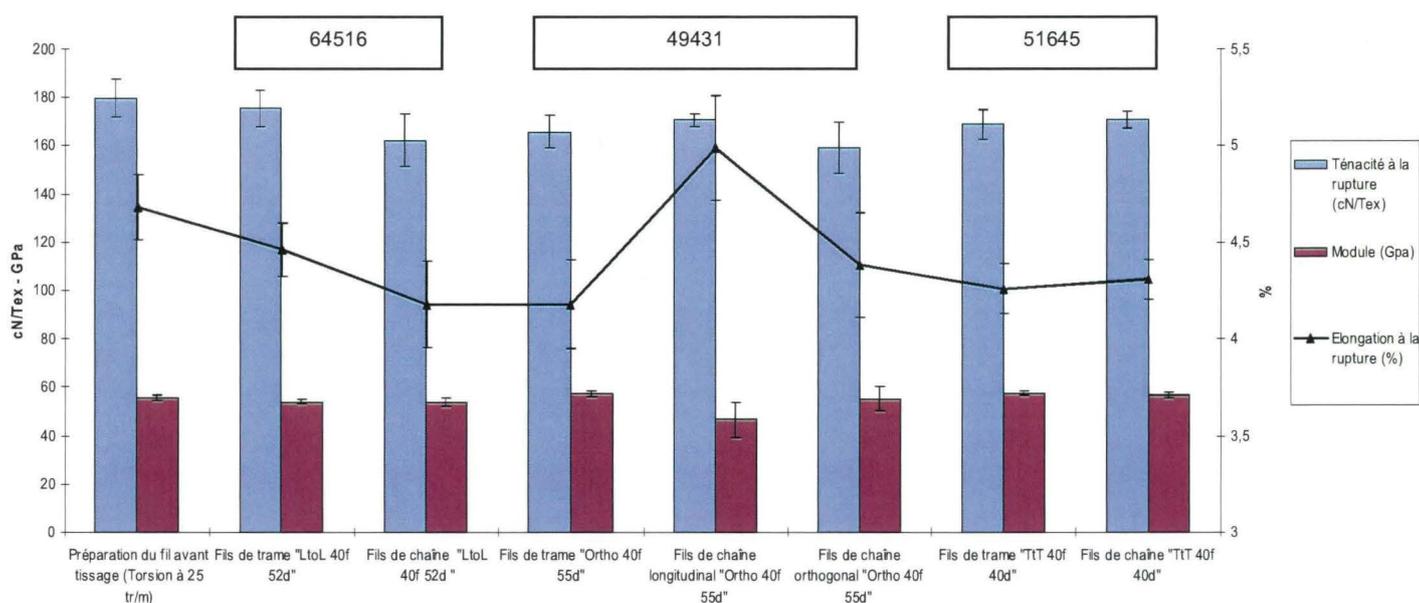


Figure 3. 19: Influence de la dégradation des fils sur le critère « Vlp²/moyenne masses surfaciques »

CHAPITRE 4

CHAPITRE 4 : Discussions

Ce chapitre clôture ce travail de recherche en reprenant les différentes conclusions de l'étude. Nous avons fait ressortir deux types de structures Interlocks avec des paramètres de tissage et de mise en œuvre précis. Par ailleurs, nous avons mis en avant qu'il n'existait pas un matériau composite universel pouvant répondre aux menaces existantes. Chaque matériau est unique et possède ses propres caractéristiques et domaine d'application. Enfin nous proposons quelques perspectives de recherche et notamment une réflexion sur l'hybridation de matériaux. Suite à une dernière étude, nous avons pu établir les premières ébauches de réflexion à savoir qu'une hybridation de matériaux 2D et 3D serait envisageable afin de coupler les performances à l'impact de chaque structure. Cependant, une nouvelle interrogation s'est posée quant à la mise en œuvre de cette hybridation. En effet, est-il préférable d'assembler ces matériaux durant une infusion commune ou alors faut-il les mettre en œuvre séparément pour les fixer ensuite ensemble par un système de boulonnage par exemple.

4. 1. UTILISATION DES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE DOMAINE DU BLINDAGE MILITAIRE

Le domaine de la protection balistique, et plus particulièrement ici le blindage de véhicule, est en constante évolution. En effet suite aux nouvelles menaces type EEI, les nouvelles protections se doivent d'être toujours plus performantes. Cependant, les protections actuellement utilisées ont un inconvénient majeur qui reste leur poids très élevé.

Faut-il alors alléger au maximum les blindages des véhicules aux détriments de leurs performances ?

Faut-il investir dans des solutions métalliques plus légères comme le titane, qui représente un coût non négligeable ?

Faut-il se tourner vers de nouvelles technologies qui permettent de réduire le problème du poids des structures aux performances équivalentes mais représentent également un coût de production important, inférieur cependant aux prix des nouveaux matériaux métalliques.

En combinant fibres et structures, il est possible de créer des nouveaux matériaux très performants. Ces matériaux appelés textiles techniques couvrent différents domaines. Les performances obtenues peuvent également être combinées à l'ajout de la résine apportant aux renforts de nouvelles propriétés mécaniques.

Ces matériaux, tels que des empilements de tissus ou de plis unidirectionnels liés ensemble par de la résine, ont l'inconvénient majeur de se délaminer sous l'impact, c'est-à-dire que les couches empilées se dissocient les unes des autres entraînant alors une rupture du matériaux. Suite à ce constat, de nouvelles structures textiles ont fait leur apparition, en reprenant la technologie de l'empilement mais en les liant par un renfort fibreux dans l'épaisseur empêchant alors un délaminage précoce du matériau pendant l'impact. Ces nouveaux matériaux tissés appelés Interlocks recouvrent un domaine très large. En effet, plusieurs paramètres de tissage peuvent être introduits dans ces tissus comme la profondeur du liage dans l'épaisseur, le nombre de couches, les densités en fils de chaîne et de trame....

Ces paramètres amènent alors une interrogation majeure à savoir comment classifier ces matériaux ? Mais surtout quelle architecture de tissage pour quelle application finale ?

Nous l'avons vu les classifications des Interlocks restent diverses et variées. Alors que certains préfèrent classer les Interlocks selon des nombres de couches et des liages dans l'épaisseur, d'autres pensent qu'allier épaisseur et angle de liage est une bonne solution, ce qui a fortement réduit les différentes classes d'architectures existantes.

La seconde question reste encore sans réponse. En effet, les applications finales restent diverses et variées (bâtiment, aéronautique, défense...) mais surtout les performances recherchées ne sont pas les mêmes. Dans le domaine qui nous intéresse, les niveaux d'énergie d'impact peuvent varier du simple au triple et un matériau performant pour une menace donnée ne l'est pas forcément pour d'autres.

Nous l'avons vu, il n'existe pas d'architecture Interlock universelle et quelques travaux sont menés afin d'en comprendre le comportement. Ces études peuvent être divisées en plusieurs catégories ;

➤ Celles qui analysent le placement des fils dans les architectures Interlock ainsi que leur dégradation une fois le tissage fini. Ces études nous permettent alors de nous rendre compte de la complexité du tissage Interlock et de toutes les précautions à prendre dans ce domaine. **[1] [2]**

➤ Celles qui étudient le comportement mécanique de plaques composites à renforts tissés Interlock **[3] [4] [5] [6] [7] [8]**. Cela nous permet de dresser un premier bilan comparatif entre les différentes architectures Interlocks existantes. Cependant, nous l'avons vu, ces études souffrent du manque de détails sur les paramètres de tissage, les masses finales obtenues après une mise en œuvre composites.... Ces études bien qu'intéressantes permettent seulement de faire un choix de géométrie de liage et non d'architecture tissée. De plus, comme il n'existe pas de classification universelle des structures Interlocks, nous sommes alors souvent confrontés à devoir comprendre qu'elle a été l'architecture testée durant l'étude et bien souvent nous retrouvons la même géométrie d'Interlock en l'occurrence l'Orthogonal.

➤ Celles qui étudient le comportement à l'impact basses vitesses de différents tissus Interlocks ou non. **[9] [10] [11] [12] [13]**. Ces études sont très intéressantes de part le comportement à l'impact des matériaux. Cependant, le domaine de vitesses d'impact couvert reste faible et n'est pas représentatif de la réalité. Comment alors

quantifier le comportement à l'impact des différents matériaux à plus grande échelle ?

4. 2. BILAN DE L'ETUDE ET QUESTIONS FUTURES

Nous avons ici axé nos recherches sur le tissage des différentes architectures et leur comportement à l'impact balistique en condition réelle. Cela nous a permis de positionner ces tissus pour la protection balistique actuelle tout en comparant les structures Interlocks entre elles.

La question de l'universalité d'une structure n'a pas trouvé de réponses ici. En effet, le comportement des matériaux dépend avant tout des conditions d'impact données mais aussi de la fabrication du matériau. Nous avons ici pensé nos tissus en fonction des menaces ciblées sur le marché du blindage. Nos tissus ne pourront pas répondre à une menace plus importante en termes d'énergie cinétique ou de dimension de projectile.

Cependant, nous avons pu voir que certaines tendances ressortaient dans le comportement des tissus durant leur mise en œuvre et suite aux tests d'impact. Nous avons pu alors établir différentes conclusions à savoir :

➤ Le tissage de structures Interlocks était une opération complexe. Plusieurs précautions sont alors à prendre notamment dans la manipulation du fil durant sa préparation en vue d'être tissé. Nous devons également faire attention à la distribution des fils de chaîne pendant le tissage selon les orientations de fils de chaîne dans la structure et le liage effectué.

➤ La mise en œuvre du renfort tissé est également une étape importante qui mérite une étude plus poussée. Nous avons ainsi mis en évidence que les structures Interlocks présentaient des taux massiques et volumiques de fibres importants de part la géométrie de leur structure. Nous avons également observé que des structures à faibles taux de résine avaient un meilleur comportement à l'impact de part leur vitesse d'arrêt mais aussi leur capacité à se déformer sous impact balistique.

➤ Nous avons également pu faire ressortir deux structures Interlocks qui répondaient à nos attentes en termes de performances à l'impact avec des ratios « V/p^2 /moyenne masses surfaciques » équivalents aux structures utilisées sur le

marché. Ces structures ont par la suite été infusées de manière à obtenir des taux massiques de fibres équivalents aux produits actuels.

➤ Enfin, nous avons comparé deux fibres de nature chimique différente mais présentant de propriétés mécaniques similaires. Nous avons constaté que les tissus à base de fibres de Vectran® présentent de meilleurs résultats que ceux à base de fibre d'aramide type Kevlar®.

Suite à ce bilan, les perspectives suivantes peuvent être envisagées:

➤ Valider le fait qu'assécher les structures Interlocks n'est pas endommageable géométriquement et mécaniquement parlant. En effet le compactage subi par les tissus est assez élevé et suite aux épaisseurs obtenues, il est évident que l'organisation et le positionnement des fils ont changé. Il faudrait alors pouvoir quantifier ce changement par des caractérisations non destructives via l'usage de micro-tomographie.

➤ Etudier plus en détail la fibre de Vectran® notamment sa résistance au vieillissement. En effet qu'en est-il de sa durée de vie à long terme ? Là où l'aramide présente son plus grand défaut, le Vectran® peut-il subir des dégradations en présence de rayon ultraviolet (UV) ?

➤ Enfin nous avons vu que les matériaux tissés et préimprégnés présentaient encore des résultats supérieurs aux tissus Interlocks. Pouvons nous alors envisager d'hybrider les matériaux afin d'accroître leurs capacités ? Pouvons nous allier le côté déformant des tissus bidimensionnels, à la résistance au délaminage des matériaux Interlocks. Nous avons voulu vérifier cette idée en effectuant une dernière campagne d'essais.

4. 3. VERS L'HYBRIDATION DE STRUCTURES, QUID DE L'ASSEMBLAGE OBTENU ?

L'hybridation des structures permettrait d'allier les propriétés mécaniques de chaque constituant. En effet, nous savons que les tissus Interlocks ralentissent le délaminage des couches et que l'empilement de tissus permet d'obtenir des taux massiques de fibres élevés et une bonne déformabilité du matériau durant l'impact.

On pourrait alors se demander pourquoi ne pas assembler les deux ?

Lors de la dernière campagne de tests, nous avons infusé cinq plis de toile avec les Interlocks E, F, G et H suivant la figure 4.1, le tissu Interlock étant en avant de la cible.

Les caractéristiques des plaques sont disponibles au tableau 4.1. Nous verrons alors que pour certaines cibles les épaisseurs et masses surfaciques sont très différentes avec des écarts types très grands. En effet certaines cibles ont été plus sensibles au compactage effectué pendant l'infusion rendant les plaques très fines (figure 4.2) et comme nous pouvons l'observer sur les images suivantes.

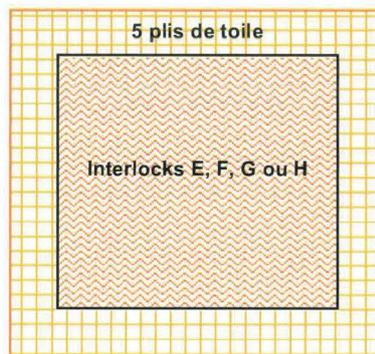


Figure 4. 1: Configuration des cibles hybridées

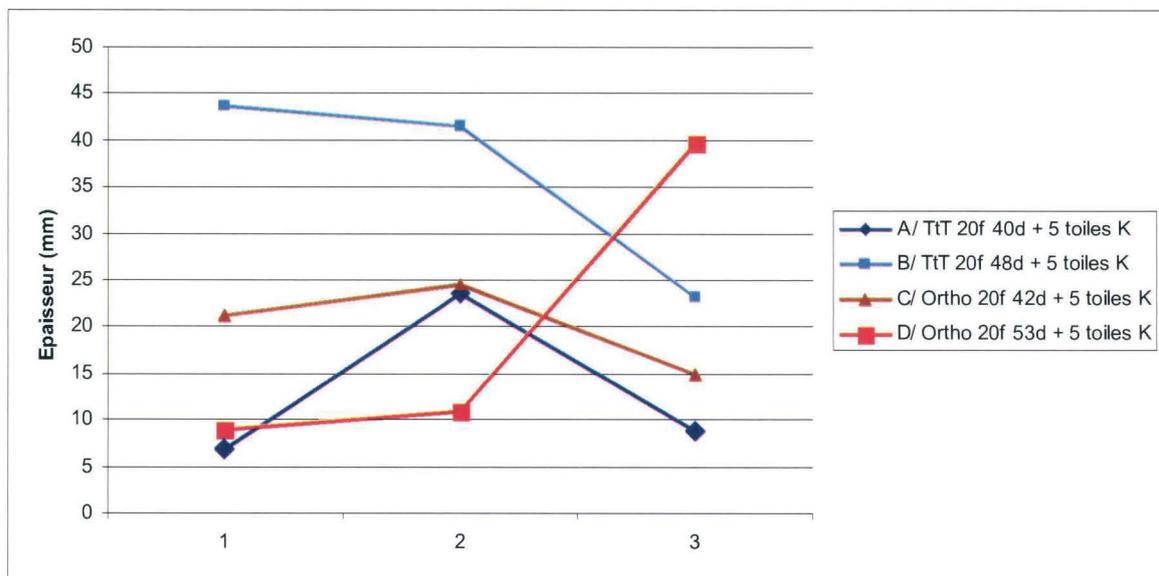


Figure 4. 2: Epaisseurs obtenues pour les différentes hybridations, 1,2 et 3 sont les numéros de cibles attribués à chaque matériau hybride A, B, C et D



Figure 4. 3: Illustration des différences de compaction d'une plaque à l'autre avec l'interlock A2 et A3

Cibles hybrides infusées au PPE	A/ TtT V 20f 40d + 5 plis de toile	B/ TtT K 20f 48d + 5 plis de toile	C/ Ortho K 20f 42d + 5 plis de toile	D/ Ortho V 20f 53d + 5 plis de toile
VLP (m/s)	713,50	663,50	661,00	712,00
Moyenne masses surfaciques (kg/m ²)	5,56	5,21	5,10	6,00
Ecart type	0,11	0,13	0,00	0,02
Epaisseurs (mm)	7,63	4,87	5,10	7,00
Ecart type	0,98	0,64	0,44	1,73
Taux volumique de fibres (Tvf %)	64,00	66,00	65,00	65,00
Ecart type	0,01	0,02	0,01	0,02
Taux massique de fibres (Tmf %)	70,33	72,10	70,90	71,00
Ecart type	1,00	2,20	1,30	2,20
VLP ² /moyenne masses surfaciques	91561,56	84497,55	85670,78	84490,67

Tableau 4. 1: Paramètres de chaque architecture hybride avec les résultats à l'impact, ratio « Vlp²/moyenne masses surfaciques »

Le tableau 4.1 nous montre les différentes caractéristiques des tissus obtenus à savoir les masses surfaciques, les épaisseurs, les taux massiques et volumiques de fibres. Nous pouvons comparer les structures entre-elles en terme de ratio

« Vlp^2 /moyenne masses surfaciques ». La figure 4.4 suivante, reprend le critère d'impact avec les taux massiques de fibres, en comparaison des plaques Interlocks seules infusées dans les mêmes conditions, c'est-à-dire avec le compactage à 70 bars. Nous remarquons ici que le comportement à l'impact est beaucoup moins performant dans le cas des hybridations alors que les taux massiques de fibres sont équivalents.

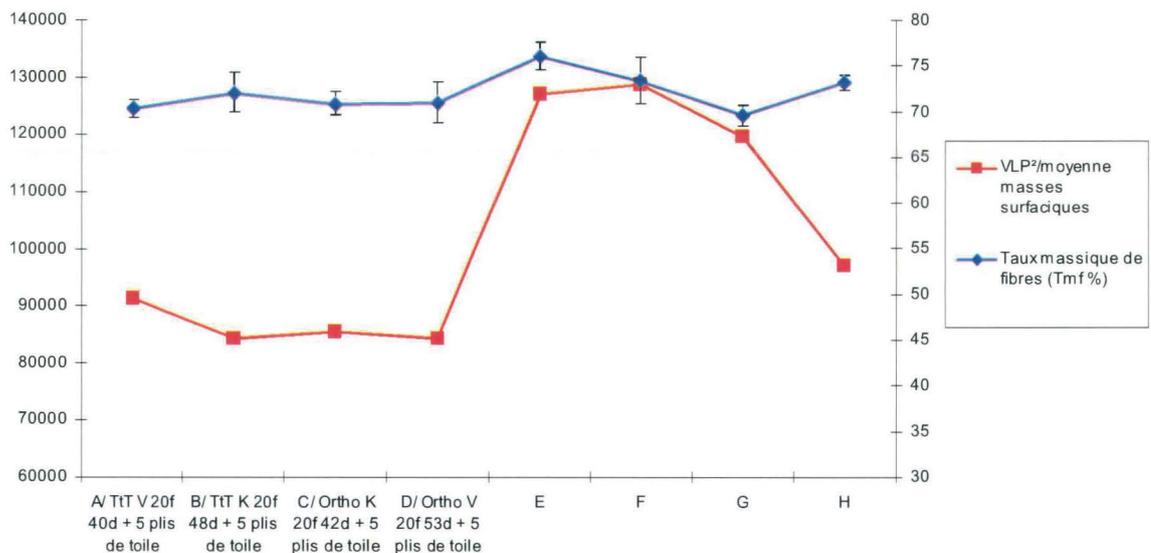


Figure 4. 4: Comparaison entre l'hybridation et les Interlocks seuls pour le Tmf % et le critère « Vlp^2 /moyenne masses surfaciques »

Il est intéressant de pouvoir observer le comportement après impact des différentes cibles hybridées. Ceci nous permet de voir que l'interface entre les deux matériaux joue un rôle primordial et qu'elle mérite d'être étudiée plus en détail. De plus, le procédé d'infusion ne semble pas ici adapté et l'on pourrait penser qu'un simple assemblage des deux constituants de la cible pourrait permettre aux deux différents tissus de s'endommager individuellement et de remplir leur rôle.

En effet, les cibles hybrides qui paraissent les moins « soudées » ensemble, présentent une large déformation arrière et se sont dissociées l'une de l'autre après impact (figure 4.5). On peut alors observer que les deux matériaux ont joué leur rôle d'absorbeur contrairement aux cibles hybrides plus écrasées qui, elles ne présentent presque pas de déformée arrière (figure 4.6). Lorsque l'on observe ces déformées après impact, nous avons l'impression d'avoir inhibé le pouvoir déformant des plaques prises séparément en infusant les cibles ensemble et de ce fait les rigidifiant.

Il faudrait alors pousser les investigations plus loin en étudiant l'influence de l'assemblage des cibles sur les propriétés à l'impact de ces matériaux. De plus, afin d'augmenter les performances balistiques de ces matériaux hybrides, il faudrait pouvoir utiliser les tissus préimprégnés qui ont montré de meilleures performances que les empilements de toile.



Figure 4. 5: Désolidarisation des deux tissus hybridés pendant l'impact, observation de la déformée du matériau Interlock, cas de l'hybride A1

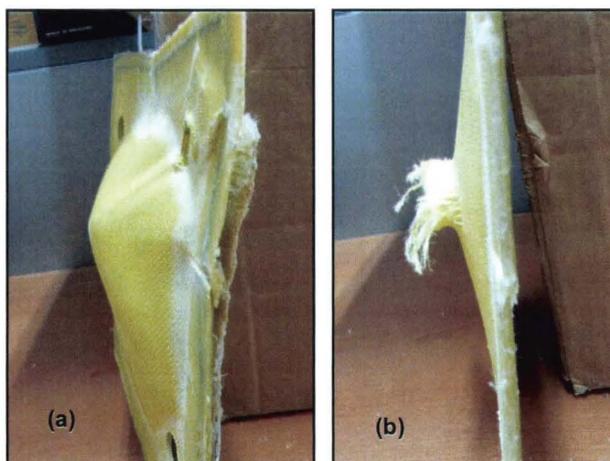


Figure 4. 6: Déformation arrière de l'hybride A1 (a) comparée au même tissu plus compacté A2 (b)

4. 4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] A.P. Mouritz, "Tensile fatigue properties of 3D composites with through thickness reinforcement "Composites Science and Technology, Vol 68 pp 2503-2510, 2008

[2] S.Rudov-Clark, A.P.Mouritz, L. Lee, M.K. Bannister. Fibre damage in the manufacture of advanced three dimensional woven composites. Composites part A 2003; 34 pp 963-970

[3] L.Tong, A-P Mouritz & M-K. Bannister, « 3D fibre reinforced polymer composites » ISBN 0-08-043938-1 Elsevier science, 2002

[4] Julian HU, "3D fibrous assemblies, properties applications and modelling of three dimensional textile structures", WP number 74, ISBN 978-1-84569-377-0, 2008

[5] Christiane El Hage, « Modélisation et comportement élastique endommageable de matériaux composites à renforts tridimensionnels », thèse soutenue en Octobre 2006, à l'Université Technologique de Compiègne

[6] J.Brandt, K.Drechsler & FJ.Arendts, "Mechanical Performance of composites based on various three dimensional woven fibre preforms" Composites sciences and technology Vol 56, pp 381-386, 1996

[7] S. Lomov, A-E.Bogdanovich, D-S.Ivanov, D.Mungalov,M.Karathan & I.Verpoest , "A comparative study of tensile properties of non crimp 3D orthogonal weave and multi layer plain weave e-glass composites. Part1: Materials, Methods and Principal Results" Doi: 10.1016/j.composites.2009.03.012

[8] Shoshanna D. Rudov-Clark, "Experimental Investigation of the tensile properties and failure mechanism of three-dimensional woven composites", School of Aerospace Mechanical and Manufacturing Engineering, RMIT University, these soutenue en Mars 2007

[9] Abir Al Maghribi, comportement des matériaux composites à fibres courtes : application à l'impact basse vitesse, thèse de doctorat soutenue le 26 Septembre 2008, ISAE, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace.

[10] Eric Ayax, « caractérisations expérimentales et modélisation du comportement d'une plaque composite tissée en régime balistique » thèse ENSAM soutenue en Juillet 1993,

[11] B-A. Gama, J-W. Gillespie "Punch shear based penetration model of ballistic impact of thick-section composites" Composite Structure vol 86 pp 356-369, 2008

[12] Mehlman, Vasudev, "A comparative study of the ballistic performance of glass reinforced plastic materials, SAMPE Quaterly, Vol 18, N°4, pp 43-48, 1987

[13] Bhatnagar, Lin, Chang, "Ballistic energy absorption of composites", 22nd International SAMPE Technical Conference, pp 1-13, 1990

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'ensemble de ces travaux est le fruit d'une collaboration entre la DGA (Direction Générale de l'Armement), l'entreprise Nexter Systems et le laboratoire du Gemtex (GEnie et Matériaux TEXtiles) et le LAMIH (Laboratoire d'Automatique de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines). L'objectif principal de cette étude était de comprendre le comportement à l'impact des matériaux composites à base de tissés Interlocks en renforts de structures métalliques existantes. Ainsi, différents tissus Interlocks ont été conçus et mis en œuvre afin d'être testés sous un type d'impact particulier simulant un fragment de métal éjecté à haute vitesse.

Les tissus Interlocks représentent un nouvel axe de recherche que ce soit dans le milieu industriel ou laboratoire. L'émergence des matériaux composites à renforts fibreux ne fait qu'accroître la demande dans des milieux où résistance, et gain de masse sont requis. Actuellement les tissus bidimensionnels restent l'utilisation préférée pour une application balistique de part les performances et les facilités de mise en œuvre. Cependant, ces structures ont l'inconvénient majeur de subir des délaminages entre les couches lors de l'impact. Un des avantages des structures tridimensionnelles réside en une meilleure résistance au délaminage d'où l'engouement qu'ils suscitent dans différents domaines. Il faut savoir que le tissage de structures Interlocks restent un domaine fermé et soumis à la concurrence que se soit industrielle ou à l'échelle laboratoire.

Les enjeux de ce travail de recherche ont d'abord été les performances balistiques de façon à apporter une réponse technologique aux menaces existantes, plus particulièrement les EEI à éclat, tout en optimisant le coût des matériaux utilisés, en s'adaptant aux véhicules existants avec des blindages courants de type acier ou aluminium en fonction de la menace estimée.

Nous l'avons vu, les tissus 2D prédominent pour le choix d'une protection balistique. En effet, que ce soit de la protection souple ou dure, il est courant de trouver des empilements de tissus toiles secs ou résinés selon l'application voulue. Cependant, l'empilement de plusieurs couches de tissu entraîne généralement un délaminage de celles-ci amenant une décohésion du matériau et donc des pertes de propriétés mécaniques et d'absorption d'énergie. Suite à ce constat, sont apparus les

matériaux 3D en l'occurrence des tissus Interlock. La principale différence avec des tissus 2D repose sur l'insertion d'un troisième renfort fibreux dans l'épaisseur de la structure limitant fortement le délaminage pendant le choc.

Nous avons également pris conscience que le domaine des tissus Interlocks était vaste. En effet, il existe une grande diversité de tissus dont les paramètres de fabrication très changeants (densité chaîne/trame, fils utilisés, géométrie d'insertion des fils...) ne donnent pas des propriétés identiques à chaque application finale. Plusieurs études ont tenté d'en comprendre le mécanisme mais celles-ci bien que très intéressantes ne permettent pas pour notre étude de comprendre le phénomène d'impact des Interlocks pour une application de blindage avec des gammes de vitesses élevées. En effet, ces études traitent principalement des impacts à faibles vitesses dans le domaine du quasi statique.

Ce travail de recherche a aussi permis de quantifier l'influence de la dégradation des fils pendant la préparation du tissage et selon la géométrie des différents Interlocks tissés avec des modifications faites sur les fils avant le tissage et sur la machine en elle même. Nous avons également comparé différentes structures avec différents paramètres, ce qui a permis de faire ressortir deux structures Interlocks intéressantes d'un point de vue tissage, mise en œuvre et tests à l'impact. De plus, nous avons mis en évidence les différents phénomènes d'endommagement des plaques après impact selon les densités chaîne/trame choisies ce qui permettra par la suite de mieux cibler les matériaux selon les applications voulues.

Nous avons également fait ressortir l'utilisation d'une fibre encore peu utilisée sur le marché de la balistique. L'utilisation de la fibre Vectran ® représente ici un point innovant car peu connue dans le monde du composite et de la protection balistique. Le choix d'utiliser une fibre Kevlar ®, déjà présente dans le milieu de protection balistique permet d'avoir une référence et d'établir une comparaison valable entre nos différents matériaux. La fibre de Vectran ® possède les mêmes caractéristiques que le Kevlar ® pour un coût moins important (le coût à l'échelle laboratoire n'est pas représentatif ici) et pour des performances supérieures. Des études complémentaires sur cette fibre (mode de dégradations, tenue à la fatigue, UV, humidité) permettront de valider en détails son utilisation pour des applications balistiques futures

En plus de l'utilisation du Vectran[®], une autre originalité de ce travail repose sur la multitude de données que nous avons pu obtenir grâce aux différentes configurations de tissus Interlocks testés et au nombre de tirs effectués. Nous avons en effet pu tester trois types d'architectures ayant chacune des densités de fils différentes et deux natures de fils différentes. Nous avons remarqué que dans la bibliographie existante, les études se concentraient sur une architecture en particulier sans pour autant s'intéresser aux autres. Nous avons dans ce travail pris le temps d'étudier plus de matériaux afin d'enrichir les différentes recherches déjà publiées et de permettre une meilleure compréhension du comportement des tissus Interlocks à l'impact.

Enfin, un autre point innovant repose sur le choix des gammes de vitesses testées. Peu d'études existent et se concentrent principalement sur des vitesses basses ne permettant pas une bonne compréhension du comportement des structures multicouches soumises à de l'impact haute vitesse pour une application balistique. Notre étude concerne une gamme de vitesses et une menace très précise à savoir le 20 FSP, les acteurs de ce domaine verront dans ce travail un axe possible de protection par des matériaux composites à renfort Interlocks que ce soit au niveau de la performance des architectures testées mais aussi au niveau des mécanismes d'endommagement.

Ce travail peut être complété par d'autres tests afin d'étendre les différentes protections à d'autres menaces et gammes de vitesses. De plus, nous n'avons exploité qu'une petite partie des avantages que peuvent présenter les Interlocks de part la géométrie des structures, l'influence des paramètres de tissage (densité chaîne/trame) et des fils utilisés. Ainsi, au niveau des axes de recherche futurs, une suite de cette étude pourrait être réalisée en considérant d'autres géométries d'Interlocks ou de modifier les structures étudiées (masses surfaciques, taux de fibres, épaisseurs, choix des fibres et de la résine....). Les recherches futures pourraient être axées sur les Interlocks présentant des résultats balistiques convenables, et étudier plus en détails les modes de ruptures des fils afin de jouer sur leurs géométries et améliorer les propriétés à l'impact

Une attention particulière pourrait également être portée sur la mise en œuvre par infusion sous vide avec une pression plus élevée afin d'en déterminer les limites du procédé sur les tissus Interlocks. Enfin, il serait également intéressant de

poursuivre l'idée d'hybrider les matériaux entre eux. Pour cela, le rôle de l'interface sera à étudier en particulier pour infuser les matériaux ensemble ou les assembler simplement afin d'en accroître les performances.

Ce travail de recherche ouvre alors de nouvelles perspectives en allant toujours plus loin dans l'association de différents matériaux.

LISTES DES CONGRES
ET PUBLICATIONS

Liste des congrès et publications

Conférences internationales :

"High Energy absorption of Warp Interlock Fabrics: Application to high speed impact of fragments", M. Lefebvre, F. Boussu, DYMAT 2009, dynamic behaviour of materials and its applications, Bruxelles, (Belgique) , 7-11 Septembre 2009, ISBN 978 2 7598 0472 6

"High Energy absorption of Warp Interlock Fabrics: Application to high speed impact of fragments", M. Lefebvre, F. Boussu, AUTEX 2009 World Textile Conference 26-28 Mai, 2009, Izmir, (Turquie) ISBN 978 975 483 787 2

"Behaviour of warp interlock structure under high velocity steel ball impact", M. Lefebvre, F. Boussu, B. Provost, ITMC 2009, Intelligent Textiles and Mass Customisation, Casablanca (Maroc), 12-14 Novembre 2009, ISBN 978 9954 8878 1 4

"Behaviour of warp interlocks structures under an IEDs attack, application with orthogonal and through- the-thickness interlocks", Lefebvre Marie, Boussu François, NATO ASI Defence Related Intelligent Textiles and Clothing for Ballistic and NBC (Nuclear, Biological, Chemical) Protection, Split (Croatie), April 2010

"Influence of warp interlock parameters on the ballistic behaviour of a structure", M. Lefebvre, F. Boussu, D. Coutellier, TEXCOMP 2010, International Conference on Textile Composites, Lille (France), 26-28 Octobre 2010, ISBN 978-1-6095-026-6

"Study of impact behaviour of three warp interlock structures. Comparison with existing protections", M. Lefebvre, François Boussu, Daniel Coutellier, LWAG 2011, Light-Weight Armour Group, Haifa (Israel), 16-17 Mars 2011

"Study of Impact behaviour of three warp interlock structures for armoured vehicle", M. Lefebvre, François Boussu, Daniel Coutellier, Daniel Vallee, Workshop on Dynamic Failure of Composites and Sandwich Structures, Juin 2011, Toulouse, (France)

"Degradation measurement of fibrous reinforcement inside composite material", M. Lefebvre, François Boussu, Daniel Coutellier, ICCE 19, 19th International Conference on Composites or Nano Engineering, 24-30 Juillet 2011, Shanghai (Chine)

Conférence nationale:

« *Influence des paramètres de tissage sur des structures interlock soumises à l'impact balistique* », M. Lefebvre, François Boussu, Daniel Coutellier, JNC 17, Journées Nationales Composites, 14-17 Juin 2011, Poitiers (France), ISBN 978-274-6634-1-83

Publications

"Recent Advances in textile composite for impact protection", François Boussu, Frédérick Veyet, Marie Lefebvre, World Journal of Engineering, Vol 7 N°1, 2010, ISSN: 1708-5284

"Composites and Rapid Dynamics: Problem solving strategies and Solutions", Daniel Coutellier, François Boussu, Marie Lefebvre, chapitre de livre en cours de soumission dans « Recent advances in dynamic failure of composite and sandwich structures », édition Springer

"Impact of high performance yarns degradation inside 3D warp interlock fabric", Marie Lefebvre, François Boussu, Daniel Coutellier, soumise à Applied Composite Materials le 26 Juillet 2011 (des modifications mineures ont été demandées)

"Ballistic behaviour of lightweight armouring solutions combining aluminium plates and warp interlock fabrics impacted with a Fragment Simulating Projectile" Marie Lefebvre, François Boussu, Daniel Coutellier, Daniel Vallee, soumise à International Journal of Impact Engineering le 14 Novembre 2011.

Résistance à l'impact balistique de matériaux composites à renforts Interlocks tissés. Application au blindage de véhicules

Résumé – Ce travail de recherche vise à étudier le comportement à l'impact de matériaux composites à renfort Interlock. L'objectif final de cette étude est d'intégrer dans des blindages de véhicules terrestres, un matériau composite à renfort tissé Interlock de fibres hautes performances qui sera placé à l'arrière d'un matériau métallique utilisé pour fragmenter le projectile, ici un FSP, au moment de l'impact. Le matériau composite aura un rôle d'absorbeur d'énergie durant l'impact et permettra d'arrêter les fragments métalliques suite à la pénétration du blindage métallique par le projectile.

La réalisation de ce matériau passe par l'élaboration des structures tissées Interlocks sur une machine à tisser manuelle puis à la mise en œuvre des tissus par techniques d'infusion. Les matériaux sont ensuite testés en condition d'impact réel. Un critère de comparaison a été établi en prenant en compte la vitesse limite de perforation (V_{lp}) du matériau et les masses surfaciques de chaque structure testée afin de ramener les performances balistiques à iso masse. Pour cette étude nous avons choisi de fabriquer trois architectures Interlocks ayant des paramètres de tissage identiques. Nous avons choisi d'utiliser deux types de fibres, du Kevlar® et du Vectran® pour chaque structures. La modification du procédé de tissage et de l'infusion des matériaux a permis de faire ressortir deux structures Interlocks en Vectran® présentant un critère d'impact équivalent aux structures actuellement utilisées dans le domaine du blindage de véhicule.

Ballistic impact resistance of woven Interlock reinforced composites materials. Use in armoured vehicles

Abstract – The aim of this work is to study the impact behaviour of Interlock composite materials. The final objective is to integrate a composite material based on Interlock weaving structure into vehicle armor system that will be placed as backing of a metal panel used to fragment the FSP projectile during the impact. The composite materials should absorb the impact energy during impact and stop the metal fragments after penetration of the metal panel by the projectile.

The fabrication of these materials leads to create woven Interlock structures on a weaving loom and the implementation of the fabrics by infusion process. The materials are then impacted. A criterion of comparison was used, taking into account the speed limit perforation of the material and the area density of each impacted structures in order to compare the ballistic performance at the same weight. For this study we have made the choice to produce three Interlocks weaving structures with the same weaving parameters. We also choose to use two types of fibres, Kevlar® and Vectran® for each structure. The change of the weaving process and the infusion of materials allowed us to bring out two Interlocks structures composed of Vectran® fibres with the impact criterion equivalent to the structures currently used in the field of vehicle armor.

Discipline – Mécanique des matériaux

Mots clés – Balistique, Blindage, Perforation, Interlock, Tissage 3D

Key words –Ballistic, Armor system, Penetration, Interlock, 3D Weaving

Laboratoire d'accueil

Laboratoire de Génie et Matériaux Textiles (GEMTEX)

Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT)

2 allée Louise et Victor Champier – BP 30329, 59056 Roubaix Cedex 01

Bibliothèque Universitaire de Valenciennes



00900829