

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION D'UNE MAÎTRISE
GÉNIE MÉCANIQUE
M. Ing.

PAR
Cindy LAVALLÉE

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES TISSUS SUR LA
RÉSISTANCE À L'IMPACT DES MATÉRIAUX COMPOSITES

MONTRÉAL, LE 5 FÉVRIER 2010

© Cindy Lavallée, 2010

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Toan Vu-Khanh, directeur du mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Simon Joncas, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Mme Patricia Dolez, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Nicolas Juillard, examinateur externe
JB Martin – Président

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY

LE 14 JANVIER 2009

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier Patricia Dolez, Nicolas Juillard et Toan Vu-Khanh pour leur aide, conseils et supervision tout au long de mon projet. Je tiens également à remercier Michael H. Loney, Emmanuel Berry, Jennifer Finlayson, Dr. Tan Minh Tan-That, Manon Plourde, Rachid Boukhili, Dr. El Mostapha Frih, Jean-François Charron et Simon Chevalier pour leur aide et soutien ainsi que l'Institut des matériaux industriels (IMI), le conseil national de recherche du Canada (CNRC) et l'École Polytechnique de Montréal pour l'accès à leurs infrastructures. Je tiens aussi à remercier les organismes qui m'ont soutenue financièrement, JB Martin, le Fond de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DES TISSUS SUR LA RÉSISTANCE À L'IMPACT DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Cindy LAVALLÉE

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une étude de l'effet des propriétés des tissus de renfort sur la résistance à l'impact des matériaux composites. Les laminés sont fabriqués par infusion avec une résine de vinylester. Les tests d'impact sont effectués avec une énergie de 23 J selon la méthode du poids tombant décrite dans la norme ASTM D3763-02. L'influence des caractéristiques techniques suivantes des tissus et des laminés est étudiée : l'épaisseur des laminés; la qualité de fabrication des laminés; l'armure des tissus; la masse surfacique des tissus; la nature des tissus et l'usage des tissus hybrides. Les méthodes de caractérisation des résultats d'impact sont l'analyse visuelle des dommages et le calcul de l'absorption d'énergie en fonction de l'énergie d'impact $[E_a/E_I]$.

Les résultats démontrent que la qualité de fabrication des laminés est l'aspect qui a le plus d'influence sur la résistance à l'impact suivi par la nature des tissus. L'armure semble avoir peu d'effet à part pour la structure tridimensionnelle. La masse surfacique des fibres a une influence non significative. Voici l'ordre de performance des tissus de laminés comparés avec des poids égaux: (1) verre E / polypropylène haute densité balancé; (2) carbone / polypropylène haute densité non-balancé; (3) verre S2; (4) basalte; (5) verre E/polyester; (6) verre E; (7) verre E / aramide balancé; (8) carbone / polypropylène haute densité balancé; (9) carbone; (10) carbone / aramide balancé; (11) verre R haute résistance; (12) Aramide.

En complément du présent projet, une étude de produits spéciaux a été réalisée avec des résines d'époxy et d'époxy chargé de nanotubes de carbone ainsi qu'avec un tissu à résine intégré (filmants de polypropylène), le twintex.

Les résultats de ce mémoire permettent de faire une meilleure sélection des renforts pour la fabrication de composites soumis à des impacts à faible vitesse en fonction de leur résistance à l'impact. De plus, ses résultats permettront de concevoir des renforts qui auront des caractéristiques optimisées pour la résistance à l'impact. Finalement, cette étude a mis en évidence que la fibre d'aramide, contrairement à la croyance générale, n'est pas la meilleure solution pour la résistance à l'impact.

STUDY OF THE INFLUENCE OF FABRICS CHARACTERISTICS ON IMPACT RESISTANCE OF COMPOSITES MATERIALS

Cindy LAVALLÉE

ABSTRACT

This master's thesis presents a study of the effect of reinforcement fabric characteristics on the impact resistance of composite materials. Samples were produced with vinylester resin in an infusion process. The dropping tower method as described in the ASTM D3763-02 standard was used to impact specimens. The following technical characteristics of fabrics and laminates are studied: laminate thickness; laminate fabrication quality; fabric weaving; fabric surface density; fabric nature and hybrid fabrics. The impact resistance characterisation methods are the visual inspection of damage and the determination of the absorbed energy over impact energy $[E_a/E_I]$.

Results showed that the laminate fabrication quality has the largest effect on the impact resistance followed by the fabric's nature. The fabric weaving seems to only have a little effect except for tridimensional armature. The fabric's surface density has no significant influence. The performance order in regards to the fabric nature when normalised by laminate weight is: (1) balanced glass / polypropylène haute densité; (2) unbalanced carbon / polypropylène haute densité; (3) glass S2; (4) basalt; (5) glass / polyester; (6) glass E; (7) balanced glass / aramid; (8) balanced carbon / polypropylène haute densité; (9) carbon; (10) balanced carbon / aramid; (11) verre R haute résistance; and (12) aramid.

To complete this project, a study with special products was conducted with epoxy resins and epoxy resins charged with carbon nanotubes and also with twintex, an integrated resin fiber (polypropylene filaments).

A better fiber selection for composites fabrication exposed to low speed impacts will be possible using the results of this study. Also, fabrics optimized for impact resistance could be developed. Another major achievement was to show that, contrary to common belief, aramid fibers do not perform so well at impact tests.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Caractéristiques des tissus.....	2
1.2 Procédés de fabrication des composites.....	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	7
2.1 Types de tests d'impact.....	7
2.2 Impact à basse vitesse.....	8
2.3 Résistance et tolérance d'impact.....	10
2.4 Énergie dynamique dans les composites.....	10
2.4.1 Énergie emmagasinée.....	11
2.4.2 Énergie absorbée.....	13
2.4.3 Énergie dissipée.....	14
2.5 Caractéristiques des composites qui influencent la résistance à l'impact.....	14
2.6 Dommages suite à un impact.....	17
2.7 Tests d'impact.....	18
2.7.1 Méthode de Charpy.....	18
2.7.2 Méthode d'Izod.....	19
2.7.3 Méthode du poids tombant.....	20
2.8 Mesure de la résistance à l'impact.....	22
CHAPITRE 3 MÉTHODES EXPÉRIMENTALES.....	24
3.1 Matériaux.....	24
3.2 Fabrication des échantillons.....	29
3.3 Test d'impact.....	32
3.4 Caractérisation de l'endommagement.....	34
CHAPITRE 4 RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX.....	37
4.1 Influence de l'épaisseur du composite sur la résistance à l'impact.....	37
4.2 Influence de l'énergie d'impact.....	38
4.3 Mesures d'énergie.....	40
4.4 Caractérisation visuelle de l'endommagement.....	41
CHAPITRE 5 ANALYSE DE L'EFFET DES CARACTÉRISTIQUES DES RENFORTS.....	46
5.1 Influence de l'épaisseur des échantillons sur les résultats d'impact.....	46
5.2 Influence de l'énergie d'impact.....	50
5.3 Influence de la qualité de fabrication des composites.....	51
5.4 Influence de l'armure des tissus.....	53
5.5 Influence de la masse surfacique des tissus.....	61
5.6 Influence de la nature des tissus.....	64
5.6.1 Influence de la nature des tissus à masse surfacique égale.....	64
5.6.2 Influence de la nature des tissus à épaisseur égale et même armure.....	74

5.7	Comparaison des hybrides avec les non-hybrides	78
CHAPITRE 6 ÉTUDE DE PRODUITS SPECIAUX : RENFORTS PRÉ-IMPRÉGNÉS DE RÉSINE D'ÉPOXY ET RENFORT À RÉSINE INTÉGRÉE		89
6.1	Renfort pré-imprégné de résine d'époxy	89
6.2	Renfort à matrice intégrée.....	96
CHAPITRE 7 SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS.....		100
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		103
ANNEXE I ANALYSE VISUELLE DE LA RÉSISTANCE À L'IMPACT		106
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		115

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Essais de certains auteurs d'impact à basse vitesse	9
Tableau 3.1 Liste et caractéristiques des tissus étudiés	24
Tableau 3.2 Spécification techniques des fibres	26
Tableau 3.3 Propriétés mécaniques et chimiques des résines vinylester, époxy et époxy chargé de nanotube de carbone	28
Tableau 3.4 Procédure d'utilisation des résines pendant la fabrication des laminés et de post cuisson	31
Tableau 4.1 Résultats des tests d'impact et caractéristiques des échantillons (% Vf : pourcentage volume de fibre; Ea : énergie absorbée; EI : énergie d'impact; Ea/EI : énergie absorbée sur l'énergie d'impact)	40
Tableau 4.2 Caractérisation visuelle de l'endommagement des échantillons.....	42
Tableau 5.1 Rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, Ea/EI ramené à une épaisseur d'échantillon de 3 mm et ramené à un poids d'échantillon de 40 g. Les caractéristiques des tissus sont présentées au Tableau 3.1	49
Tableau 5.2 Résistance à l'impact en fonction de la qualité du composite	53
Tableau 5.3 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.7 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	56
Tableau 5.4 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.8 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	58
Tableau 5.5 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.9 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	60
Tableau 5.6 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.10 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	62
Tableau 5.7 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.11 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	63

Tableau 5.8	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.12 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	66
Tableau 5.9	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.13 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	68
Tableau 5.10	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.14 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	70
Tableau 5.11	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.15 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	72
Tableau 5.12	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.16 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	76
Tableau 5.13	Comparaison des résultats de l'analyse visuelle de l'endommagement en fonction de la nature des fibres	77
Tableau 5.14	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.17 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	80
Tableau 5.15	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.18 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	82
Tableau 5.16	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.19 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	83
Tableau 5.17	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.20 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	85
Tableau 5.18	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.21 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	87
Tableau 5.19	Comparaison des résultats de l'analyse visuelle en fonction de la nature des fibres des hybrides.....	88
Tableau 6.1	Résultats des tests d'impact et caractéristiques des échantillons.....	90

Tableau 6.2	Caractérisation visuelle des impacts	91
Tableau 6.3	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 6.1 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	93
Tableau 6.4	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 6.2 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	95
Tableau 6.5	Résultats des tests d'impact et caractéristiques des échantillons.....	96
Tableau 6.6	Caractérisation visuelle des impacts	97
Tableau 6.7	Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 6.3 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence.....	99

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Tissus taffetas.....	3
Figure 1.2 Tissu sergé. ¹	3
Figure 1.3 Tissu tridimensionnel (NCS). ¹	3
Figure 1.4 Tissu satin. ¹	3
Figure 1.5 Tissu interlock. ¹	3
Figure 1.6 Fabrication de composites avec la méthode moulage contact.....	4
Figure 1.7 Fabrication de composites avec la méthode moulage par transfert de résine.....	5
Figure 1.8 Fabrication de composites avec la méthode moulage par infusion.....	6
Figure 2.1 Distribution de l'énergie d'impact.....	11
Figure 2.2 Développement de fissures dans la matrice d'une plaque souple.....	15
Figure 2.3 Développement des fissures dans la matrice d'une plaque rigide.....	16
Figure 2.4 Aire de dommage projetée.....	17
Figure 2.5 Test d'impact: (a) Essai Charpy, (b) Essai Izod, (c) Poids tombant.....	18
Figure 2.6 Essai de Charpy.....	19
Figure 2.7 Essai d'Izod.....	20
Figure 3.1 Montage d'infusion (injection en périphérie et succion au centre).....	30
Figure 3.2 Machine d'impact utilisée.....	33
Figure 3.3 Énergie et charge en fonction du temps du laminé TG09P de 13 plis infusé avec du vinylester.....	34
Figure 4.1 Variation du rapport entre l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact (Ea/EI) en fonction de l'épaisseur des plaques de composite infusées avec de la résine de vinylester et avec les renforts suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6oz/vg ²), TA05P (aramide; taffetas; 5oz/vg ²), TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg ²) et TX24P (basalte; taffetas; 24 oz/vg ²).....	38

Figure 4.2	Variation du rapport entre l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de l'énergie d'impact, E_I , du matériau TG09N (verre E; sergé; 9 oz/vg ²) / Vinylester.....	39
Figure 5.1	Variation du rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de l'épaisseur du composite TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg ²) / Vinylester.	47
Figure 5.3	Variation du rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de l'épaisseur dans une plage de 2,00 à 3,50 mm. Les renforts utilisées dans la fabrication des laminés infusés avec du vinylester sont les suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg ²), TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg ²), TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg ²) et TX24P (basalte; taffetas; 24 oz/vg ²).....	48
Figure 5.4	Variation de l'énergie absorbée, E_a , en fonction de la vitesse d'impact, V , du composite TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg ²) / Vinylester.....	51
Figure 5.5	Résultats d'un test d'impact sur les composites infusés avec du vinylester et des renforts de TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg ²), en (a) qualité de fabrication supérieure avec un volume de fibre de 57% et en (b) qualité de fabrication standard avec un volume de fibre de 52%.	52
Figure 5.6	Influence de la qualité d'infusion sur la résistance à l'impact. Laminés avec renfort TG09T (verre E; taffetas; 9 oz/vg ²) infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.....	53
Figure 5.7	Influence du type d'armure sur la résistance à l'impact. Les laminés sont fabriqués avec les renforts suivants : TG09J (verre E; satin; 9 oz/vg ²), TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg ²), TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg ²) et TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg ²) infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22J.....	55
Figure 5.8	Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type d'armure. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg ²), TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg ²), TC18N (carbone; tridimensionnel NCS; 18 oz/vg ²) et TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg ²) infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.....	58
Figure 5.9	Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type d'armure. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg ²), UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg ²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 40 J.	60

- Figure 5.10 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la masse surfacique des tissus taffetas. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²) et TG24P (verre E; taffetas; 24 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 61
- Figure 5.11 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la masse surfacique des tissus tridimensionnels. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG54N (verre E; tridimensionnel NCS; 54 oz/vg²) et TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 63
- Figure 5.12 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²) et TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 65
- Figure 5.13 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²), TA09S (aramide; sergé; 9 oz/vg²), TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 67
- Figure 5.14 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : L14003 (verre S2; taffetas; 24 oz/vg²), TX24P (basalte; taffetas; 24 oz/vg²), TG24P (verre E; taffetas; 24 oz/vg²) et L14025 (verre R haute performance; taffetas; 24 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 69
- Figure 5.15 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg²), TG33N (verre E; tridimensionnel NCS; 33 oz/vg²) et TG31E (verre E; interlock; 31 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 71
- Figure 5.16 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus avec des tissus d'épaisseur similaire et d'armure identique. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg²), TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²), TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²), TA05P (aramide; taffetas; 6 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 75
- Figure 5.17 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de

verre E et aramide. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²), TH12R (hybride verre E / aramide; sergé; balancé; 12 oz/vg²) et TA09P (aramide; sergé; 9 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J..... 79

Figure 5.18 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de carbone et aramide. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²), TN07T (hybride carbone / aramide; sergé; balancé; 7 oz/vg²) et TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J..... 81

Figure 5.19 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de verre E et polyester. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TR08P (hybride verre E / polyester; non-balancé; 8 oz/vg²) et TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J. 83

Figure 5.20 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de verre E et polypropylène haute densité. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : EUM7T (hybride verre E / polypropylène haute densité; sergé; balancé; 7 oz/vg²), EUM7P (hybride verre E / polypropylène haute densité; taffetas; balancé; 7 oz/vg²) et TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), infusés avec du vinylester et impactés à 22 J. 84

Figure 5.21 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de carbone et polypropylène haute densité. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : EO06P (hybride carbone / polypropylène haute densité; taffetas; non-balancé; 6 oz/vg²) avec les plis non-alterné [0/0], TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²), EO06P (hybride carbone / polypropylène haute densité; taffetas; non-balancé; 6 oz/vg²) avec les plis alterné [0/90] et EOM6T (hybride carbone / polypropylène haute densité; sergé; balancé; 6 oz/vg²), infusés avec du vinylester et impactés à 22 J..... 86

Figure 6.1 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type de résine. Les laminés sont fabriqués avec le tissu de renfort TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) et infusés avec les trois résines suivantes : vinylester, film d'époxy et film d'époxy chargé de nanotube de carbone. Les laminés sont impactés à 22 J. 92

Figure 6.2 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type de résine. Les laminés sont fabriqués avec le tissu de renfort TC06P (carbone taffetas de 6 oz/vg²) et infusés avec les trois résines suivantes :

vinylester, film d'époxy et film d'époxy chargé de nanotube de carbone. Les laminés sont impactés à 22 J. 94

Figure 6.3 Comparaison de la résistance à l'impact des laminés de twintex fabriqués sous vide et au rouleau chauffant avec des laminés de verre E infusés avec de la résine vinylester. Les échantillons ont été impactés à 22 J. 98

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Un grand nombre d'études sur la résistance à l'impact des matériaux composites existent. En effet, de nombreux produits en composite ont à supporter des sollicitations importantes à l'impact tel que les coques des bateaux, les trains, les réservoirs de transport etc. Cependant, peu de travaux ont examiné l'effet des caractéristiques des renforts tissés sur les propriétés à l'impact.

Cette étude vise à réaliser une analyse systématique des renforts. Cette connaissance permettra de faire des choix de renfort plus éclairés en fonction des contraintes mécaniques et financières selon l'application tel que le transport, la marine, le génie civil, l'aéronautique, l'énergie, le militaire et les sports et loisir. De plus, ses résultats permettront de concevoir des renforts qui auront des caractéristiques optimisées pour la résistance à l'impact. Les tissus étudiés, sont produits par la compagnie JB Martin, qui est une référence à l'échelle mondiale en termes de textiles techniques. Ils sont représentatifs de la majorité des renforts tissés utilisés actuellement dans le domaine des composites résistants à l'impact.

Plusieurs aspects sont évalués dans ce projet de recherche visant à déterminer la résistance à l'impact des renforts tissés : l'influence de l'épaisseur des échantillons, de l'énergie d'impact appliquée, de la qualité des laminés, de l'armure des tissus, de la masse surfacique des tissus, de la nature des tissus; de l'utilisation de tissus hybrides et du type de résine utilisé. Au total, vingt-six tissus et trois résines y sont étudiés et soumis à des tests d'impacts à faible vitesse.

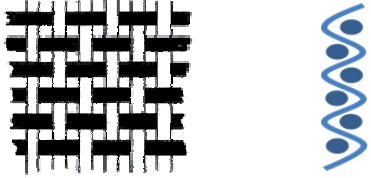
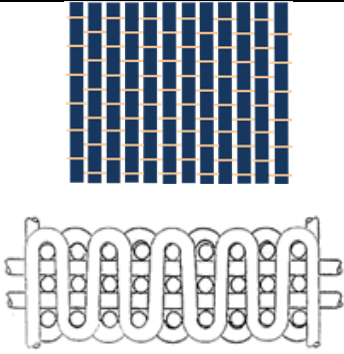
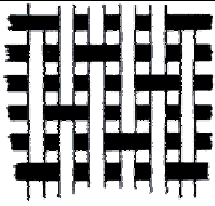
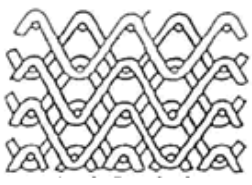
La principale difficulté de ce projet a été d'élaborer la matrice d'essais, soit les paramètres étudiés et pris en considération. L'objectif est de parvenir à évaluer la résistance à l'impact des renforts tissés à l'intérieur des délais de temps prescrit par un projet de maîtrise. Par conséquent, plusieurs aspects tels que l'adhésion fibre matrice, la nature de la résine ainsi que

l'interrelation entre les différentes caractéristiques n'ont pas été étudiées dans ce projet. Dans ce présent mémoire, l'analyse micromécanique ainsi que les équations théoriques ne sont pas évaluées dues à l'envergure de la matrice d'essai. L'objectif de ce projet n'est pas de prédire le comportement de matériaux à l'impact, mais de pouvoir comparer une large quantité de matériaux.

1.1 Caractéristiques des tissus

Il existe deux types de renforts utilisés pour la fabrication des composites : les renforts tissés et les non-tissés, ces derniers pouvant être fabriqués soit avec des fibres longues ou des fibres courtes. Les fils tissés sont dans la plupart des cas d'orientation 0° (sens chaîne) par 90° (sens trame), cependant il existe d'autres configurations. Dans cette étude seuls les renforts tissés sont étudiés car ils offrent une meilleure résistance à l'impact. La première caractéristique des tissus est la nature de la fibre. Chacune de ces fibres a des caractéristiques (mécaniques) différentes telles que la masse volumique, l'élongation à la rupture, la résistance en traction, la rigidité. Ces fibres sont mises sous forme de filament et de fils et ont aussi plusieurs caractéristiques variables telles que le diamètre des filaments, le nombre de filaments par fils et la grosseur des fils. Ces propriétés des fibres influencent grandement les propriétés du tissu.

Une autre caractéristique des tissus est l'armure. Dans cette étude, des tissus de cinq armures différentes sont utilisés pour fabriquer les laminés : le taffetas; le sergé; le tridimensionnel (NCS), le satin et l'interlock. Ces cinq armures sont illustrées dans les Figure 1.1 à Figure 1.5. (Fiber materials, consulté le 13 septembre 09)

 Figure 1.1 Tissus taffetas.¹	Le taffetas est un tissu d'armure toile qui contient seulement deux fils chaînes, un au-dessus et un en-dessous du fils trame. C'est l'armature la plus simple à réaliser.
 Figure 1.2 Tissu sergé.¹	Le sergé est caractérisé par ses obliques. Le fil de chaîne passe au-dessus et en dessous de deux fils de trame décalés de un fil dans le sens chaîne. Ce tissu est plus malléable que le taffetas.
 Figure 1.3 Tissu tridimensionnel (NCS).¹	Le tissu tridimensionnel (NCS) est un tissu orthogonal rectiligne. Les fils sont maintenus grâce à un fin fil liant de polyester ou de verre. Cette configuration élimine les angles des fils du renfort et maximise la résistance en traction. De plus, cette configuration augmente le taux de fibre possible à atteindre.
 Figure 1.4 Tissu satin.¹	Le tissu satin possède une armature aléatoire qui élimine les répétitions de motifs et grâce à la répartition des points de liage, les effets accentués de diagonale sont évités. Ce type d'armature produit les étoffes les plus fines et de haute densité.
 Figure 1.5 Tissu interlock.¹	Les tissus interlocks permettent de combiner des tissus entre eux ce qui augmente l'épaisseur du tissu. Plus d'un style d'armure peut être combiné dans un tissu interlock.

¹ Source: Fiber materials inc., 2-D woven structures

1.2 Procédés de fabrication des composites

Plusieurs méthodes sont actuellement utilisés en industrie pour la fabrication des composites, en voici quelques-unes : moulage contact, enroulement filamentaire, pultrusion, moulage sous vide, moulage par transfert de résine (RTM : *resine transfert molding*), moulage par infusion etc. (Ruiz, 2008) Les méthodes les plus couramment utilisées avec des renforts tissés et des résines thermodurcissables sont le moulage contact, le moulage pré-imprégné, le moulage par transfert de résine et le moulage par infusion.

Le moulage contact s'effectue sur un moule ouvert et consiste à étendre le premier pli de renfort sur le moule, à ajouter la résine et à étendre la résine à l'aide d'un rouleau. L'action est répétée pour chaque pli ajouté au composite. La Figure 1.6 présente un schéma de la procédure de fabrication d'un composite avec la méthode moulage contact. Des trois méthodes décrites, le moulage contact produit des laminés de moins bonne qualité à cause de l'absence du contrôle du volume de résine. Par ailleurs, puisque ce montage n'est pas sous vide, les laminés ont un plus haut pourcentage d'air emprisonné, ce qui les rend fragiles.

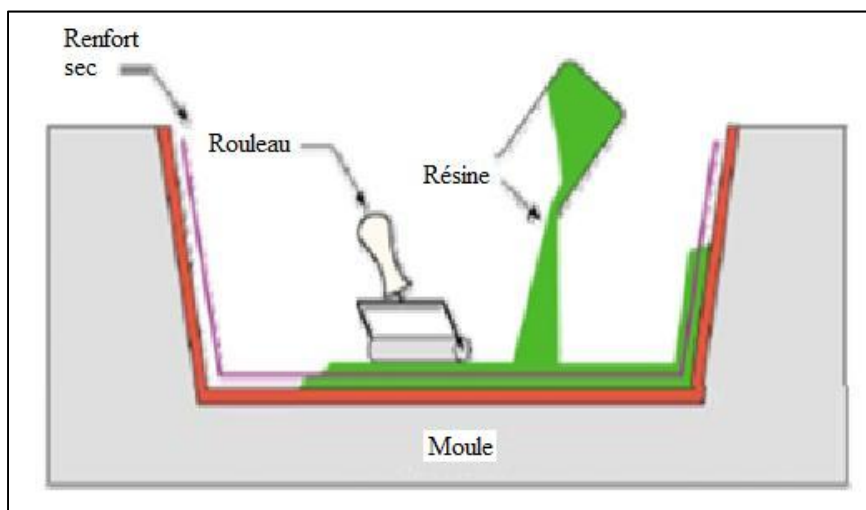


Figure 1.6 Fabrication de composites avec la méthode moulage contact.

Tirée de Ruiz (2008, p.11)

Le moulage par transfert de résine (RTM) s'effectue dans un moule fermé constitué de deux moules rigides. Cette particularité permet de contrôler l'épaisseur du composite. La résine et le catalyseur sont injectés dans un mélangeur à l'aide d'une pompe puis par la suite dans le moule. Cette méthode de fabrication s'effectue sous vide en y ajoutant de la pression ce qui minimise l'air emprisonné dans le composite. Un schéma en illustre le principe à la Figure 1.7. Elle produit des pièces de qualité supérieure. Par contre cette méthode est plus coûteuse que l'infusion et le moulage contact car elle nécessite deux moules rigides et un système d'injection plus complexe.

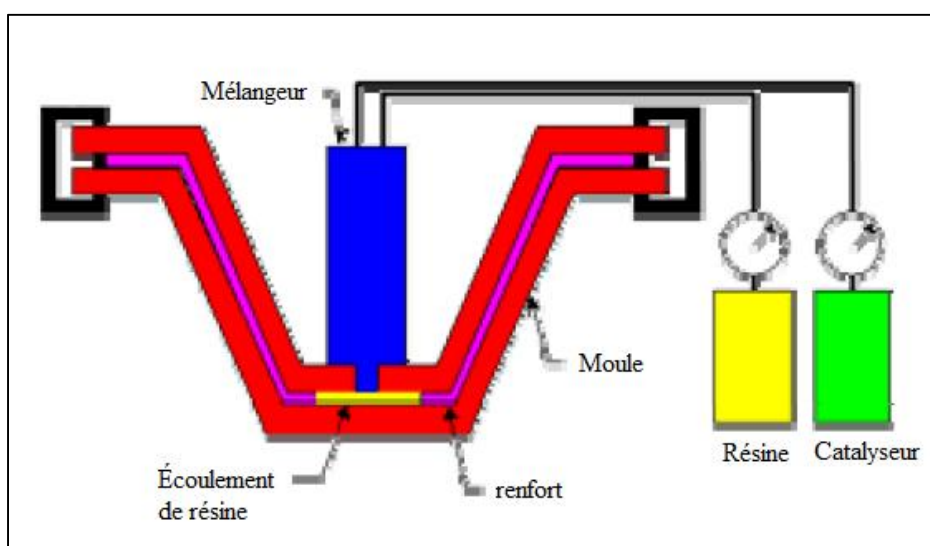


Figure 1.7 Fabrication de composites avec la méthode moulage par transfert de résine.

Tirée de Ruiz (2008, p.48)

La troisième méthode de fabrication, le moulage par infusion, est celle utilisée dans le cadre de ce projet. Elle s'effectue dans un moule fermé constitué d'un moule rigide et d'un moule flexible. La résine est infusée dans le système à l'aide d'une pompe à vide qui tire la résine à travers le renfort. Cette méthode produit des composites de bonne qualité. Elle est par ailleurs moins coûteuse que le moulage par transfert de résine. Mais elle ne permet de mieux

contrôler l'épaisseur du laminé. La Figure 1.8 montre un schéma de fabrication de composites avec la méthode de moulage par infusion.

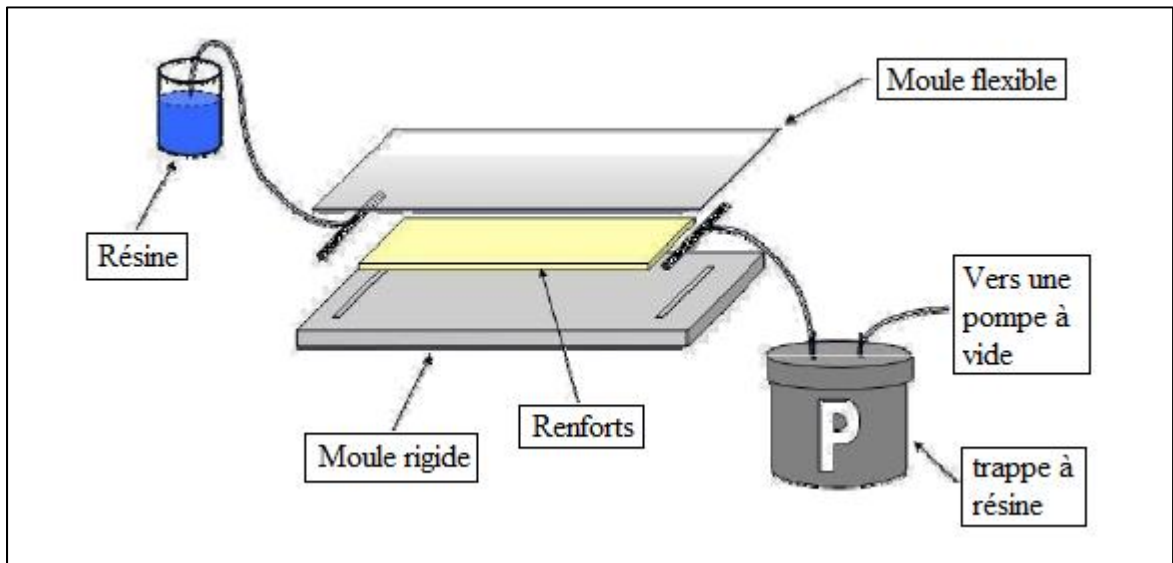


Figure 1.8 Fabrication de composites avec la méthode moulage par infusion.
Tirée de Ruiz (2008, p.54)

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette revue de la littérature présente les aspects suivants de l'impact : les types de test d'impact, la résistance et la tolérance à l'impact, l'énergie dynamique dans les composites, l'énergie emmagasinée, l'énergie absorbée, l'énergie dissipée, les caractéristiques des composites qui influencent la résistance à l'impact, l'endommagement suite à un impact, les tests d'impact, la mesure de la résistance à l'impact et la théorie des plaques et des coques.

2.1 Types de tests d'impact

Il existe trois types de test d'impacts, soit les ponctions et les impacts à haute et basse vitesse. (TRUDEL, 2000), (Richardson et Wisheart, 1996), (Davies et Robinson, 1992) et (Sjöblom, 1988)

Une ponction est une indentation statique (très faible vitesse) sur un matériau : l'outil perforateur est positionné sur une des faces du matériau et une charge est appliquée sur celui-ci.

Un impact à faible vitesse est généralement constitué d'un impacteur de grande masse avec une faible vitesse et un impact à haute vitesse est effectué avec une petite masse à haute vitesse. La distinction de vitesse entre les impacts à haute vitesse et à basse vitesse varie selon les auteurs.

Plusieurs auteurs caractérisent le type d'impact en fonction de la réponse du matériau. (Liu et Malvern, 1987) La perforation est le principal dommage observé suite à un impact à haute vitesse. Par contre les impacts à faible vitesse provoquent généralement des délaminations et des fissurations dans la matrice.

2.2 Impact à basse vitesse

La plage de vitesse d'un impact à basse vitesse varie selon les auteurs, le matériau et les paramètres utilisés. Il est donc très difficile de tirer des conclusions sur les vitesses qui différencient les impacts à faible et haute vitesse. Richardson mentionne que la vitesse d'un impact à basse vitesse varie entre 1 et 10 m/s. (Richardson et Wisheart, 1996) Il mentionne aussi que celle-ci varie en fonction de la dureté du matériau, de la masse de l'impacteur et de la dureté de l'impacteur. D'autre part, Warren mentionne qu'un impact à faible vitesse ne dépasse pas 50 m/s. (Warren, 1996) Il ne fait pas référence aux matériaux, aux paramètres ou à l'installation utilisée. Zhou mentionne qu'un impact à faible vitesse varie entre 2 et 8 m/s. (Zhou, 1995) Cantwell mentionne qu'un impact à faible vitesse ne devrait pas dépasser 10 m/s. (Cantwell et Morton, 1991)

Le Tableau 2.1 présente un récapitulatif des caractéristiques des tests d'impact de quelques-uns de ces auteurs. La majorité des chercheurs ont étudié les impacts à basse vitesse.

Tableau 2.1 Essais de certains auteurs d'impact à basse vitesse

Auteur	Matériaux	%M fibre	Énergie /vitesse d'impact	Masse
Trudel (2000) (Impact machine: Dynatup 8200)	Laminé FV/PP [0/90]2S → 8 plis	60%	1 à 10 J	1,18 kg
	Sergé FV/PP, 8 plis, Twintex Poids du tissu : 22 oz/yd ²	60%	1 à 10 J	1,18 kg
Warren (1996) (Impact machine: Dynatup 8200)	Taffetas, Verre E/Vinylester Épaisseur: 6,4 mm; 7 plis; Poids du tissu: 24 oz/yd ²	44%	1 à 250 J	3,62 à 14,5 kg
	Non-tissé, Verre E/Vinylester Épaisseur: 6,4 mm; 8 plis; Poids du tissu: 14 oz/yd ²	38%		
	Mat fil continu, Verre E/Vinylester Épaisseur: 6,4 mm; 8 plis; Poids du tissu: 2,5 oz/yd ²	22%		
	Taffetas, Verre S2/Polyester Épaisseur: 6,4 mm; 10 plis; Poids du tissu: 24 oz/yd ²	47%		
	Tricot cueilli, Verre E/Polyester Épaisseur: 3,2 mm; 1 plis; Poids du tissu: 11 oz/yd ²	8%		
	Feuille d'aluminium 6061 Épaisseur : 6,4 mm Poids : 254 oz/yd ²			
Liu (1987)	Préimprégné, Verre E/Epoxy 1003 de 3M Scotchply [0 ₅ /90 ₅ /0 ₅] → 15 plis Épaisseur : 3,8 mm (152x152 mm)		20 à 100 m/s	14,3 g
Zhou (1995)	Tissu stratifié, Verre E/Polyester 30% plus de fibre en 0° Épaisseur : 10 et 25 mm Plaque circulaire de 100 et 500mm 8 plis		2 à 8 m/s	
	Verre S2/Phenolic, Plaque circulaire de 100 et 500mm 8 plis			

Note : FV : fibre de verre
PP : polypropylène

2.3 Résistance et tolérance d'impact

La résistance à l'impact qualifie la capacité du matériau à absorber de l'énergie. (Warren, 1996) et (Lagace, 1993) La tolérance à l'impact mesure l'intégrité résiduelle, soit les propriétés résiduelles du matériau. Elle traite aussi des causes de dommage, des effets du dommage et des conséquences de ceux-ci.

2.4 Énergie dynamique dans les composites

Il existe trois types d'énergies associées à un endommagement : l'énergie absorbée, l'énergie dissipée et l'énergie emmagasinée. (Warren, 1996) et (Rydin, 1995) Tout d'abord, l'énergie absorbée provoque des déformations plastiques qui sont des dommages irréversibles, soit des fissures, délaminations etc. De son côté, l'énergie de dissipation se traduit par des pertes par glissement, friction et vibration dans l'environnement. Finalement, l'énergie emmagasinée peut se manifester par une déformation qui est retransmise ou non à l'impacteur sous forme de rebond. Elle peut aussi être interprétée comme une déformation élastique. La Figure 2.1 illustre cette distribution de l'énergie incidente suite à un impact.

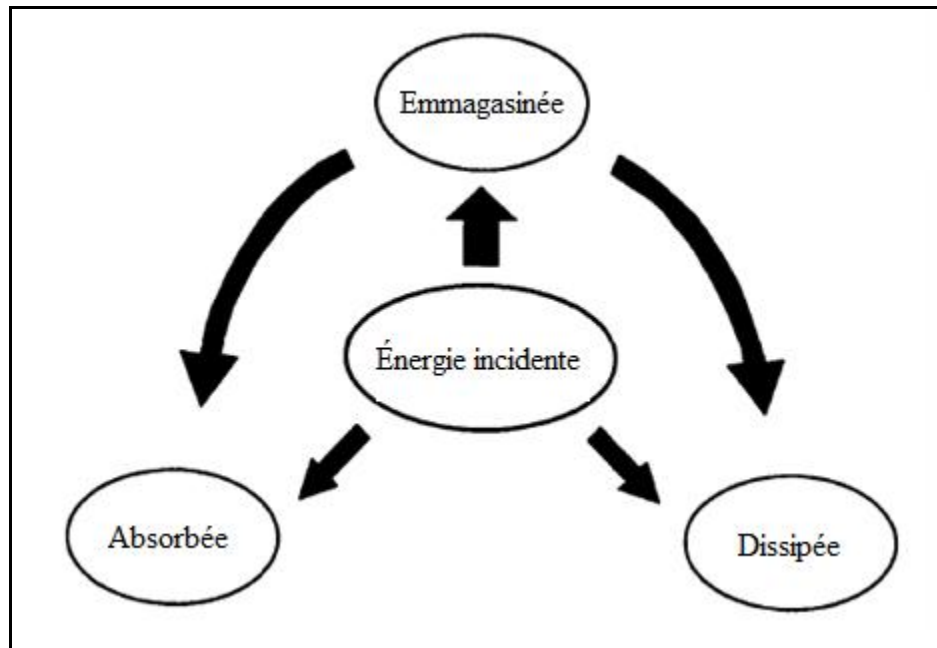


Figure 2.1 Distribution de l'énergie d'impact
Tirée de Warren (1996, p.69)

L'équation qui régit l'énergie d'impact est la suivante (Warren, 1996):

$$E_{\text{incidente}}(t) = E_{\text{emmagasinée}}(t) + E_{\text{absorbée}}(t) + E_{\text{dissipée}}(t) \quad (2-1)$$

2.4.1 Énergie emmagasinée

L'ensemble des déformations élastiques constitue l'énergie emmagasinée. (Warren, 1996) À titre d'exemple, le caoutchouc qui a une grande capacité de déformation élastique emmagasine beaucoup d'énergie. Lorsque celui-ci reprend sa forme, il redonne et/ou dissipe l'énergie. Lors d'un impact, ce phénomène se traduit par un rebond. De plus, lorsque le matériau ne peut plus emmagasiner d'énergie, il y a déformation plastique : fracture ou fissure, délamination, vibration etc. Cette portion d'énergie se convertit en énergie absorbée ou dissipée.

Warren a proposé l'équation (2-2) pour traduire l'équilibre des énergies lors d'un impact sur un matériau composite :

$$\frac{1}{2} m_T v_i^2 = \int_0^{\delta_p} P_p d\delta_p + \int_0^{\delta_i} P_c d\delta_i + \int_0^{\delta_f} P_f d\delta_f \quad (2-2)$$

Légende:

m_T : Masse de l'impacteur

v_i : Vitesse à l'impact de l'impacteur

P_p : Chargement de réaction de la plaque

δ_p : Déflexion globale de la plaque

P_c : Chargement du contact de l'impact

δ_i : Indentation locale

P_f : Chargement transmise au support

δ_f : Déflexion du support

Dans le cas où le matériau est une plaque mince, l'énergie élastique emmagasinée dans le support est négligeable donc l'équation (2-2) devient :

$$\frac{1}{2} m_T v_i^2 = \int_0^{\delta_p} P_p d\delta_p + \int_0^{\delta_i} P_c d\delta_i \quad (2-3)$$

Selon Richardson, l'équation suivante décrit l'énergie emmagasinée dans le matériau composite encastré à la rupture (Richardson, 1996) et (Dorey, 1988)

$$\text{Énergie} = \frac{2\tau^2 w L^3}{9E_f t} \quad (2-4)$$

Légende :

t : Épaisseur

τ : Contrainte de cisaillement

w : largeur

L : Longueur non supportée

E_f : Module de flexion

2.4.2 Énergie absorbée

L'énergie absorbée par un matériau lors d'un impact est la portion de l'énergie qui n'est pas rendue à la source d'énergie ou à son environnement immédiat. (Warren, 1996, p.75) Cette énergie se traduit par un dommage : cassure des fibres, fissuration laminaire et inter-laminaire, délamination et/ou fissuration dans la matrice. Il est possible de quantifier cette énergie par l'énergie d'impact et l'énergie de rebond tel que décrit par l'équation (2-5).

$$E_a = E_I - E_r \quad (2-5)$$

E_a : Énergie absorbée

E_I : Énergie d'impact

E_r : Énergie de rebond

Les énergies d'impact et de rebond peuvent être déterminées à l'aide d'une cellule photoélectrique localisée juste au dessus de l'échantillon et permet de mesurer la vitesse de l'impacteur. Elles sont calculées à l'aide des équations d'énergie cinétique suivante : $E_I = \frac{1}{2}mv_I^2$ et $E_r = \frac{1}{2}mv_r^2$. La vitesse pour l'énergie d'impact est v_I et la vitesse de l'énergie de rebond est v_r et elle correspond à l'instant où l'impacteur quitte le matériau, soit la vitesse initiale du rebond.

Il est important de connaître l'énergie absorbée, car elle permet de déterminer la résistance à l'impact du matériau en fonction de l'énergie d'impact : E_a/EI .

2.4.3 Énergie dissipée

La dissipation d'énergie est caractérisée par une perte irréversible. (Warren, 1996) et (Gibson, 1992) Les vibrations sont des exemples d'énergie dissipée, tel que la vibration de l'air, la radiation acoustique et la friction du support. Ces pertes sont non-linéaires. Warren mentionne qu'il existe cinq mécanismes internes de vibration qui contrôlent la dissipation d'énergie : (1) le comportement visco-élastique des matériaux, (2) l'amortissement thermo-élastique causé par les cycles de transfert de chaleur entre les régions en compression et celles en tension, (3) la friction de Coulomb causée par une délamination à l'interface fibre-matrice, (4) la dissipation d'énergie aux zones de fissure et de délamination (5) l'amortissement de dislocation et (6) l'effet du courant d'Eddy. Les mécanismes 2 et 5 s'appliquent surtout aux composites à matrice métallique tandis que les mécanismes 1 et 3 s'appliquent surtout aux composites à matrice polymérique.

2.5 Caractéristiques des composites qui influencent la résistance à l'impact

Plusieurs auteurs ont proposé une liste de caractéristiques des composites qui favorisent leur résistance à l'impact. (Warren, 1996) et (Curtis, 1984) Tout d'abord, l'empilement 0, +/-45 des tissus produit des propriétés optimales et minimisent les dommages dus à un impact. Les fils verrouillés (Bundle interlocking) facilitent la résistance à l'impact. De plus, le choix des fibres est crucial car la capacité de celles-ci à emmagasiner de l'énergie élastique est fondamentale pour la résistance à l'impact dans un test à basse vitesse. Le diamètre des fils a aussi son importance, car plus celui-ci est petit, plus il y a d'énergie de déformation absorbée. Tant que le matériau peut emmagasiner de l'énergie de déformation, il résiste à la rupture.

Il a aussi été rapporté qu'une surface pré-endommagée aura une meilleure résistance à la perforation car la surface a une meilleure conformabilité à un impacteur semi-sphérique.

(Warren, 1996) et (Lagace, 1991) De plus les fibres longues sont plus résistantes à l'impact parce qu'il y a une plus grande distribution de la charge. Par contre, l'existence de fissure avant l'impact provoque une délamination sans le développement ou la propagation de nouvelle fissure. Par conséquent, seul un pré endommagement en surface est désiré.

La matrice joue aussi un rôle très important dans la résistance à l'impact car elle représente souvent la faiblesse du composite. (Warren, 1996) et (Cantweell, 1991) Elle permet de protéger et stabiliser les fibres et d'avoir un transfert de charge uniforme sur celles-ci. Lorsque la matrice est endommagée, sa capacité à remplir ses fonctions se voit diminuée. Ses propriétés influencent l'initiation de l'endommagement, ce qui affecte la résistance à l'impact du composite. Pour cette raison, le processus de fabrication a une influence sur la résistance à l'impact des composites, car il joue un rôle important sur la qualité de la matrice. (Warren, 1996)

Deux configurations de propagation de fissure peuvent être observées selon que la plaque est mince ou épaisse. (Lui, 1987), (cantwell, 1985) et (Warren, 1996) La Figure 2.2 représente la propagation de fissures et la délamination suite à un impact dans une plaque souple, c'est-à-dire une plaque mince ou un matériau souple.

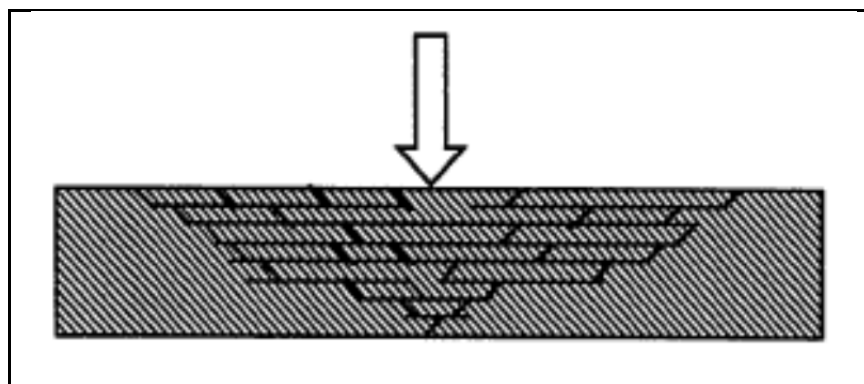


Figure 2.2 Développement de fissures dans la matrice d'une plaque souple.

Tirée de Warren (1996, p.86)

Lorsque la plaque est plus épaisse, elle devient plus rigide, ce qui provoque une rupture en cisaillement avec une plus grande absorption d'énergie, tel qu'illustré dans la Figure 2.3.

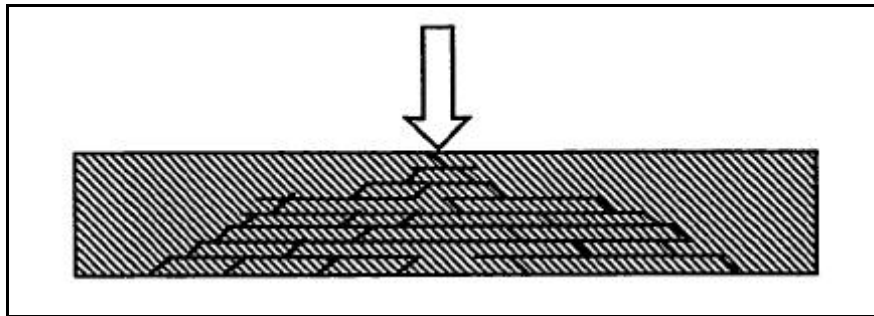


Figure 2.3 Développement des fissures dans la matrice d'une plaque rigide.

Tirée de Warren (1996, p. 86)

La délamination se produit en raison d'une combinaison des contraintes de cisaillement interlaminaires, de séparation et de tension. L'augmentation de l'énergie d'impact engendre une augmentation de la zone de délamination et une diminution de la résistance en cisaillement interlaminaire du composite.

La vitesse de propagation de la délamination approche la vitesse de l'onde de tension et elle semble indépendante de la force, de la masse et de la vitesse de l'impacteur. À titre d'exemple, la vitesse d'onde de tension d'un composite verre/époxy est de 225-300 m/s. (Warren, 1996)

En résumé, plusieurs aspects affectent la résistance d'un matériau composite à l'impact. Tout d'abord, les contraintes interlaminaires sont contrôlées par la géométrie des échantillons, les conditions aux frontières et les conditions de chargement. D'autre part, la résistance du composite est déterminée par les propriétés des matériaux constitutifs.

2.6 Dommages suite à un impact

Selon Warren, la délamination par pli a la forme d'une arachide telle qu'illustrée dans la Figure 2.4. (Warren, 1996)

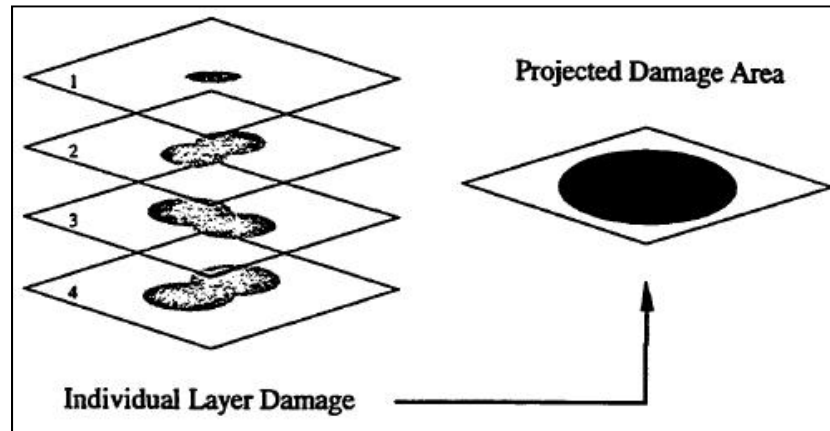


Figure 2.4 Aire de dommage projetée.

Tirée de Warren (1996, p. 89)

Lors d'un impact, l'endommagement le plus fréquente, est la délamination. (Warren, 1996) et (Hong, 1989) L'équation suivante présente la relation linéaire entre l'énergie d'impact et la surface projetée à l'endommagement proposée par Warren.

$$PDA = E_{\text{impact}} \cdot (K_2) + K_1 \quad (2-6)$$

PDA : Surface projeté d'endommagement

E_{impact} : Énergie d'impact

K_1 : Constante correspondant à l'énergie au seuil
d'initiation de l'endommagement

K_2 : Constante

En plus de la délamination, les dommages possibles sont la fissuration de la matrice, la rupture des fibres, la déformation et la perforation.

2.7 Tests d'impact

Il existe plusieurs normes relatives aux tests d'impact. (Trudel-Boucher, 2000) et (Kakarala, 1987) Elles correspondent à l'une des trois configurations suivantes : essai Charpy, essai d'Izod et poids tombant, qui sont illustrées dans la Figure 2.5. Il est à noter que la majorité de ces normes concernent les métaux; par conséquent les dimensions des échantillons ne sont pas toujours pertinentes pour les matériaux composites.

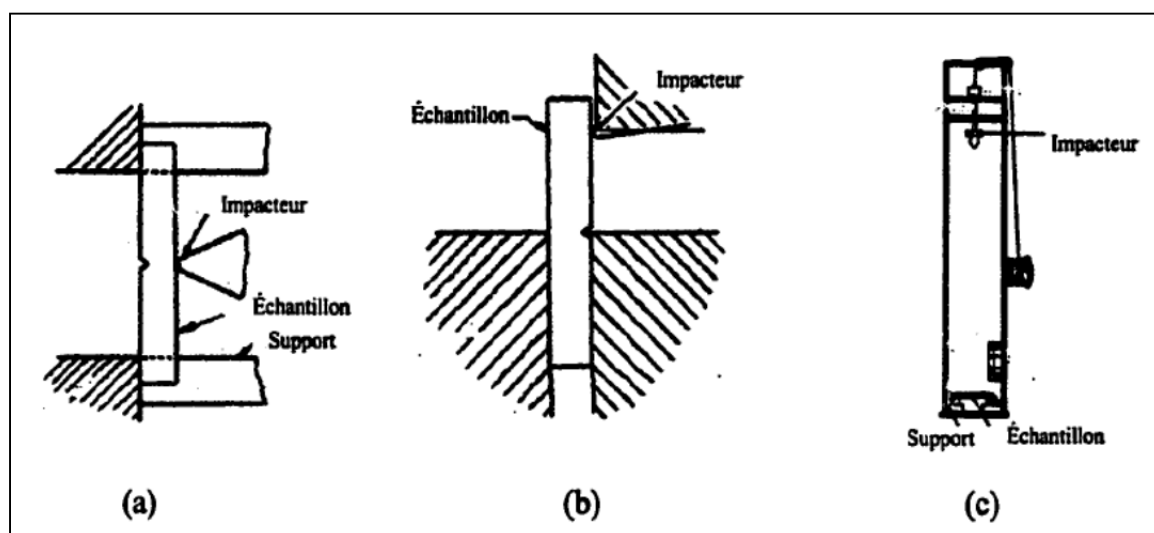


Figure 2.5 Test d'impact: (a) Essai Charpy, (b) Essai Izod, (c) Poids tombant.
Tirée de Trudel-Boucher (2000, p.8)

2.7.1 Méthode de Charpy

Dans un essai Charpy, l'échantillon est vertical et un impacteur mouton-pendule génère l'impact tel que présenté à la Figure 2.6. (Trudel-Boucher, 2000), (Cantwell, 1991) et (ASM Handbook, Vol 8 : Charpy impact tests) Afin d'utiliser cette méthode, des petits échantillons rectangulaires de grande épaisseur et avec une entaille doivent être fabriqués. Trudel-

Boucher (2000, p.6) mentionne que l'essai Charpy présente des désavantages lorsqu'il est utilisé avec des matériaux composites : « La forme des échantillons n'est pas typique des composantes utilisées en ingénierie et les mécanismes de rupture ne sont pas nécessairement ceux qui sont observés dans les composantes opérationnelles soumises à des essais d'impact à faible vitesse ». De plus, l'essai Charpy ne provoque pas les mêmes dommages que ce qui est généralement observé par un matériau en utilisation, soit une délamination dans le sens longitudinal du composite. Ce plus, cet essai a été conçu pour les métaux, ce qui explique sa faible efficacité pour les matériaux composites car ceux-ci ont des comportements très différents des métaux.

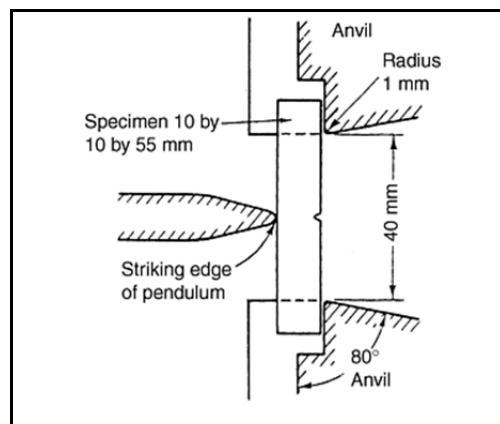


Figure 2.6 Essai de Charpy.
Tirée du ASM Handbook (Vol. 8)

2.7.2 Méthode d'Izod

Cette méthode utilise le même type d'échantillon que l'essai Charpy, donc elle présente les mêmes désavantages. (Trudel-Boucher, 2000) et (ASM Handbook, Vol 8 : Other impact tests) La différence avec la méthode Charpy est que l'échantillon est ancré à une seule extrémité tel que présenté à la Figure 2.7.

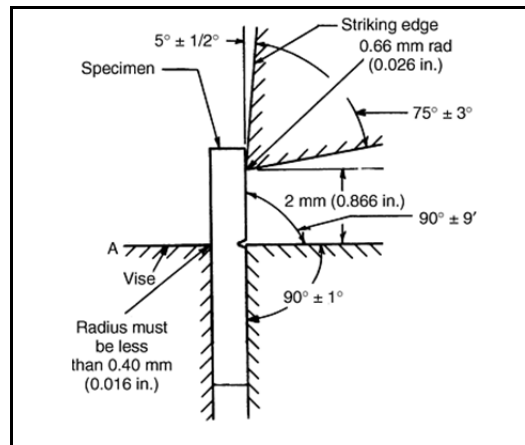


Figure 2.7 Essai d'Izod.
Tirée du ASM Handbook (Vol. 8)

2.7.3 Méthode du poids tombant

La méthode du poids tombant comprend une tour avec une hauteur variable et un impacteur de masse variable. (Trudel, 2000) et (Lui, 1987) La hauteur du poids tombant est ajustée afin d'obtenir la force d'impact désirée. L'énergie d'impact générée par cette méthode est décrite par l'équation (2-7).

$$E_I = mgh - f_y = \frac{1}{2}mv_f^2 \quad (2-7)$$

E_I : Énergie d'impact

m : Masse de l'impacteur

g : Force gravitationnelle

h : Hauteur de l'impact

f_y : Friction exercée par les tiges guides

v_f : Vitesse finale (à l'impact)

L'énergie d'impact peut être variée en modifiant, soit la masse ou la hauteur de l'impacteur.

Afin de pouvoir quantifier la force appliquée à l'échantillon, une cellule de charge est installée sur l'impacteur. De plus, un détecteur de mouvement (cellule photoélectrique) peut mesurer la variation de la vitesse en fonction du temps. L'énergie absorbée est la différence entre l'énergie cinétique d'approche et de rebond. L'impact sur le matériau peut provoquer un rebond de l'impacteur. Afin d'éviter un second impact sur le matériau causé par un rebond, un dispositif anti-rebond peut être installé. Cette méthode est la plus utilisée par les auteurs afin de caractériser la résistance à l'impact d'un matériau composite. La dimension des échantillons ainsi que les résultats de l'impact représentent bien ce qui est observé sur des systèmes réels.

Une autre méthode peut-être utilisée afin de réaliser un effet semblable au poids tombant, soit l'impact par subperforation à faible vitesse. (Liu, 1987) L'échantillon est fixé sur un support métallique vertical et positionné perpendiculairement à un fusil à air. Un impacteur cylindrique est utilisé afin de générer l'impact. La pression du fusil à air est ajustée afin d'obtenir la vitesse et la force à l'impact désirées. Selon Liu, un impact par subperforation à faible vitesse varie entre 20 m/s et 100 m/s. Cette vitesse doit être contrôlée afin qu'il n'y ait pas de délamination ou de perforation au-delà de la zone de test, car le support métallique de l'échantillon pourrait interférer avec les résultats obtenus. Les vitesses d'approche et de rebond sont mesurées à l'aide d'une cellule photoélectrique.

La norme ASTM D3763-02 (2002) propose une méthode standard de test d'impact des plastiques, la méthode du poids tombant. L'impact peut être obtenu soit par gravité ou avec un système hydraulique, pneumatique ou mécanique. Cette norme spécifie des dimensions de la machine de test d'impact à respecter. La machine d'impact doit avoir un serre-joint fait de deux plaques rigides avec un trou central de $76,0 \pm 0,4$ mm. L'échantillon est maintenu dans le serre-joint avec une pression qui permet d'éviter tout glissement durant l'impact. Toujours selon la norme, l'impacteur doit être une tige d'acier et avoir un diamètre de $12,70 \pm 0,13$ mm avec une extrémité hémisphérique. L'impacteur est centré et perpendiculaire au trou dans le serre-joint. Les fabricateurs de machines d'impact à poids tombant respectent les spécifications de la norme ASTM D3763-02.

Suite à la revue de la littérature, le meilleurs choix de test d'impact pour cette étude est le poids tombant. En effet, la forme et les résultats d'impact observés des échantillons sont plus représentatifs des cas réels (plaque mince) que les autres méthodes (prisme rectangulaire). Par conséquent, les développements théoriques des deux sections suivantes ne concernent que la méthode du poids tombant.

2.8 Mesure de la résistance à l'impact

Afin de pouvoir classer la résistance d'un matériau composite à l'impact, il est possible de se baser sur une inspection visuelle de l'état résiduel de l'échantillon suite à un impact. (Trudel, 2000) et (Warren, 1996) Cette méthode permet de faire un classement grossier et éventuellement de sélectionner les échantillons à inspecter de manière plus approfondie afin de déterminer leur résistance.

Une des méthodes utilisées par de nombreux chercheurs afin de déterminer la résistance à l'impact est l'analyse qualitative. (Lui, 1987) et (Lui, 1998) Celle-ci se divise en deux analyses possibles : le mode macroscopique et le mode microscopique. Le mode macroscopique consiste à mesurer les indentations, les fissures en surface, la délamination et la perforation. Le mode microscopie permet d'observer le seuil de délamination, la cassure des fibres, la fissuration de la matrice, etc.

Une autre méthode couramment utilisée et décrite par Trudel et Warren est de calculer l'énergie absorbée par l'échantillon. (Trudel, 2000) et (Warren, 1996) Les matériaux qui absorbent le moins d'énergie ont une meilleure résistance à l'impact. Cette méthode nécessite un détecteur de mouvement (cellule photoélectrique) afin de calculer la vitesse de l'impacteur à la descente et au rebond.

L'énergie d'absorption est donnée par la différence entre l'énergie cinétique d'approche et de rebond. (LIU, 1987) Les équations suivantes expriment l'énergie d'impact (Trudel, 2000) :

$$E(t) = E_k(t) + E_p(t) + E_a(t) = \text{constant} \bar{E}. \quad (2-8)$$

Légende:

$E(t)$: Énergie totale du système

$E_k(t)$: Énergie cinétique

$E_p(t)$: Énergie potentielle

$E_a(t)$: Énergie absorbée

Le temps $t = 0$ est défini comme l'instant du premier contact entre l'impacteur et l'échantillon, et correspond à la position $x = 0$. Étant donné que l'énergie potentielle, $E_p(0) = 0$ et que l'énergie absorbée $E_a(0) = 0$, l'énergie absorbée au temps t peut s'écrire :

$$E_a(t) = E_k(0) - E_k(t) - E_p(t) \quad (2-9)$$

En remplaçant E_k et E_p par leurs expressions explicites, l'équation (2-9) devient:

$$E_a(t) = \left(\frac{m_i}{2} \right) \cdot (v_i^2 - v^2(t)) + m_i \cdot g \cdot x \quad (2-10)$$

Légende :

m_i : Masse de l'impacteur

v_i^2 : Vitesse initiale (début du contact) de l'impacteur

$v^2(t)$: Vitesse de l'impacteur en fonction du temps

x : Déplacement de l'impacteur suite à l'impact

La vitesse initiale de l'impacteur est mesurée à l'aide de la cellule photoélectrique à l'instant du premier contact. Le déplacement de l'impacteur permet aussi de mesurer la déformation subie par l'échantillon. La quantité d'énergie absorbée est déterminée par analyse des courbes d'énergie produites par le logiciel de traitement de données de la mesure.

CHAPITRE 3

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Dans cette section, les matériaux utilisés et leurs caractéristiques sont présentés. Il y est aussi décrit la procédure de fabrication des échantillons et les paramètres des tests d'impact.

3.1 Matériaux

Dans le cadre de cette recherche, 26 tissus différents ont été utilisés. Il s'agit de produits manufacturés par la compagnie JB Martin. Les tissus choisis permettent de faire une étude de l'influence des caractéristiques suivantes sur la résistance à l'impact des matériaux fabriqués : l'armure; la masse surfacique des tissus; la nature des fibres et l'utilisation des hybrides. La liste des tissus utilisés et leur description sont présentées au Tableau 3.1. Les masses surfaciques des tissus sont présentés en unités impériales pour faciliter la compréhension des codes de tissus. (Conversion : $1 \text{ oz/vg}^2 = 0.0295 \text{ g/m}^2$)

Tableau 3.1 Liste et caractéristiques des tissus étudiés

<u>Code tissu</u>	<u>Fibre</u>	<u>Masse surfactive [oz/vg²]</u>	<u>Armure</u>
TG06P	Verre E	6	Taffetas
TG09P	Verre E	9	Taffetas
TG09T	Verre E	9	Sergé
TG09N	Verre E	9	Tridimensionnelle (NCS)
TG09J	Verre E	9	Satin
TG24P	Verre E	24	Taffetas
TG31E	Verre E	31	Interlock
TG33N	Verre E	33	Tridimensionnelle (NCS)

<u>Code tissu</u>	<u>Fibre</u>	<u>Masse surfactive [oz/vg²]</u>	<u>Armure</u>
TG54N	Verre E	54	Tridimensionnelle (NCS)
L14003	Verre S2	24	Taffetas
L14025	Verre R haute résistance	24	Taffetas
TA05P	Aramide	5	Taffetas
TA09S	Aramide	9	Sergé
TX10P	Basalte	10	Taffetas
TX24P	Basalte	24	Taffetas
UX35N	Basalte	35	Tridimensionnelle (NCS)
TC06P	Carbone	6	Taffetas
TC18N	Carbone (T700S)	18	Tridimensionnelle (NCS)
TN07T	Aramide / Carbone	7	Sergé balancé
TH12R	Verre E / Aramide	12	Sergé balancé
TR08P	Verre E / Polyester	8	Taffetas non-balancé
EOM6T	Carbone / Polypropylène haute densité	6	Sergé balancé
EUM7P	Verre E / Polypropylène haute densité	7	Taffetas balancé
EUM7T	Verre E / Polypropylène haute densité	7	Sergé balancé
EO06P	Carbone / Polypropylène haute densité	6	Taffetas non-balancé

Note : Le terme balancé utilisé pour les tissus hybrides signifie que les deux types de fibre sont présents à la fois dans le sens chaîne et dans le sens trame.

Le Tableau 3.2 présente les spécifications techniques des fibres utilisées dans la fabrication de ces tissus.

Tableau 3.2 Spécification techniques des fibres

Fibre	Fabricant	Résistance en traction de la fibre	Résistance de traction du composite	Module de rigidité de la fibre	Module de rigidité du composite	% d'élongation à la rupture, ϵ	Masse volumique
		[MPa]	[MPa]	[GPa]	[GPa]	[%]	g/cm ³
Verre E	Agy	3445	2070	72,3	69,0	N/D	2,6
Verre S2	Agy	4590	3569	86,0	87,0	N/D	2,5
Verre R haute résistance	Agy	N/D	2430	N/D	84,5	N/D	2,5
Carbone T700S	Torayca	4900	N/D	230,0	N/D	2,1	1,8
Carbone TR30S	Grafil	4410	N/D	235,0	N/D	1,9	1,8
Basalte	Kamenny Vek	N/D	2700	N/D	84,0	N/D	N/D
Aramide : Kevlar 49	Dupont	3000	N/D	112,4	N/D	2,4	1,4
Polyester	Kosa	2584	N/D	117,1	N/D	3,5	1,4
Polypropylène haute densité : Innegra	Innegrity	218	N/D	5,1	N/D	7,8	0,8

Note : Le carbone T700S est seulement utilisé pour le tissage du tissu TC18N, tous les autres tissus de carbone ont été tissés du carbone TR30S.

Les 26 tissus étudiés ont été infusés avec de la résine Vinylester Derakane 41V-2021. Cette résine est utilisée pour plusieurs applications tel que : la marine, le transport, les réservoirs etc. Elle est un compromis entre la résine d'époxy et de polyester, C'est-à-dire qu'elle a de meilleures propriétés mécaniques que le polyester et coûte moins cher que l'époxy.

Par ailleurs, afin d'étudier de manière exploratoire les effets de la résine sur la résistance à l'impact des composites, deux tissus, le TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²) et le TC06P (carbone; taffetas; 9 oz/vg²), ont été utilisés pour la réalisation d'échantillons de composites avec deux autres résines : l'époxy et l'époxy chargés de nanotubes de carbone. Ces deux résines époxy sont des produits de la compagnie Nanoleedge et sont généralement fournies sous forme de pré-imprégnés. Le tableau 3.3 présente les propriétés des trois résines. Il est à noter que cette partie de l'étude ne concerne pas le thème principal du projet, soit l'étude de l'effet des caractéristiques des renforts tissés sur la résistance à l'impact et est considérée comme une recherche connexe au projet : elle est présentée de manière séparée dans le chapitre 6.

Tableau 3.3 Propriétés mécaniques et chimiques des résines vinylester, époxy et époxy chargé de nanotube de carbone

Résine	Vinylester Derakane 41V- 2021	Époxy RF1 1608, film de résine semi- solide	Époxy RF1 1608, film de résine semi-solide chargé de nanotubes de carbone
Composition de la résine	bisphenol-A cobalt, 6% 2,4-pentanedione	bis-phenol-A	bis-phenol-A chargé de nanotubes de carbone
Catalyseur / Durcisseur	1% MEKP-925H	dicyandianide	dicyandianide
Temps de travail	± 30 minutes	n/a	n/a
Résistance en traction [MPa]	86	n/d	n/d
Module de rigidité [GPa]	3,2	n/d	n/d
Masse volumique [g/cm ³]	1,04	1,18	1,18
Élongation à la rupture [%]	5-6%	n/d	n/d
Température de transition vitreuse Tg [°C]	120	120	120

Finalement, afin d'étudier de manière exploratoire les effets des tissus à résine intégrée sur la résistance à l'impact des composites, le composite fabriqué avec du twintex est étudié. Le twintex est un renfort sergé à résine intégrée. Il s'agit d'un mélange de 60% de filaments de verre E et 40% de filaments de polypropylène en poids.

Lors de la fabrication, le tissu est chauffé pour faire fondre le propylène qui devient alors la matrice du laminé. Tout comme l'étude des résines époxy, cette partie de l'étude ne concerne pas le thème principal du projet, soit l'étude de l'effet des caractéristiques des renforts tissés sur la résistance à l'impact et est considérée comme une recherche connexe au projet : elle est présentée de manière séparée dans le chapitre 6.

3.2 Fabrication des échantillons

Les échantillons ont été fabriqués par infusion. Cette méthode consiste à infuser le tissu de résine à l'aide du vide généré par une pompe. Ce type de fabrication utilise un moule fermé. De nombreux manufacturiers utilisent cette méthode car elle permet de produire des pièces de bonne qualité, génère peu d'émissions volatiles et elle est moins coûteuse que le RTM (Résine transfer molding) qui produit par contre des pièces de meilleure qualité. Le montage utilisé permet de fabriquer quatre laminés de composite à la fois avec une infusion en périphérie et une succion centrale. Celui-ci est présenté à la Figure 3.1. Chacun de ces laminés permet de réaliser 12 échantillons de 74 X 74 mm, soit la dimension requise par la machine d'impact utilisée.

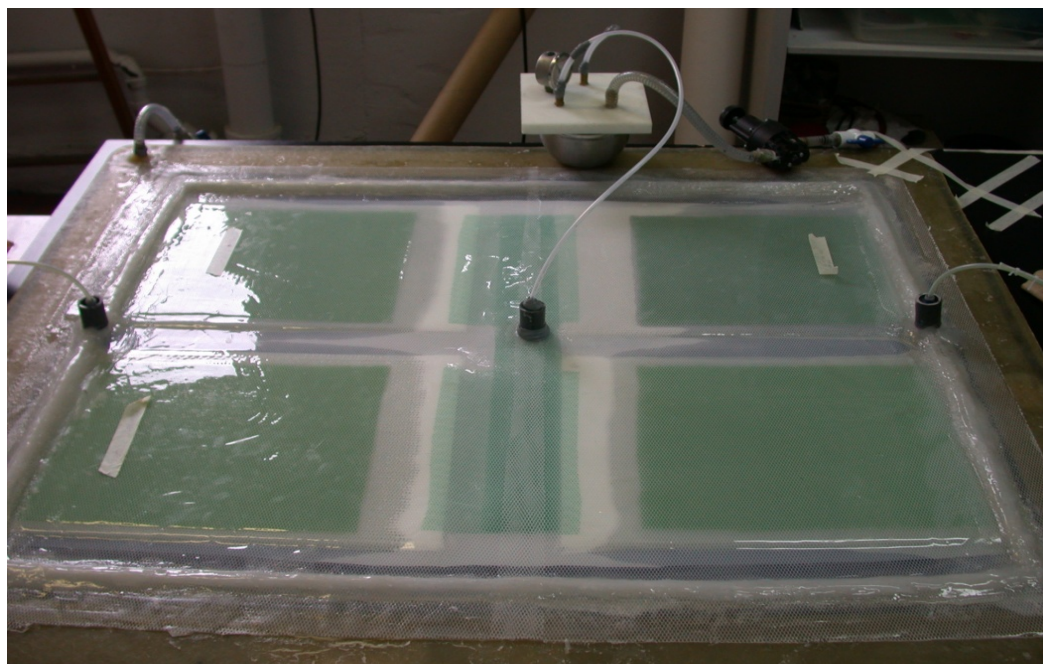


Figure 3.1 Montage d'infusion (injection en périphérie et succion au centre).

Avant chaque infusion et d'ajouter le catalyseur (active la réaction chimique : durcissement de la résine), la résine est placée dans une cloche à vide pour une durée de 20 minutes afin d'éliminer les bulles d'air emprisonnées dans la résine. Cette procédure améliore la qualité des laminés produits.

L'objectif de la fabrication est de produire des échantillons d'épaisseur égale à 3 mm. Étant données les différences d'épaisseur des plis entre les différents tissus, une certaine variation existe au niveau de l'épaisseur des laminés fabriqués avec les différents tissus. Par ailleurs, la compressibilité des tissus en infusion n'est pas la même pour tous, ce qui demande dans certains cas plusieurs essais avant d'obtenir l'épaisseur désirée. La comparaison de la résistance à l'impact s'est faite sur des laminés d'épaisseur variant entre 2,53 mm et 3,94 mm.

Les laminés ont été fabriqués avec les résines et les méthodes de fabrication suivantes : vinylester par infusion, époxy par presse chauffante et époxy chargée de nanotubes de carbone par presse chauffante et le twintex sous vide chauffant ou par rouleau chauffant. Le

Tableau 3.4 présente les procédures de mise en forme des différentes résines lors de la fabrication des laminés.

Tableau 3.4 Procédure d'utilisation des résines pendant la fabrication des laminés et de post cuisson

Résine	Vinylester Derakane 41V- 2021	Époxy RF1 1608, film de résine semi- solide	Époxy RF1 1608, film de résine semi-solide chargé de nanotube de carbone
Catalyseur	1% de Norox MEKP-925H	-	-
Température d'opération	-	10 minutes à 65°C avec pression	10 minutes à 65°C avec pression
Pression	75 KPa	90 KPa	90 KPa
Temps de polymérisation	Sous vide 7 heures	-	-
Cuisson post- infusion	Quatre heures à 60°C	20 minutes à 130°C avec pression	20 minutes à 130°C avec pression

Le catalyseur utilisé avec la résine vinylester avec une proportion de 1% permet un temps de travail d'environ 30 minutes avant le durcissement de la résine. Les échantillons fabriqués avec l'époxy RF1 1608 sont mis en forme à l'aide d'une presse hydraulique chauffante.

3.3 Test d'impact

Tous les échantillons ont été soumis aux mêmes paramètres d'impact. Ceux-ci sont les suivants :

Énergie d'impact : entre 22 à 23,5 J
Diamètre de l'impacteur : 1,27cm ($\frac{1}{2}$ po)
Vitesse d'impact : approximativement 2,7 m/s
Poids de l'impacteur : 5,83 kg
Hauteur : entre 0,3 et 0,4 m

La machine d'impact utilisée est située à l'Institut des matériaux industriels du CNRC et est présentée à la Figure 3.2. Il s'agit d'un modèle Dynatup 930 séries de la compagnie Instron avec un dispositif anti-rebond. La friction des tiges guidant le poids tombant est variable dans le temps, car chaque essai effectué modifie la lubrification des tiges ce qui influence sur la résistance en friction. Par conséquent, avant chaque test d'impact, la valeur d'énergie d'impact est vérifiée et la hauteur est ajustée au besoin pour que l'énergie d'impact se situe entre 22 et 23,5 J. Cette énergie d'impact a été choisie de manière à endommager tous les échantillons étudiés sans les perforer. En effet, dans le cas d'une perforation, l'énergie minimale causant la perforation, qui peut être utilisée comme critère de comparaison de la résistance à l'impact, demande un nombre de tests trop important.

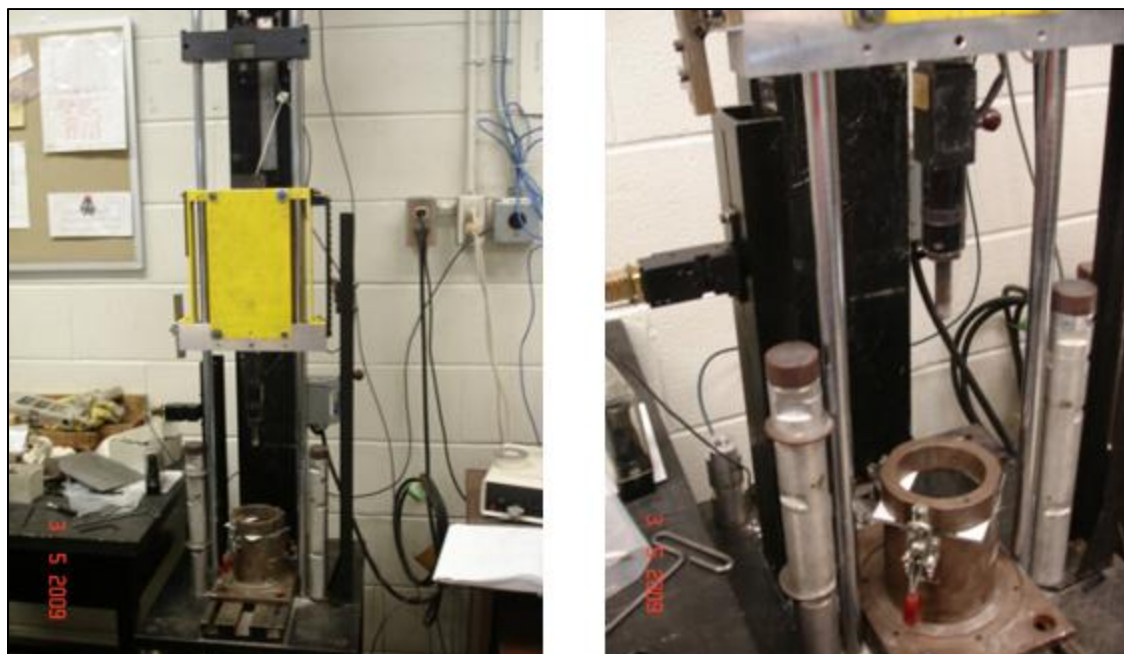


Figure 3.2 Machine d'impact utilisée.

Pour chaque test réalisé (avec un laminé différent), cinq répliques sont produites. Le reste des échantillons sont disponibles par exemple pour calibrer la hauteur correspondant à l'énergie d'impact désirée.

Un système d'acquisition permet d'enregistrer les données issues du test d'impact. Les données sont ensuite traitées pour extraire l'énergie d'impact E_I , l'énergie absorbée E_a , la charge maximale, l'énergie à la charge maximale et la déformation du matériau. La Figure 3.3 présente un exemple de courbe d'énergie et de charge en fonction du temps produite par le système d'acquisition.

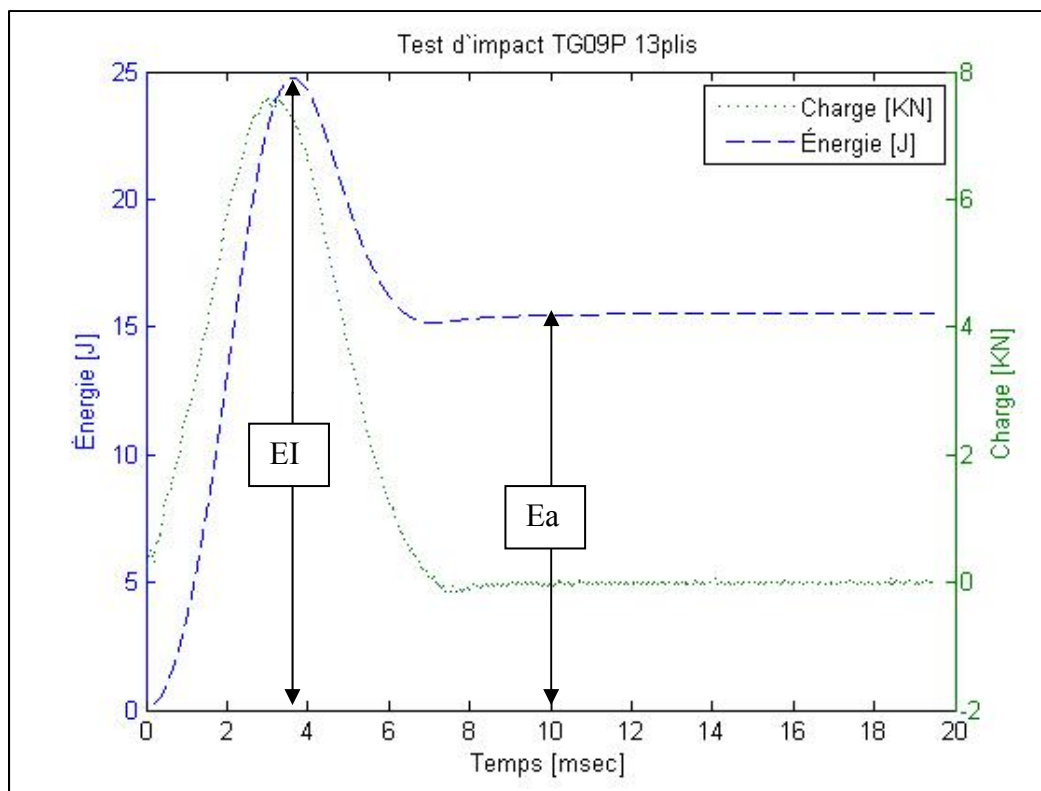


Figure 3.3 Énergie et charge en fonction du temps du laminé TG09P de 13 plis infusé avec du vinylester

Dans le graphique de la Figure 3.3, le temps zéro est le début du contact entre l'impacteur et l'échantillon. L'énergie d'impact maximale, EI, survient 0,6 msec après que la charge maximale soit appliquée à l'échantillon par l'impacteur. L'énergie absorbée, Ea, par le matériau est l'énergie conservée par le matériau lorsque la charge appliquée redevient nulle. Les valeurs d'énergie absorbée, Ea, et d'énergie d'impact, EI, de tous les laminés fabriqués avec les tissus présentés au Tableau 3.1 sont déterminées à partir des données d'énergie et de charge en fonction du temps.

3.4 Caractérisation de l'endommagement

Pour comparer les différents laminés selon une méthode quantitative, le facteur Ea/EI (l'énergie absorbée divisée par l'énergie d'impact) a été sélectionné car il est le plus

représentatif de la résistance à l'impact et le plus facile à obtenir puisque les machines d'impacts sont dotées d'une cellule photoélectrique. (Warren, 1996) En effet, plus E_a/E_I est faible, meilleure est la résistance à l'impact du matériau.

Afin de vérifier les différences statistiques entre les résultats obtenues pour les différentes conditions, une analyse de variance à un facteur (ANOVA) a été réalisée en utilisant le test F et la distribution F de Fisher pour la détermination d'une valeur critique $F_{crit} = 5,32$ correspondant au niveau de confiance désiré de 95% ($\alpha=0,05$). (Weiss, 1991) L'homogénéité de variance des données et la normalité a été vérifiée avec le logiciel Statgraphics et l'indépendance des échantillons est respectée. Par conséquent, les conditions nécessaires pour l'utilisation du test ANOVA sont respectées. Voici les formules qui permettent de déterminer la valeur F du test ANOVA :

$$MSTR = \frac{J}{I-1} [(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + (\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + \dots + (\bar{x}_I - \bar{x})^2] \quad (3-1)$$

$$MSE = \frac{s_1^2 + s_2^2 + \dots + s_I^2}{I} \quad (3-2)$$

$$F = \frac{MSTR}{MSE} \quad (3-3)$$

Légende :

MSTR: Carré moyen pour traitement

MSE: Carré moyen pour erreur

I : Nombre de population

J: Nombre d'échantillon par population

$\bar{x}_1$ à $\bar{x}_I$: Moyennes des échantillons 1 à I

$\bar{x}$: Moyenne de la population total

h : Épaisseur de la plaque

Si la valeur de F est plus grande que la valeur critique F_{crit} , il y a au moins une des populations qui est différente. Dans le cas échéant, le test de Tukeys est réalisé afin de déterminer quelles populations sont différentes. La valeur critique $Q_{\alpha, I, I(J-1)}$ est déterminée avec la table des valeurs critiques pour la distribution Student selon le nombre d'échantillon

I, le nombre d'échantillon par population $J=5$ et le niveau de confiance $\alpha=0,05$. Cette valeur critique permet de calculer le facteur w .

$$w = Q_{\alpha, I, I(J-1)} \sqrt{\frac{MSE}{J}} \quad (3-4)$$

Si l'écart entre les moyennes de deux populations est inférieur à w , ces populations sont identiques, dans le cas contraire elles sont différentes.

L'analyse macroscopique qualitative de l'endommagement suite à l'impact consiste à mesurer la profondeur de l'indentation de la face impactée, l'extrusion de la face opposée et la superficie de la délamination. Cette méthode est subjective, pour cette raison elle doit être combinée à une méthode d'analyse quantitative telle que la détermination de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact E_a/E_I .

Toujours dans l'optique d'une caractérisation de l'endommagement résultant de l'impact, une épreuve d'étanchéité à l'eau a été conduite. Une gouttelette d'eau est déposée sur la surface impactée. Après 4 heures, la surface opposée est inspectée pour voir si l'eau n'a pas traversé le laminé. Dans ce cas, le matériau est considéré comme étant étanche à l'eau.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Ce chapitre présente les résultats des tests destinés à étudier l'effet des caractéristiques des renforts tissés sur la résistance à l'impact des composites, d'une part de manière quantitative par le biais de l'énergie absorbée, et d'autre part, de manière qualitative par une évaluation visuelle de l'endommagement produit. Ce chapitre inclut aussi les résultats de l'influence de deux variables expérimentales, l'épaisseur du composite et l'énergie d'impact. Il est à noter que les résultats relatifs à la comparaison entre les résines de la matrice sont présentés dans le chapitre 6.

4.1 Influence de l'épaisseur du composite sur la résistance à l'impact

Étant donnée la difficulté de produire des plaques d'épaisseur rigoureusement identique avec les différents renforts tissés et afin d'évaluer l'effet de cette variation sur les résultats de l'étude, des laminés de différentes épaisseurs ont été fabriqués avec de la résine vinylester et quatre tissus de renfort, deux en verre E, un en aramide et un en basalte. Ces différentes épaisseurs ont été obtenues en variant le nombre de plis dans le composite. L'effet de ces différentes épaisseurs sur le comportement à l'impact est illustré dans la Figure 4.1. Pour chaque type de renfort, le comportement semble globalement linéaire dans l'intervalle considéré, les pentes semblent relativement similaires pour les quatre renforts testés.

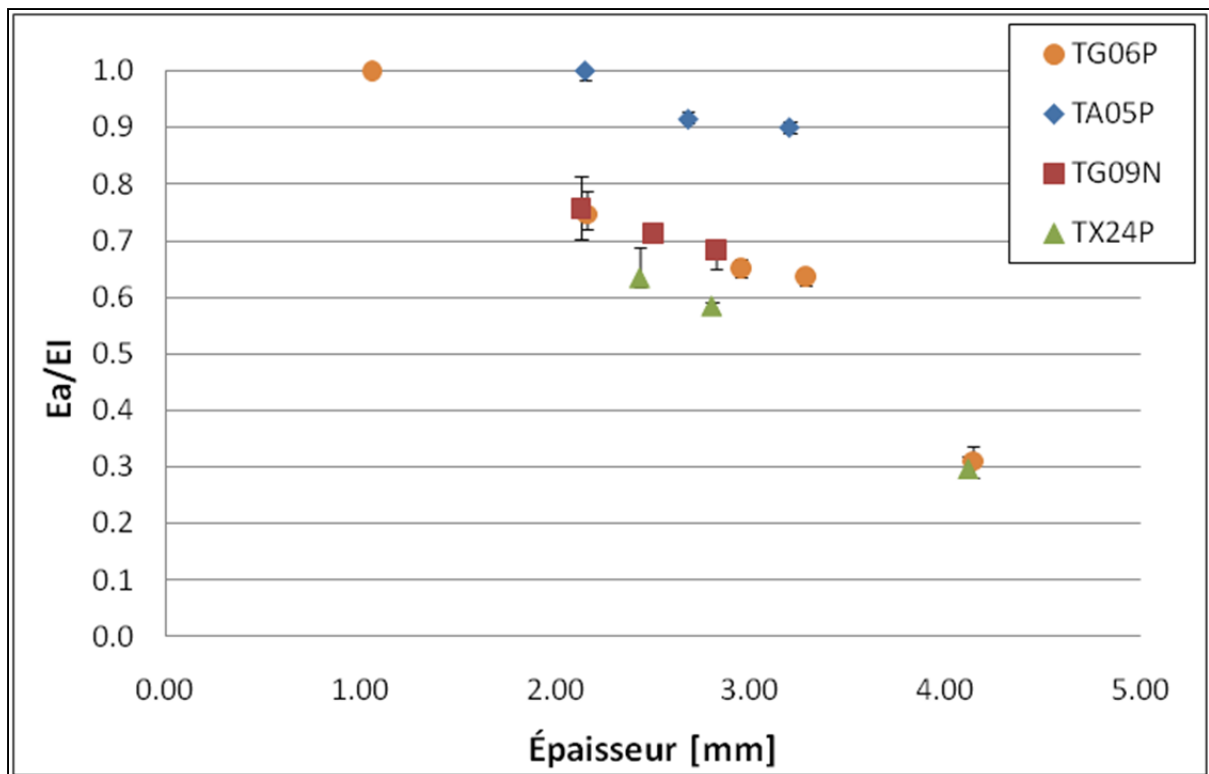


Figure 4.1 Variation du rapport entre l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact (E_a/E_I) en fonction de l'épaisseur des plaques de composite infusées avec de la résine de vinylester et avec les renforts suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6oz/vg^2), TA05P (aramide; taffetas; 5oz/vg^2), TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9oz/vg^2) et TX24P (basalte; taffetas; 24oz/vg^2)

Les moyennes des pourcentages de fibre des échantillons présentée à la figure 4.1 sont les suivant :

TG06P : $45 \pm 2\%$

TG09N : $40 \pm 1\%$

TA05P : $50 \pm 1\%$

TX24P : $52 \pm 2\%$

4.2 Influence de l'énergie d'impact

De la même façon que pour l'épaisseur, une certaine variation de l'énergie d'impact d'un échantillon à un autre ne peut être évitée. L'influence de l'énergie d'impact sur le

comportement à l'endommagement a donc été analysée expérimentalement. Le matériau testé est un laminé de TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²) / Vinylester de 12 plis. Les échantillons ont une épaisseur moyenne de 2,5 mm.

Les résultats présentés à la Figure 4.2 présentent l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_i , en fonction de l'énergie d'impact.

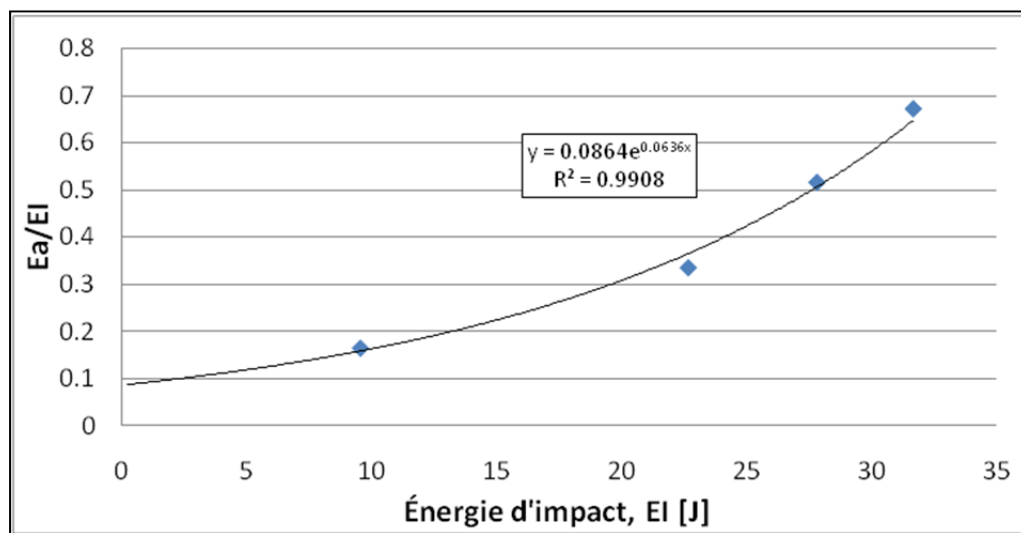


Figure 4.2 Variation du rapport entre l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_i , en fonction de l'énergie d'impact, EI, du matériau TG09N (verre E; sergé; 9 oz/vg²) / Vinylester.

Pour une variation d'énergie de un joule (la variation d'énergie entre les différents tests d'impact effectués), il y a une variation du facteur E_a/E_i de 2%. Cette variation est négligeable, par conséquent la variation entre les différents tests d'impact n'influence pas les résultats E_a/E_i de manière significative.

4.3 Mesures d'énergie

Le Tableau 4.1 présente les résultats quantitatifs des tests d'impact, soit la résistance à l'impact Ea/EI, ainsi que les caractéristiques des échantillons fabriqués.

Tableau 4.1 Résultats des tests d'impact et caractéristiques des échantillons (% Vf : pourcentage volume de fibre; Ea : énergie absorbée; EI : énergie d'impact; Ea/EI : énergie absorbée sur l'énergie d'impact)

Tissu	Résine	Nb plis	Épaisseur [mm]	Poids [g]	Masse volumique laminé [g/cc]	% Vf	Ea [J]	EI [J]	Ea/EI
TG06P	Vinylester	17	2,95	46,3	1,78	45%	14,89	22,87	0,651
TG09P	Vinylester	13	2,93	45,9	1,77	51%	15,42	23,34	0,660
TG09T	Vinylester	13	3,17	50,4	1,80	52%	13,86	23,25	0,596
TG09N	Vinylester	9	2,82	39,8	1,60	40%	15,20	22,23	0,684
TG09J	Vinylester	13	2,92	45,8	1,78	57%	13,67	22,23	0,615
TG24P	Vinylester	4	2,62	41,3	1,78	52%	16,05	22,38	0,717
TG31E	Vinylester	3	2,55	39,4	1,75	50%	15,75	22,78	0,691
TG33N	Vinylester	3	2,57	41,3	1,82	53%	13,93	22,30	0,625
TG54N	Vinylester	2	3,00	45,6	1,72	47%	13,66	22,13	0,617
L14003	Vinylester	4	2,79	48,7	1,98	48%	12,90	22,20	0,581
L14025	Vinylester	5	3,94	62,1	1,78	42%	14,51	22,57	0,643
TA05P	Vinylester	12	2,87	30,9	1,22	50%	20,12	22,26	0,902
TA09S	Vinylester	7	2,86	31,3	1,24	56%	20,12	22,26	0,904
TX10P	Vinylester	10	2,53	41,2	1,84	50%	15,75	23,00	0,685
TX24P	Vinylester	5	2,80	46,4	1,87	54%	13,01	22,30	0,584
UX35N	Vinylester	3	2,66	41,8	1,78	50%	13,19	22,38	0,589
TC06P	Vinylester	14	2,83	35,9	1,44	53%	16,90	22,20	0,761

Tissu	Résine	Nb plis	Épaisseur [mm]	Poids [g]	Masse volumique laminé [g/cc]	% Vf	Ea [J]	EI [J]	Ea/EI
TC18N	Vinylester	4	2,62	32,9	1,42	51%	13,28	22,26	0,596
TN07T	Vinylester	11	3,33	39,9	1,35	48%	17,42	22,26	0,783
TH12R	Vinylester	8	2,77	37,8	1,54	50%	15,71	22,67	0,690
TR08P	Vinylester	10	2,80	44,9	1,82	44%	15,02	22,29	0,674
EOM6T	Vinylester	10	3,00	30,8	1,16	47%	17,45	22,44	0,778
EUM7T	Vinylester	10	2,84	34,5	1,37	66%	10,23	22,47	0,455
EO06P alterné	Vinylester	10	3,13	32,5	1,17	45%	16,98	22,46	0,756
EO06P non- alterné	Vinylester	10	2,96	29,8	1,14	48%	13,83	22,51	0,614
EUM7P	Vinylester	10	2,85	34,4	1,36	68%	11,76	22,48	0,523

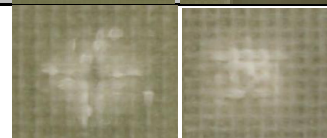
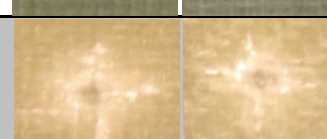
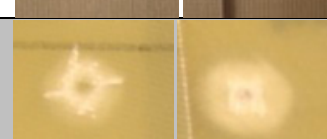
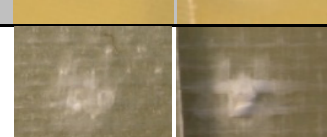
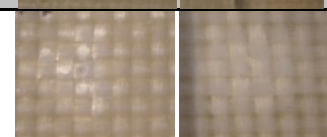
Note: Le terme alterné signifie que l'empilement de renfort se fait en [0/90] (90° entre chaque pli)

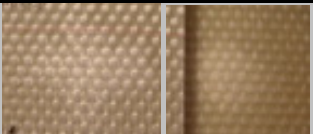
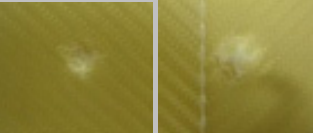
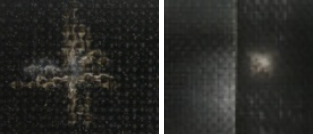
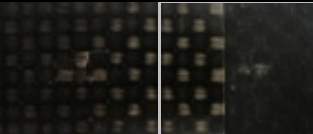
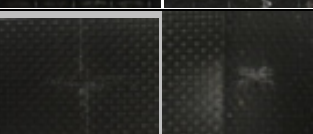
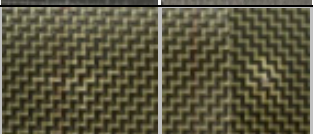
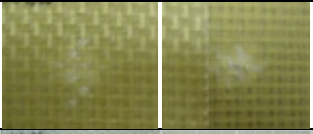
L'énergie d'impact appliquée aux échantillons varie entre 22,13 et 23,34 J, soit une variation de $\pm 2.6\%$ autour de la valeur cible de 22.75J. L'énergie absorbée varie entre 10,23 et 20,12 J et l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact varie entre 0,46 à 0,90.

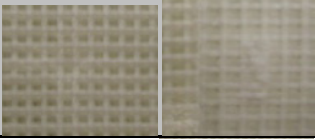
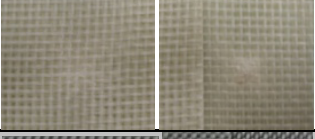
4.4 Caractérisation visuelle de l'endommagement

Une caractérisation visuelle des impacts a été effectuée afin de classer les matériaux en fonction du type de déformation. Les résultats principaux en termes de largeurs de déformation et profondeurs de l'endommagement sont présentés dans le Tableau 4.2. Une description plus complète est fournie en annexe I. Pour chaque échantillon, la photo de gauche montre la zone d'impact de la surface impactée et la photo de droite montre la surface opposée. Les caractéristiques des tissus sont décrites dans le Tableau 3.1, et ils sont tous fabriqués avec de la résine de vinylester.

Tableau 4.2 Caractérisation visuelle de l'endommagement des échantillons

Matériau	Épaisseur [mm]	Photographie face impactée / face opposée	Délamination min/max [mm]	Domage [mm]	
				profondeur / extrusion	
TG06P	2,95		13/15	0,31	1,03
TG09P	2,93		13/16	0,26	0,94
TG09T	3,17		14/18	0,27	0,67
TG09N	2,82		14/20	0,41	0,72
TG09J	2,92		13/13	0,31	0,58
TG24P	2,62		17/23	0,21	0,98
TG31E	2,55		15/19	0,23	0,97
TG33N	2,57		17/34	0,34	0,51
TG54N	3,00		18/32	0,28	0,64
L14003	2,79		21/28	0,21	0,27

Matériau	Épaisseur [mm]	Photographie face impactée / face opposée	Délamination min/max [mm]	Dommages [mm]	
				profondeur / extrusion	
L14025	3,94		24/49	0,23	0,40
TA05P	2,87		23/32	1,60	1,92
TA09S	2,86		20/29	1,77	2,57
TX10P	2,53		12/25	0,28	1,04
TX24P	2,80		8/17	0,18	0,15
UX35N	2,66		8/30	0,15	0,19
TC06P	2,83		11/55	0,31	1,26
TC18N	2,62		8/47	0,31	0,36
TN07T	3,33		13/32	0,60	1,32
TH12R	2,77		10/28	0,33	1,07
TR08P	2,80		14/56	0,37	0,56

Matériau	Épaisseur [mm]	Photographie face impactée / face opposée	Délamination min/max [mm]	Domage [mm]	
				profondeur /	extrusion
EOM6T	3,00		14/19	2,06	3,02
EUM7P	2,85		20/20	0,46	1,12
EUM7T	2,84		24/67	0,37	1,14
EO06P alterné	3,13		18/20	1,54	2,53
EO06P non-alterné	2,96		14/18	0,75	1,30

La délamination varie entre 8 et 67 mm, la profondeur de l'endommagement varie entre 0,15 et 2,06 mm et l'extrusion des endommagements varient entre 0,15 et 2,57 mm ce qui confirme la grande variation d'endommagement produit par les différents tissus observés pour l'énergie absorbée. Par ailleurs, certains matériaux présentent des endommagements localisés à la zone d'impact sans avoir subi de délamination (exemple le TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²) et le TA09S (aramide; sergé; 9 oz/vg²), etc.). Généralement, ils présentent très peu de délamination mais ont une pénétration très profonde de l'impacteur qui s'approche à une perforation. Ils manifestent généralement un signe de cassure de fibres plus importantes, ce qui indique que la résistance des fibres est plus faible que la cohésion inter laminaire. Dans d'autres cas, une délamination importante est observable (exemple le L14003 (verre S2; taffetas; 24 oz/vg²), le L14025 (verre R haute résistance; taffetas; 24 oz/vg²), UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg²), etc.). Par contre, ces composites présentent peu de pénétration de l'impacteur.

Suite aux tests d'étanchéité à l'eau, un seul matériau impacté à 22 J a montré un signe de perméabilité. Il s'agit du TA09S, soit le matériau présentant la plus forte absorption d'énergie et les signes visuels d'endommagement parmi les plus importants.

CHAPITRE 5

ANALYSE DE L'EFFET DES CARACTÉRISTIQUES DES RENFORTS

Une analyse détaillée des résultats quantitatifs et de l'observation visuelle de l'endommagement a été effectuée afin de comprendre si la résistance à l'impact des matériaux composites est influencée par : de l'épaisseur du composite; de l'énergie d'impact; de la qualité de fabrication des laminés; de l'armure; de la masse surfacique des fibres et de la nature des tissus.

5.1 Influence de l'épaisseur des échantillons sur les résultats d'impact

Les résultats obtenus avec quatre matériaux de renfort ont montré une variation linéaire du rapport E_a/E_I en fonction de l'épaisseur du composite (voir Figure 4.1). Cependant, le matériau ne peut pas absorber plus d'énergie qu'il n'en reçoit, donc, la valeur de E_a/E_I maximale est égale à 1,00 et minimale à 0 comme illustré dans la Figure 5.1 qui reprend le cas du TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²). La courbe E_a/E_I en fonction de l'épaisseur présente donc une asymptote à $y = 1$ et une à $y = 0$. La fonction de la courbe ne peut être déterminée, ni interprétée comme étant linéaire.

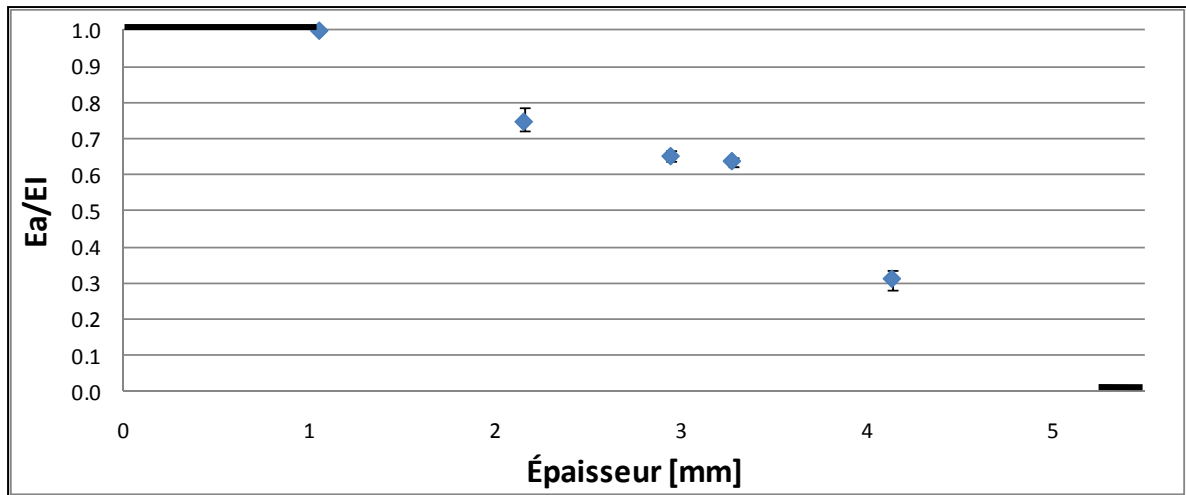


Figure 5.1 Variation du rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de l'épaisseur du composite TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²) / Vinylester.

Par contre, la plage d'épaisseur des échantillons pour la comparaison entre les renforts se situe entre 2,5 et 3,5 mm. La Figure 5.3 présente la variation de E_a/E_I en fonction de l'épaisseur des laminés fabriqués avec des renforts de TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg²), TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²) et TX24P (basalte; taffetas; 24 oz/vg²) dans une plage restreinte de 2,0 à 3,5 mm. Dans cette zone, la variation du facteur E_a/E_I peut être décrite par une relation linéaire et tous les matériaux ont des valeurs de pente très proches. Il est même possible d'observer que les courbes pour les deux matériaux de verre, soit le TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²) et le TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg²) sont pratiquement superposées : La masse surfacique et le type d'armure du renfort tissé ne semblent donc pas influencer de manière importante le comportement d'un composite soumis à un impact.

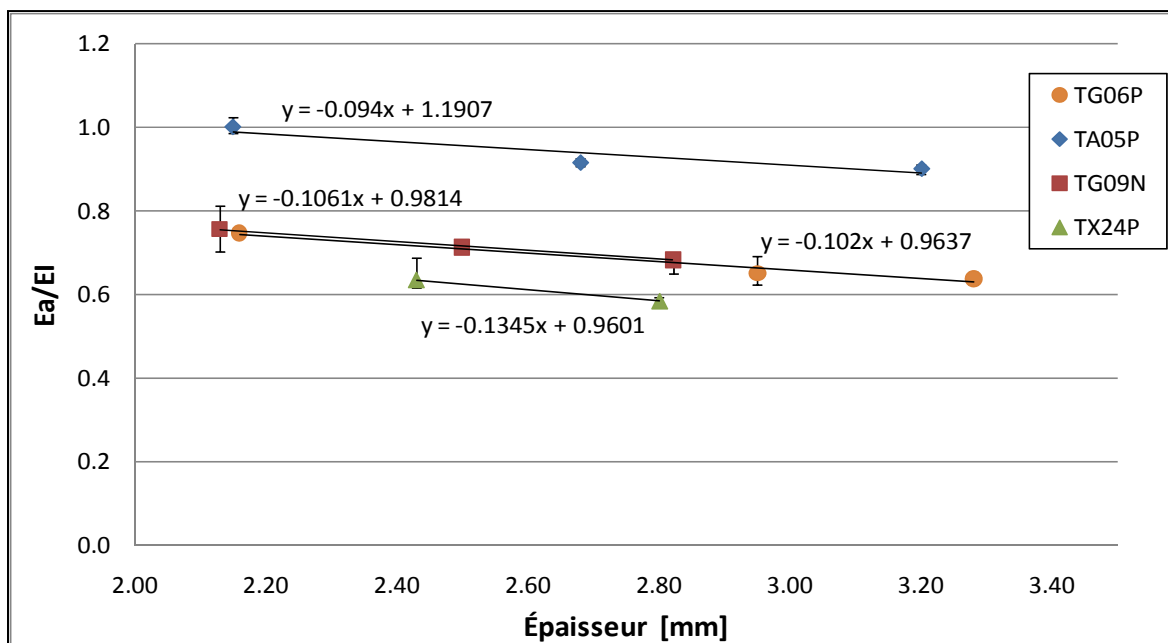


Figure 5.2 Variation du rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de l'épaisseur dans une plage de 2,00 à 3,50 mm. Les renforts utilisés dans la fabrication des laminés infusés avec du vinylester sont les suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²), TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg²) et TX24P (basalte; taffetas; 24 oz/vg²).

La moyenne des pentes pour les quatre matériaux étudiés présentés à la Figure 5.3 est de -0,11 mm⁻¹.

Ce facteur de correction est appliqué au rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I pour compenser pour les différences d'épaisseur entre les échantillons et les ramener à une épaisseur de 3 mm. Ce même facteur est utilisé pour permettre une comparaison au même poids des échantillons en les ramenant à un poids de 40g. Les rapports E_a/E_I des échantillons seront donc comparés entre premièrement des échantillons à épaisseur égale et deuxièmement à poids égal. Les rapports d'énergie absorbées sur l'énergie d'impact, E_a/E_I ainsi ramenés à une épaisseur de 3 mm et à un poids de 40 g sont présentées dans le Tableau 5.1. Ils sont classés par ordre de résistance à l'impact (le premier est le plus résistant) selon les rapports E_a/E_I ramené à une épaisseur de 3 mm.

Tableau 5.1 Rapport d'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_i ramené à une épaisseur d'échantillon de 3 mm et ramené à un poids d'échantillon de 40 g. Les caractéristiques des tissus sont présentées au Tableau 3.1

Tissu	E_a/E_i ramené à une épaisseur de 3 mm	Poids des échantillons à 3 mm [g]	E_a/E_i ramené à un poids de 40 g
EUM7T	0,438	36,4	0,405
TG09P	0,452	52,5	0,531
TG09P	0,494	51,2	0,566
EUM7P	0,507	36,2	0,472
UX35N	0,552	47,2	0,602
TC18N	0,555	37,7	0,534
L14003	0,558	45,6	0,598
TX24P	0,562	49,7	0,626
TG33N	0,577	48,2	0,633
TC06P	0,599	39,9	0,598
TG09J	0,606	47,1	0,656
EO06P non alterné	0,610	30,2	0,503
TG09T	0,615	47,8	0,668
TG54N	0,617	45,6	0,658
TX10P	0,633	48,8	0,693
TG31E	0,642	46,4	0,687
TC06P	0,645	39,4	0,640
TG06P	0,646	47,1	0,695
TR08P	0,652	39,5	0,648
TG09P	0,652	47,1	0,702
TG09N	0,664	42,3	0,682
TH12R	0,665	40,9	0,672
TG24P	0,676	47,2	0,726

Tissu	Ea/EI ramené à une épaisseur de 3 mm	Poids des échantillons à 3 mm [g]	Ea/EI ramené à un poids de 40 g
TC06P	0,743	38,1	0,726
L14025	0,746	47,3	0,797
EO06P alterné	0,771	31,1	0,677
EOM6T50A	0,778	30,8	0,679
TA05P	0,815	33,9	0,756
TN07T	0,819	35,9	0,781
TA05P	0,887	32,3	0,808
TA09S	0,889	32,8	0,816
TA05P	0,905	33,0	0,835

Les résultats présentés au Tableau 5.1 permettent de faire un classement rapide de la résistance à l'impact des différents tissus étudiés. Il y a un écart de 52% entre le tissu le plus résistante, EUM7T (hybride verre E / polypropylène haute densité; sergé; 7 oz/vg²) et le moins résistante, TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²). Cet écart est le même pour les résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm et ceux ramenés à un poids de 40 g. Une analyse plus approfondi de ces renforts est présentée dans les sections 5.3 à 5.7.

5.2 Influence de l'énergie d'impact

Les résultats obtenus dans le cas d'un type de matériau TG09N (verre E; sergé; 9 oz/vg²) / Vinylester semblent indiquer que la faible variation d'énergie d'impact entre les différents échantillons n'a pas un effet majeur sur Ea/EI (voir Figure 4.2). En effet, une variation d'énergie entre 22.13 et 23.34 J (variation maximale des résultats) produit une différence de 2.0 % du facteur Ea/EI. La variation de l'énergie d'impact est donc négligée pour l'analyse des résultats.

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de l'énergie d'impact sur le comportement des composites par le biais d'une caractérisation de la délamination. (Choi, 1992), (Warren, 1996) et (Jackson, 1992) Ils ont montré que la délamination augmente proportionnellement avec la vitesse d'impact reliée à l'énergie d'impact par : $E_I = E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

La Figure 5.4 présente la courbe de l'absorption d'énergie en fonction de la vitesse d'impact du composite TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²) / Vinylester. Il y est observé que, contrairement aux données de la littérature, la fonction qui relie l'énergie absorbée et la vitesse d'impact ne semble pas linéaire.

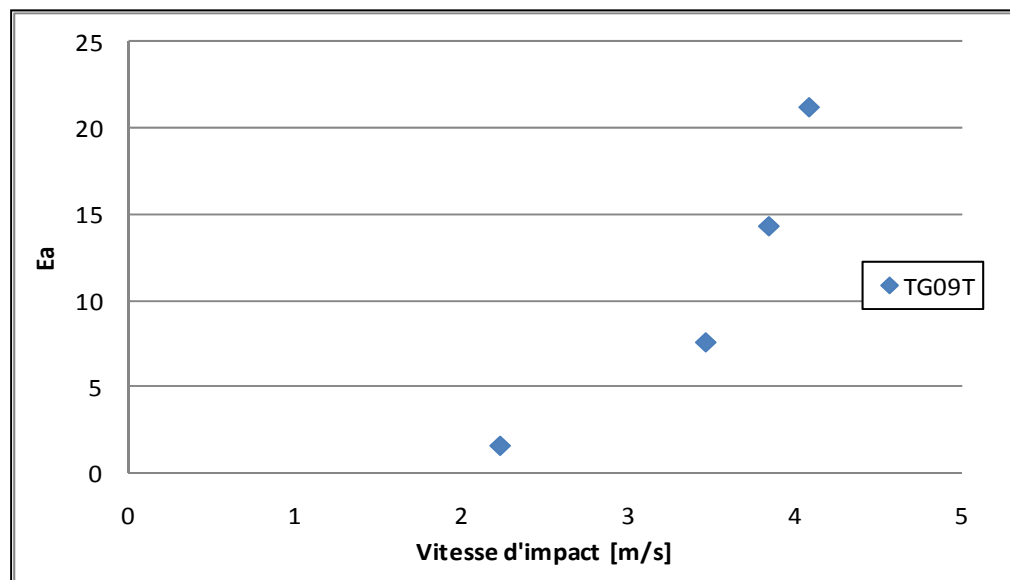


Figure 5.3 Variation de l'énergie absorbée, E_a , en fonction de la vitesse d'impact, V , du composite TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²) / Vinylester.

5.3 Influence de la qualité de fabrication des composites

Dans cette section, l'influence de la qualité de fabrication des échantillons est analysée. Celle-ci peut-être quantifiée par le volume de fibre dans le composite et se traduit visuellement par l'absence de zones sèches, ce qui indique un meilleur mouillage des fibres à

l'échelle macroscopique et microscopique. Plus le taux de fibre est élevé, plus la qualité de fabrication du laminé est bonne.

Dans le cas du laminé fabriqué avec le tissu de renfort TG09T (verre E; taffetas; 9 oz/vg²) et du vinylester, deux niveaux de qualités ont été obtenus. Cette différence de qualité peut être expliquée par des conditions de fabrication différente, soit : la qualité de la résine; la qualité de l'ensimage des tissus; la température et l'humidité de la pièce; la quantité d'humidité absorbée par le tissu et/ou la vitesse d'infusion. La Figure 5.5 présente en (a) le résultat du test d'impact de l'échantillon de qualité supérieure (volume de fibre de 57%) et en (b) le résultat du test d'impact de l'échantillon de qualité standard (volume de fibre de 52%). Cette différence de qualité est facilement observable visuellement. Le laminé de qualité supérieure en (a) a une meilleure transparence et, en excluant la zone d'impact, il n'y a pas de fibre sèche apparente contrairement au laminé de qualité standard en (b).



Figure 5.4 Résultats d'un test d'impact sur les composites infusés avec du vinylester et des renforts de TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²), en (a) qualité de fabrication supérieure avec un volume de fibre de 57% et en (b) qualité de fabrication standard avec un volume de fibre de 52%.

Les résultats des tests d'impact pour ces deux matériaux sont présentés dans le Tableau 5.2 et à la Figure 5.6. Dans ce cas-ci, les échantillons avec un volume de fibre de 57% résistent mieux à l'impact que les échantillons avec un volume de fibre de 52%. Les résultats des échantillons à qualité supérieure sont 2,05 fois supérieurs à ceux des échantillons de qualité standard. Ces résultats démontrent que la qualité de fabrication des échantillons joue un rôle crucial dans la performance de ceux-ci à l'impact. Cette comparaison des résistances à l'impact est très significative puisque que celle-ci est faite avec des matériaux de constitution identique et ayant suivi le même processus de fabrication.

Tableau 5.2 Résistance à l'impact en fonction de la qualité du composite

Tissu	Résine	Nb de plis	Qualité	%Volumique De fibre	Ea/EI ramené à une épaisseur de 3 mm	Écart-type	Poids [g]
TG09T	Vinylester	12	Supérieure	57%	0,299	1,0%	49,3
TG09T	Vinylester	13	Normale	52%	0,615	1,5%	47,8

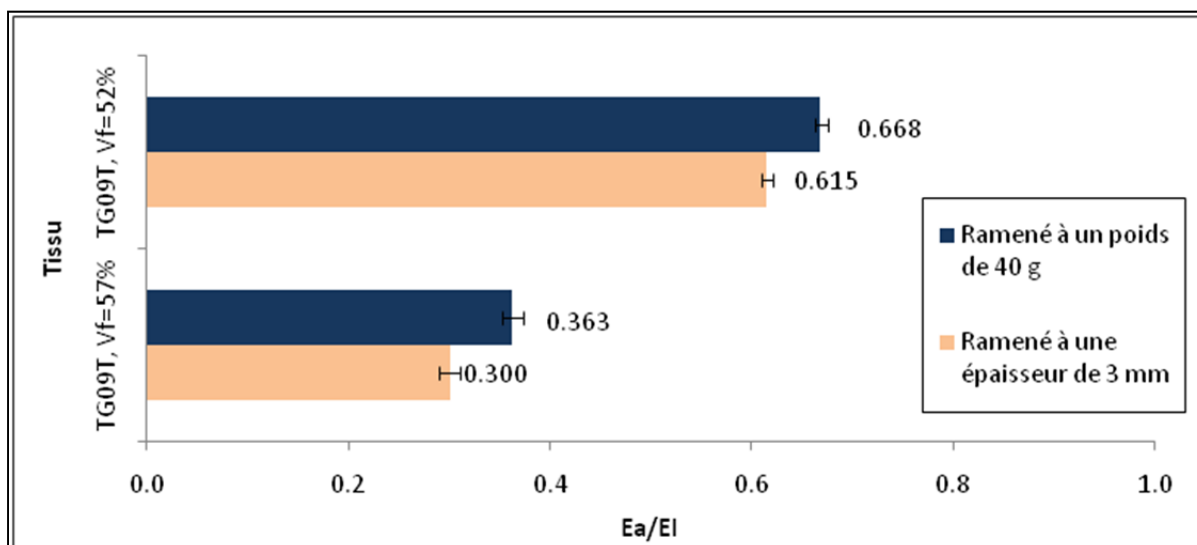


Figure 5.5 Influence de la qualité d'infusion sur la résistance à l'impact. Laminés avec renfort TG09T (verre E; taffetas; 9 oz/vg²) infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Selon l'analyse statistique ANOVA, les résultats sont significativement différents. Les résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm ont une valeur de $F = 218$ correspondant à une différence de 102,8% et les résultats ramenés à un poids de 40 g ont une valeur de $F = 220$ correspondant à une différence de 83,2%.

5.4 Influence de l'armure des tissus

Les quatre armures taffetas, sergé et satin des tissus présentent des modes de déformation relativement semblables, soit une délamination d'apparence circulaire et une extrusion des fibres et cassure carrée. Par ailleurs, de son côté, le tridimensionnel subi une délamination et

extrusion des fibres de forme ovale. Les superficies des dommages sont semblables d'une armure à l'autre. En ce qui a trait à la profondeur du dommage subi à la surface de l'impact, ils sont aussi très similaires pour les quatre armures. Par contre, le tridimensionnel se distingue des autres au niveau de l'extrusion, elle est de 40% à 50% moins importante. Par ailleurs, suite à l'inspection visuelle, la qualité de fabrication des composites de fibre TG09P (Taffetas), TG09T (Sergé), TG09N (Tridimensionnel NCS) semble similaire, tandis que le composite de fibre TG09J (Satin) semble avoir un meilleur mouillage des fibres ce qui en fait un composite de qualité supérieure.

Pour mieux comprendre l'effet de l'armure des tissus, des tests d'impact ont été fait avec quatre tissus de renfort de verre E ayant une masse surfacique de 9 oz/vg^2 et des armures différentes : TG09P (Taffetas), TG09T (Sergé), TG09N (Tridimensionnel NCS) et TG09J (Satin). Les résultats des tests d'impact à épaisseur et poids égaux sont présentés à la Figure 5.7. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur la figure. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle est présentée dans le tableau 5.3. Les résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm montrent des différences significatives dans le cas des couples TG09P et TG09T, TG09P et TG09J, TG09T et TG09N et finalement TG09N et TG09J. Les résultats ramenés à un poids de 40 g montrent des différences significatives dans le cas du couple TG09P et TG09T et du couple TG09P et TG09J.

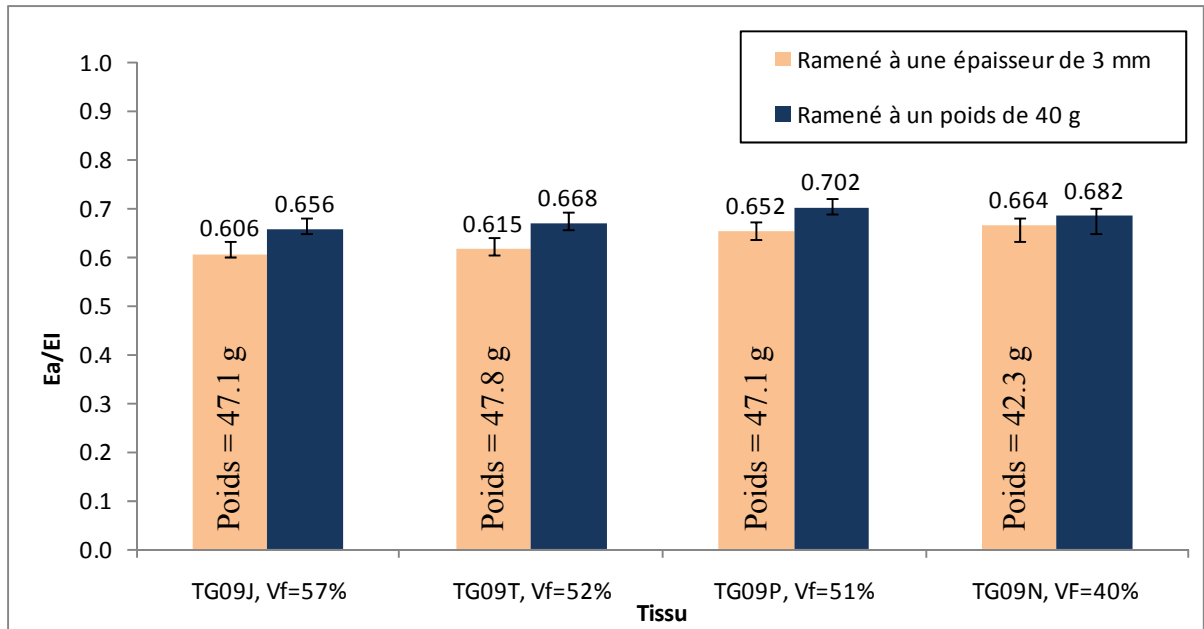


Figure 5.6 Influence du type d'armure sur la résistance à l'impact. Les laminés sont fabriqués avec les renforts suivants : TG09J (verre E; satin; 9 oz/vg²), TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²), TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²) et TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg²) infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22J.

Tableau 5.3 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.7 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,24$ $w = 0.033$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TG09J			TG09T			TG09P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm									
F = 12,99 : il y a au moins deux échantillons différents									
TG09T	1,3 %	0,008	NS						
TG09P	7,4 %	0,048	S	6,2 %	0,041	S			
TG09N	8,8 %	0,058	S	8,2 %	0,050	S	1,5 %	0,010	NS
Résultats ramenés à un poids de 40 g									
F = 7,39 : il y a au moins deux échantillons différents									
TG09T	1,6 %	0,010	NS						
TG09P	6,6 %	0,046	S	5,1 %	0,036	S			
TG09N	3,9 %	0,027	NS	2,4 %	0,016	NS	2,8 %	0,019	NS

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

Les résultats Ea/EI comparés à épaisseur égale de la Figure 5.7 montrent que le TG09J résiste légèrement mieux à l'impact suivi du TG09T, TG09P et TG09N. Cependant, l'inspection visuelle et un taux élevé de fibre (57%) semblent démontrer que la qualité d'infusion du TG09J est supérieure aux trois autres matériaux, ce qui peut fausser l'allure des résultats. Par ailleurs, le volume de fibre est gouverné par la capacité de l'armure à absorber la résine. Donc, les qualités des composites d'armures différentes ne peuvent être qualifiées seulement sur la base de leurs pourcentages de volume de fibres. Le tridimensionnelle est un tissu qui s'infuse rapidement mais qui ne permet d'avoir un composite avec des taux de fibres élevés, ce qui ne signifie pas pour autant qu'il n'est pas de bonne qualité.

Ces différences sont cependant mineures et, de manière générale, il ne semble pas y avoir un très grand écart d'énergie absorbée entre les différentes armures, ce qui signifie que l'armure influence peu la résistance à l'impact d'un matériau à ce niveau d'énergie (environ 22 J). Par contre, il est possible que l'énergie d'impact de 22 J ne soit pas suffisamment élevée dans le cas du verre E pour bien mettre en évidence l'influence des différences armures et des autres paramètres.

Des essais supplémentaires avec différentes armures ont été également effectués avec d'autres matériaux, soit avec des renforts de basalte et de carbone. Ces tissus tridimensionnels n'ont pas le même fils liant que le TG09N ce qui permet d'obtenir des composite avec des volumes de fibre supérieurs. Par contre, ils n'ont pas la même masse surfacique de fibre. Le tissu Ces matériaux sont infusés avec de la résine de vinylester et impactés à 22 J. Les résultats sont présentés à la Figure 5.8. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur la figure. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle est montre que tout les résultats ont des différences significatives (voir Tableau 5.4).

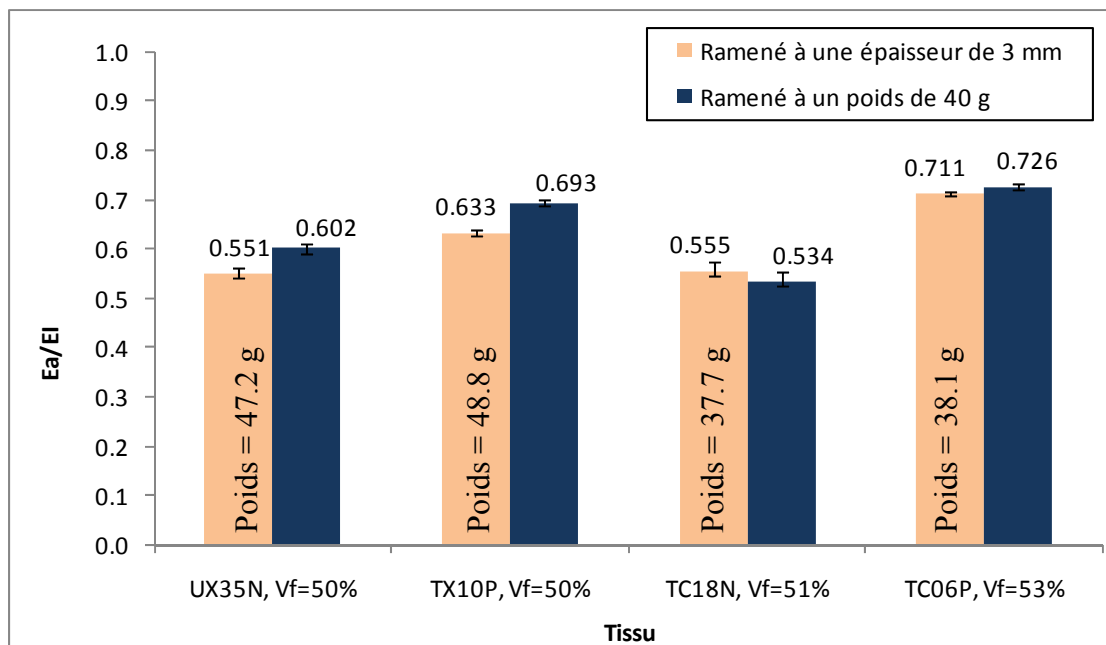


Figure 5.7 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type d'armure. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg²), TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg²), TC18N (carbone; tridimensionnel NCS; 18 oz/vg²) et TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²) infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.4 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.8 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 5,32$	Différence	F - statistique	Significativité		Différence	F - statistique	Significativité
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm							
UX35N et TX10P	12,8%	302,1	S	TC18N et TC06P	22,2%	316,7	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g							
UX35N et TX10P	13,1%	324,1	S	TC18N et TC06P	23,0%	242,5	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de gauche sont les plus résistants à l'impact.

Les résultats des tests d'impact à épaisseur et poids égaux dans la Figure 5.7 montrent que le laminé UX35N est plus performant à l'impact que le TX10P, avec un écart est de 13% entre le taffetas et le tridimensionnel. Les mêmes observations s'appliquent au carbone, le tissu tridimensionnel performe 22-23% fois mieux que le taffetas. Deux raisons sont possiblement à la source de ce phénomène : Le fils liant en polyester et l'arrangement plus rectiligne des fibres de l'armure. En effet, le fils de polyester est perpendiculaire à la propagation des fissures : il devient une barrière à celle-ci.

Étant donné que les laminés de basalte, TX10P et UX35N ont subi très peu de dommage à 22 J, ces matériaux ont été impactés à nouveau à 40 J pour vérifier si les mêmes conclusions s'appliquent, c'est-à-dire que le tissu tridimensionnel est meilleur que le tissu taffetas. Les résultats des tests d'impact à épaisseur et poids égales sont présentés à la Figure 5.8. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur la figure. À cette énergie d'impact, le basalte réagit de la même façon qu'à 22 J : le tissu tridimensionnel, UX35N, a un résultat de 15,7% meilleur à l'impact que le tissu taffetas, TX10P. Ceci confirme donc que l'armure tridimensionnelle offre une meilleure performance à l'impact que les autres armures étudiées. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle est montrée que tous les résultats ont des différences significatives (voir Tableau 5.5).

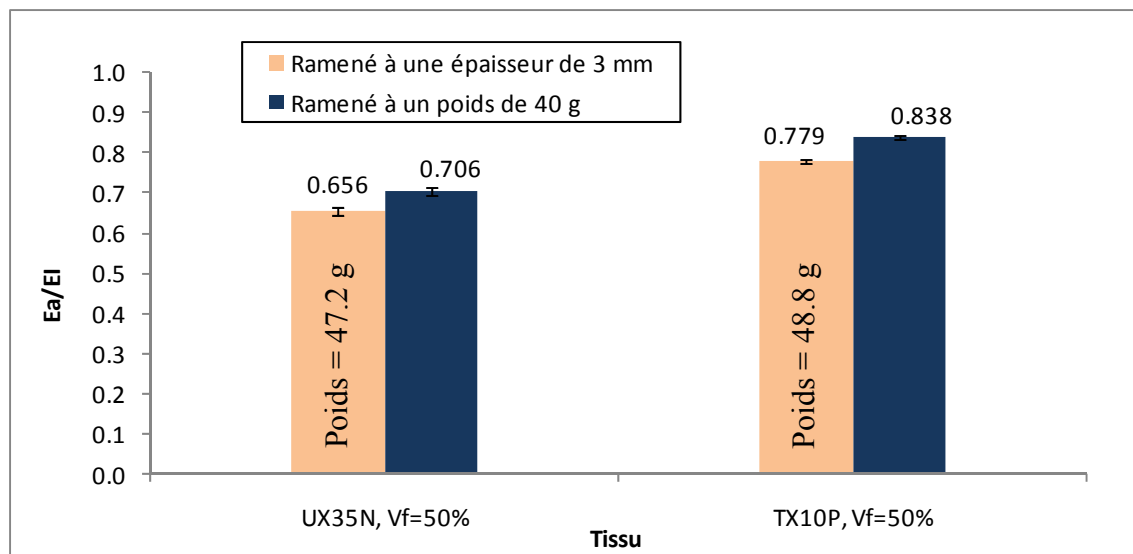


Figure 5.8 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type d'armure. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg²), UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 40 J.

Tableau 5.5 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.8 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 5,32$	Différence	F – statistique	Significativité		Différence	F – statistique	Significativité
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm				Résultats ramenés à un poids de 40 g			
UX35N et TX10P	15,7%	21,0	S	UX35N et TX10P	15,7%	24,2	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

5.5 Influence de la masse surfacique des tissus

L'effet de la masse surfacique des tissus sur la résistance à l'impact des laminés a été étudié avec des renforts de fibre de verre E de deux armures différentes, du taffetas et du tridimensionnelle. Les résultats de résistance à l'impact à épaisseur et poids égaux sont présentés dans la Figure 5.9 pour le taffetas et dans la Figure 5.11 pour le tridimensionnelle. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur la figure. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle est montrée des différences significatives dans le cas du couple TG06P et TG24P (ramené à un poids de 40 g) et du couple TG09N et TG54N (ramené à une épaisseur de 3 mm) (voir Tableau 5.6 et Tableau 5.7).

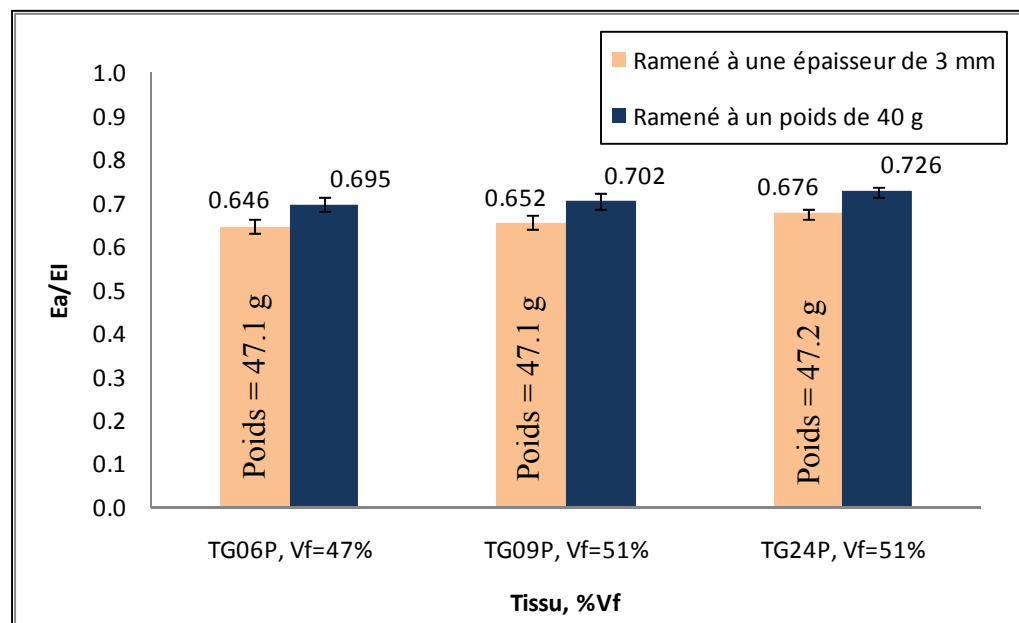


Figure 5.9 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la masse surfacique des tissus taffetas. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²) et TG24P (verre E; taffetas; 24 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.6 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.9 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,026$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TG06P			TG09P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 3,88 : tous les résultats ont des différences non-significative						
TG09P	0,75%		NS			
TG24P	3,92%		NS	3,14%		NS
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 6,48 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG09P	0,74%	0,005	NS			
TG24P	4,06%	0,028	S	3,71%	0,023	NS

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

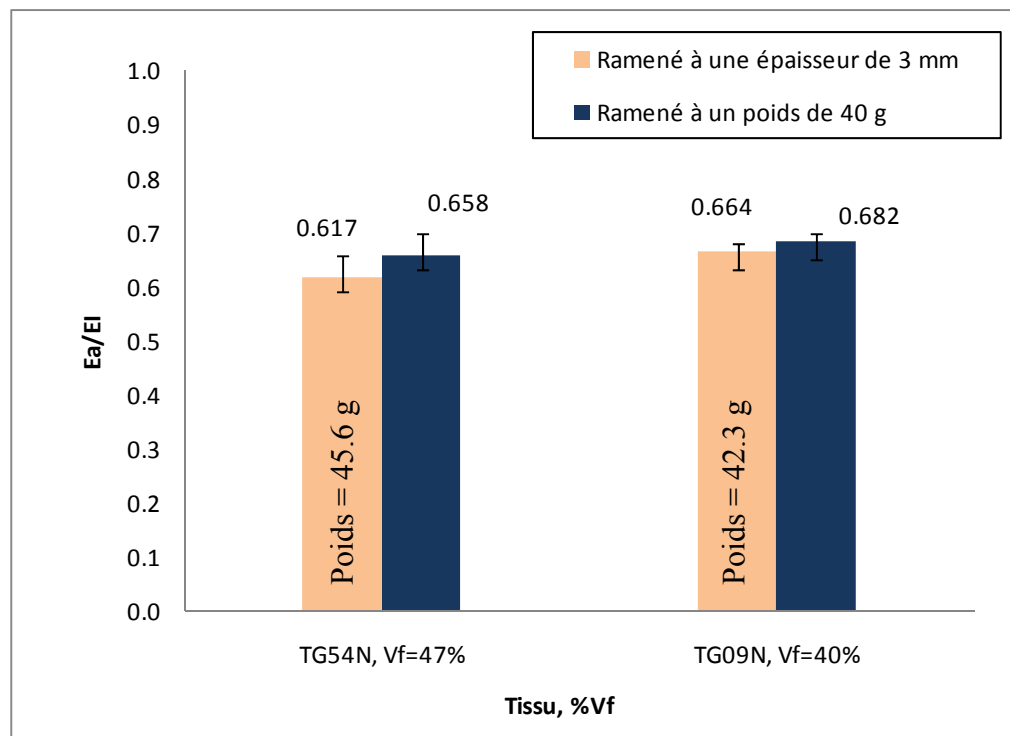


Figure 5.10 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_i en fonction de la masse surfacique des tissus tridimensionnels. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG54N (verre E; tridimensionnel NCS; 54 oz/vg²) et TG09N (verre E; tridimensionnel NCS; 9 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.7 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.10 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 5,32$	Différence	F – statistique	Significativité		Différence	F – statistique	Significativité
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm				Résultats ramenés à un poids de 40 g			
TG54N et TG09P	6,9%	8,40	S	TG54N et TG09P	3,7%	2,72	NS

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de gauche sont les plus résistants à l'impact.

Les tissus de taffetas ont des volumes de fibre semblables avec un écart de 7,9%. Malgré le fait que les résultats présentés au Tableau 5.6 montrent que seulement la différence entre le renfort TG24P et TG06P ramené à une épaisseur de 3 mm est significative, cette différence de 4,06% est très faible. La différence semble un peu plus élevée pour les composites ramenés à une épaisseur de 3 mm avec les renforts tridimensionnel, mais comme les échantillons présentent des différences de taux de fibre plus importantes, elle peut être attribuée à la différence de qualité de fabrication. Il apparaît donc que la masse surfacique n'affecte pas de manière importante la résistance à l'impact.

5.6 Influence de la nature des tissus

La nature (matière) des fibres est le premier choix qui s'impose lors de la conception d'une pièce mécanique. Dans le cas d'un risque d'impact, il est important de bien choisir le matériau si l'on ne veut pas subir des catastrophes majeures. Surtout lors que celui-ci est utilisé afin d'assurer la sécurité d'individus. Dans cette section, l'effet de la nature des fibres sur le comportement à l'impact est étudié en gardant successivement constantes deux propriétés de renfort, soit la masse surfacique des tissus et le volume de fibre des tissus.

5.6.1 Influence de la nature des tissus à masse surfacique égale

L'effet de la nature des tissus a été investigué pour quatre valeurs de masse surfacique du renfort : 5-6 oz/vg² (Figure 5.11), 9-10 oz/vg² (Figure 5.13), 24 oz/vg² (Figure 5.13) et 31-35 oz/vg² (Figure 5.14), en conservant les autres paramètres équivalents. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur les figures. Des analyses statistiques ANOVA ont été réalisées sur ces données et elles sont présentées dans les tableaux 5.8 à 5.11.

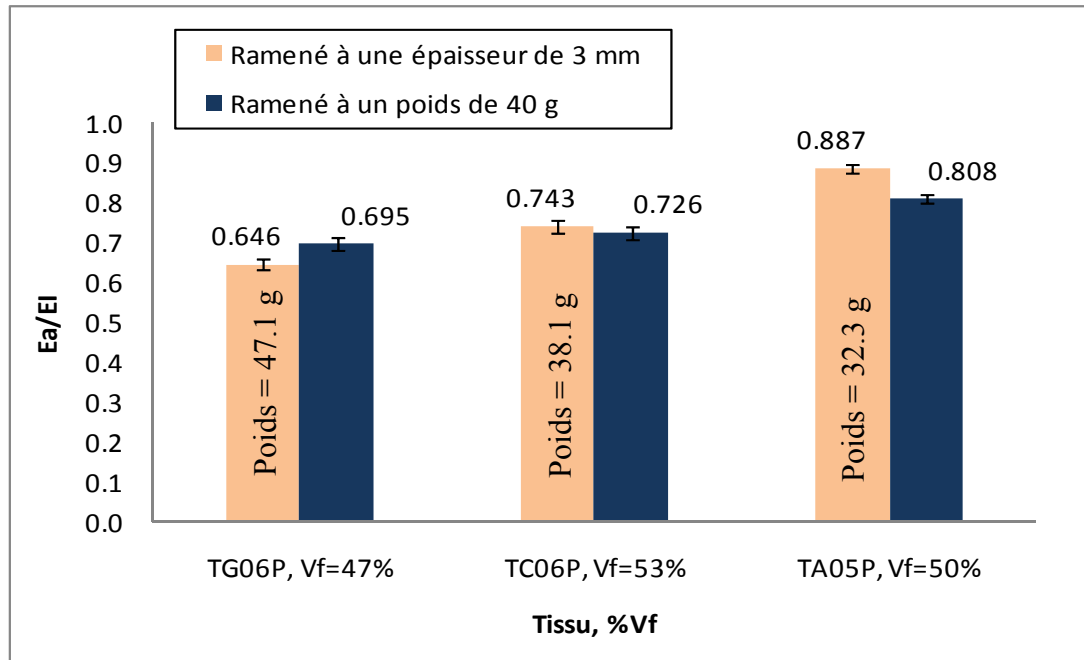


Figure 5.11 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²) et TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.8 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.11 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,018$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TG06P			TC06P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 698,5 : il y a au moins deux échantillons différents						
TC06P	15,0%	0,065	S			
TA05P	37,3%	0,240	S	16,2%	0,175	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 236,4 : il y a au moins deux échantillons différents						
TC06P	4,5%	0,002	S			
TA05P	16,3%	0,114	S	10,2%	0,117	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

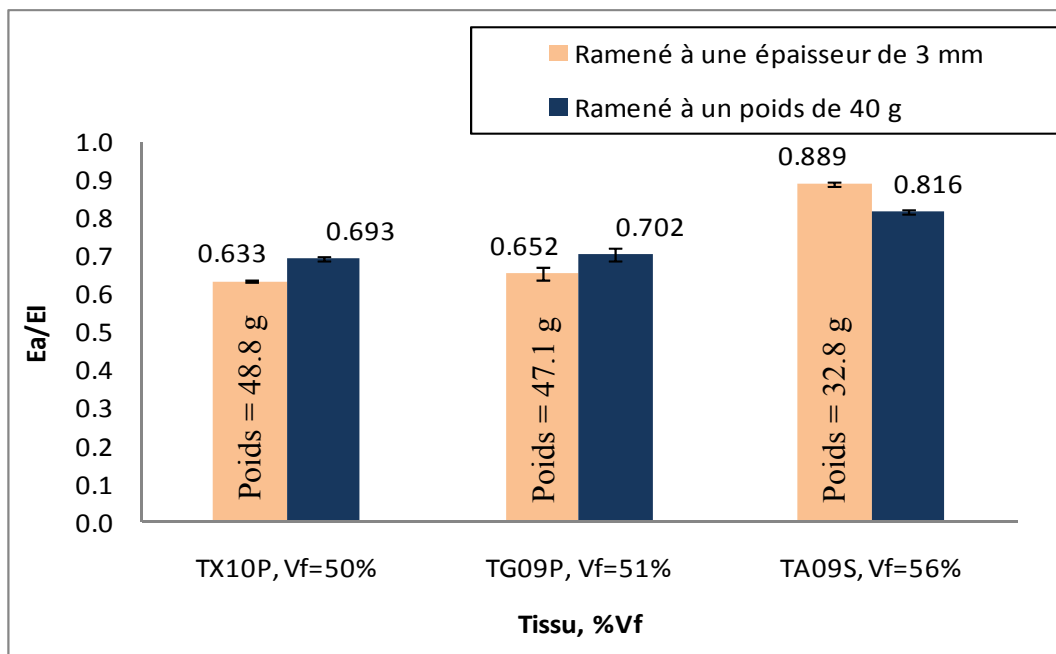


Figure 5.12 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²), TA09S (aramide; sergé; 9 oz/vg²), TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.9 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.13 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,017$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TX10P			TG09P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 968,8 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG09P	2,9%	0,019	S			
TA09S	28,8%	0,256	S	36,4%	0,237	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 231,1 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG09P	1,28%	0,009	NS			
TA09S	15,1%	0,123	S	16,2%	0,114	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

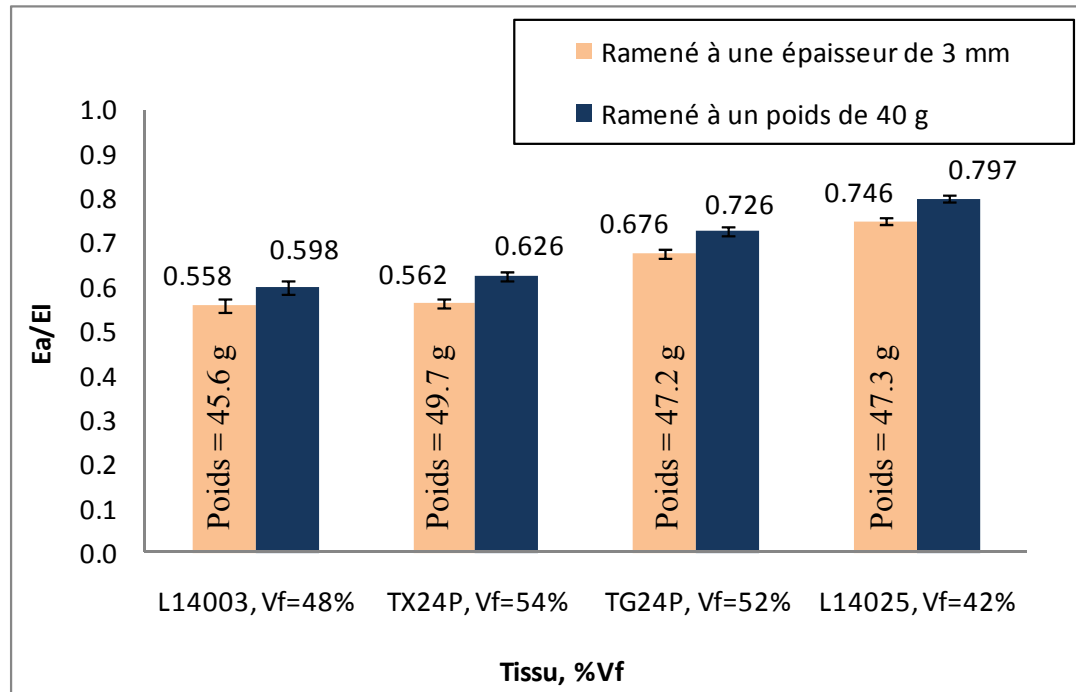


Figure 5.13 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : L14003 (verre S2; taffetas; 24 oz/vg²), TX24P (basalte; taffetas; 24 oz/vg²), TG24P (verre E; taffetas; 24 oz/vg²) et L14025 (verre R haute performance; taffetas; 24 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.10 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.14 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,24$ $w = 0.021$	Écart entre les moyennes	Différence	Significativité	Écart entre les moyennes	Différence	Significativité	Écart entre les moyennes	Différence	Significativité
	L14003			TX24P			TG24P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm									
F = 316,2 : il y a au moins deux échantillons différents									
TX24P	0,72%	0,004	NS						
TG24P	17,5%	0,118	S	16,9%	0,114	S			
L14025	33,7%	0,188	S	24,7%	0,184	S	10,4%	0,07	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g									
F = 540,6 : il y a au moins deux échantillons différents									
TX24P	4,7%	0,028	S						
TG24P	17,6%	0,128	S	13,8%	0,100	S			
L14025	33,3%	0,199	S	21,5%	0,171	S	9,8%	0,071	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

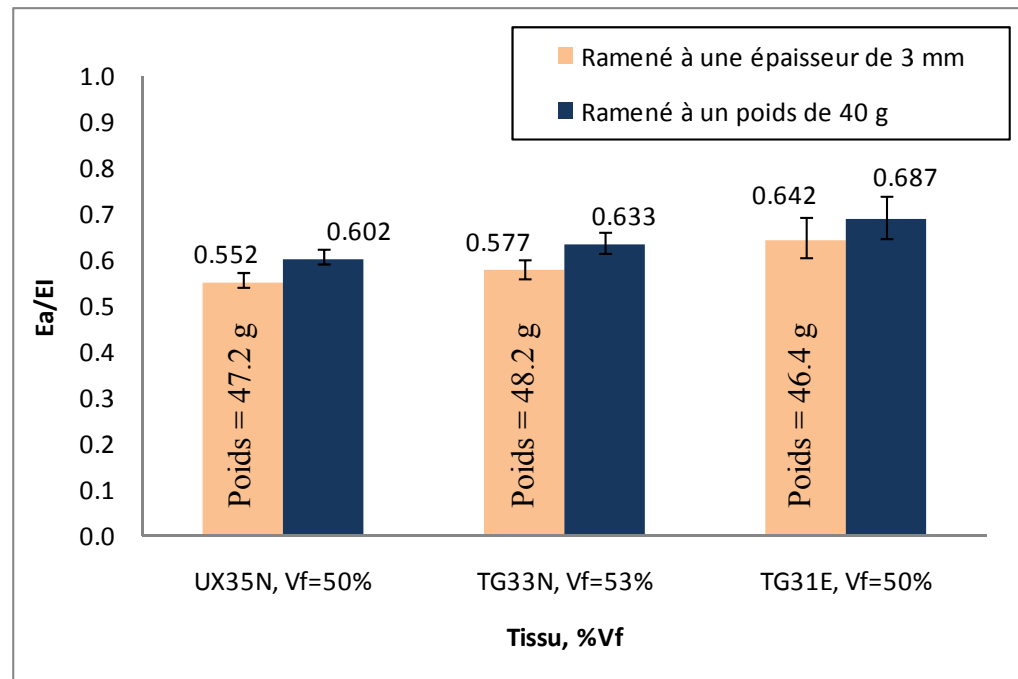


Figure 5.14 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_i en fonction de la nature des tissus. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : UX35N (basalte; tridimensionnel NCS; 35 oz/vg²), TG33N (verre E; tridimensionnel NCS; 33 oz/vg²) et TG31E (verre E; interlock; 31 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.11 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.14 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,039$	Écart entre les moyennes	Différence	Significativité	Écart entre les moyennes	Différence	Significativité
	UX35N			TG33N		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 19,9 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG33N	4,3%	0,025	NS			
TG31E	16,3%	0,090	S	11,3%	0,065	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 16,4 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG33N	4,9%	0,031	NS			
TG31E	14,1%	0,085	S	8,5%	0,054	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

Les résultats avec des renforts de 5-6 oz/vg² (Figure 5.11) montrent que le meilleur matériau est le verre E TG06P suivi du carbone TC06P. L'analyse statistique ANOVA présentée dans le Tableau 5.8 montre que tous les résultats des comparaisons de renfort ont des différences significatives. L'aramide TA05P présente les moins bonnes performances, cette observation est en accord avec certains résultats de la littérature. (Morais, 2005) Cette observation est aussi en désaccord avec certains résultats de la littérature. (Norman, 1975) et (Rohchoon, 2001) Par contre, les tests d'impact ont été effectués avec des niveaux d'énergie différents.

Dans le cas des renforts de 9-10 oz/vg² (Figure 5.12) le basalte TX10P est le renfort le plus résistant à l'impact suivi du verre E TG09P et plus loin de l'aramide TA09S. L'analyse statistique ANOVA présentée dans le Tableau 5.9 montre que la différence est non-significative dans le couple TG09P et TX10P pour les résultats ramenés à un poids de 40 g.

Par conséquent, TX10P et TG09P ont la même résistance à l'impact. Toutes les autres comparaisons de renfort ont des différences significatives.

À 24 oz/vg^2 (Figure 5.13) le renfort verre S2 L14003 est le meilleur matériau suivi du basalte TX24P. Le verre E TG24P et le verre R haute résistance L14025 performant un peu moins bien. L'analyse statistique ANOVA présenté dans le Tableau 5.10 montre que la différence est non-significative dans le couple L14003 et TX24P pour les résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm, ils ont donc la même résistance à l'impact. Toutes les autres comparaisons de renfort ont des différences significatives.

Finalement, les résultats présentés à la Figure 5.14 montrent que le renfort basalte UX35N résiste le mieux aux impacts, suivi du verre E TG33N et du TG31E. L'armure interlock du tissu de renfort TG31E est semblable à l'armure tridimensionnelle, c'est pour cette raison qu'il est comparé avec les renforts tridimensionnels. L'analyse statistique ANOVA présentée dans le Tableau 5.11 montre que la différence est non-significative dans le couple TG33N et UX35N pour les résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm et ceux ramenés à un poids de 40 g. Toutes les autres comparaisons de renfort ont des différences significatives.

De tous les matériaux étudiés, l'aramide apparait nettement moins performante à l'impact. Par exemple, elle est environ 37% moins efficace que le verre E à épaisseur égale. Cependant, elle est seulement 16% moins efficace que le verre E à poids égal. Pour un poids équivalent de 40g, l'épaisseur de l'échantillon de verre E TG06P est de 2,55 mm et celui d'aramide TA05P est de 3,71 mm. Par conséquent, en fonction des besoins mécaniques de la conception (résistance en tension, rigidité, géométrie etc.), la fibre d'aramide peut s'avérer un bon choix même si elle est moins performante que le verre E à l'impact.

En combinant les résultats obtenus pour les différentes valeurs de masse surfacique, un ordre de performance de la nature des tissus selon le critère E_a/E_I peut être établi :

1. Verre S2
2. Basalte
3. Verre E
4. Carbone
5. Verre R haute résistance
6. Aramide

Les différences entre le verre S2 et le basalte ainsi qu'entre le basalte et le verre E sont non-significatives dans la majorité des cas.

5.6.2 Influence de la nature des tissus à épaisseur égale et même armure

Une comparaison de l'effet de la nature des fibres à volume de fibre égale est présentée à la Figure 5.15 pour des renforts taffetas de masse surfacique entre 6 et 10 oz/vg² et de taux de fibre entre 50 et 53% (qualité standard). Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur la figure. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle montre que la différence est non-significative dans le cas du couple TX10P et TG09N. Dans tous les autres cas la différence est significative (voir Tableau 5.12).

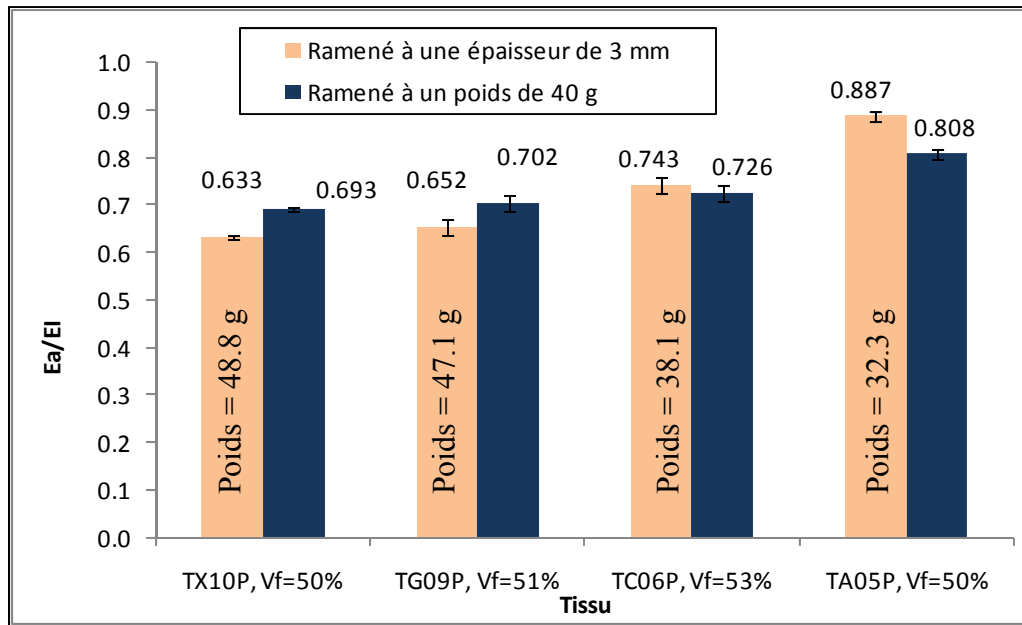


Figure 5.15 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction de la nature des tissus avec des tissus d'épaisseur similaire et d'armure identique. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TX10P (basalte; taffetas; 10 oz/vg²), TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²), TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²), TA05P (aramide; taffetas; 6 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.12 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.15 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,24$ $w = 0.021$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TX10P			TG09P			TC06P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm									
F = 478,3 : il y a au moins deux échantillons différents									
TG09P	3,2%	0,020	NS						
TC06P	12,7%	0,080	S	9,1%	0,060	S			
TA05P	40,3%	0,255	S	35,9%	0,235	S	24,5%	0,175	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g									
F = 145,3 : il y a au moins deux échantillons différents									
TG09P	1,4%	0,010	NS						
TC06P	0,3%	0,002	NS	1,1%	0,008	NS			
TA05P	17,2%	0,119	S	15,5%	0,109	S	16,8%	0,117	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

Des observations semblables par rapport à la comparaison à masse surfacique de tissu égale peuvent être faites, c'est-à-dire que le meilleur matériau est le basalte TX10P, suivi du verre E TG06P, du carbone TC06P et finalement de l'aramide TA05P. Par contre, les différences sont moins grandes. Dans le cas des résultats à épaisseur égale, la différence entre le TX10P et le TG09P est non-significative. En plus, dans le cas des résultats à poids égal, les différences entre le TX10P, le TG09P et le TC06P sont non-significatives ce qui signifie que les composites fabriqués avec ces renforts ont la même résistance à l'impact à poids égal.

L'effet de la nature des tissus sur les modes de déformation et l'endommagement a été synthétisé dans le Tableau 5.13.

Tableau 5.13 Comparaison des résultats de l'analyse visuelle de l'endommagement en fonction de la nature des fibres

Tissus	Forme de la délamination	Cote du matériau selon le critère de résistance		
		Surface de délamination maximale [mm]	Profondeur du dommage [mm]	Extrusion du dommage [mm]
Verre S2	Irrégulière/circulaire	28	0,21	0,27
Basalte	Croix /carré	17 à 25	0,18 à 0,28	0,15 à 0,19
Verre E	Circulaire	15 à 34	0,21 à 0,41	0,51 à 1,03
Carbone				
Verre R haute résistance	Irrégulière/circulaire	49	0,23	0,40
Aramide	Croix /Losange	29 à 32	1,60 à 1,92	1,92 à 2,57

Il est possible d'observer au niveau de la forme de la délamination que de grandes tendances s'y dessinent. Selon les critères d'évaluation d'endommagement présentés au Tableau 5.13, le basalte est le matériau qui subit le moins de dommage, suivi du verre S2, du verre E, du verre R haute résistance, du carbone et de l'aramide. Cependant, comme ces matériaux ont des types et formes de déformations très différents les uns des autres, cette comparaison est à prendre avec précaution.

5.7 Comparaison des hybrides avec les non-hybrides

Dans certains cas, des tissus hybrides, c'est-à-dire qui contiennent plus d'une nature de fibres, seront sélectionnés, soit pour diminuer le poids ou pour améliorer les propriétés mécaniques. Les performances de ces matériaux à l'impact ont été comparées à celles des matériaux de base afin de valider si leur utilisation est justifiée lorsque ceux-ci sont soumis à des impacts. Les comparaisons sont présentées dans les Figure 5.16 pour le verre E / aramide, Figure 5.18 pour le carbone / aramide, Figure 5.18 pour le verre E / polyester, Figure 5.19 pour le verre E / polypropylène haute densité et Figure 5.21 pour le carbone / polypropylène haute densité. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur les figures.

La première comparaison (Figure 5.16) est celle du verre E TG09T, l'aramide TA09S et de l'hybride verre E / aramide TH12R, tous des sergés. L'ordre de la résistance à l'impact est TG09T, TH12R et TA09S. La résistance de l'hybride est seulement 8% inférieure à celle du verre E et son poids est de 15% plus léger. Il est donc avantageux d'utiliser l'hybride TR12R, car il y a une bonne réduction de poids avec seulement une faible perte de résistance à l'impact par rapport au verre E. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle montre une différence non-significative dans le cas du couple TG09T et TH12R pour les résultats ramenés à un poids de 40 g, ils ont donc la même résistance à l'impact. Toutes les autres comparaisons de résultats ont des différences significatives (voir Tableau 5.14).

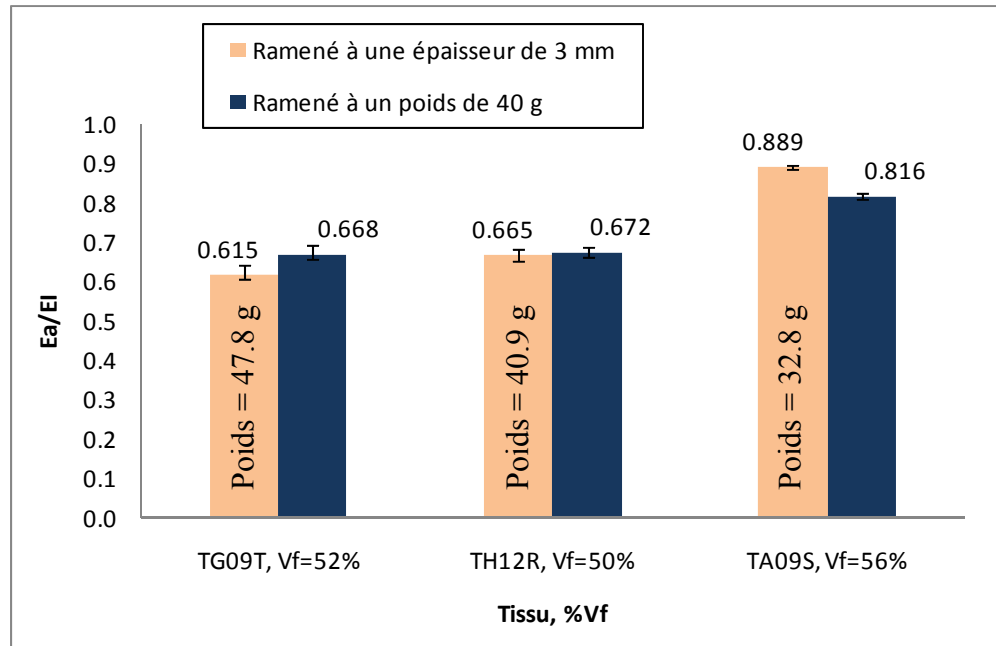


Figure 5.16 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de verre E et aramide. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TG09T (verre E; sergé; 9 oz/vg²), TH12R (hybride verre E / aramide; sergé; balancé; 12 oz/vg²) et TA09P (aramide; sergé; 9 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.14 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.16 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,0172$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TG09T			TH12R		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 1022,3 : il y a au moins deux échantillons différents						
TH12R	8,1%	0,050	S			
TA09S	44,6%	0,274	S	25,2%	0,224	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 327,1 : il y a au moins deux échantillons différents						
TH12R	0,6%	0,004	NS			
TA09S	22,2%	0,148	S	17,7%	0,144	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

La deuxième comparaison (Figure 5.17) concerne le carbone TC06P, l'aramide TA05P et l'hybride carbone / aramide TN07T. Ces matériaux n'ont pas la même armure, cependant il a été montré que celle-ci affecte peu la résistance à l'impact. Étant donné que le carbone a une résistance à l'impact de 17% supérieure à l'aramide, les propriétés de l'hybride sont améliorées de 9% par rapport à l'aramide. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle montre une différence non-significative dans le cas du couple TA05P et TN07T pour les résultats ramenés à un poids de 40 g. Par conséquent, la résistance à l'impact de l'hybride carbone / aramide n'est pas supérieure à celle de l'aramide. Toutes les autres comparaisons de résultats ont des différences significatives. (voir Tableau 5.15)

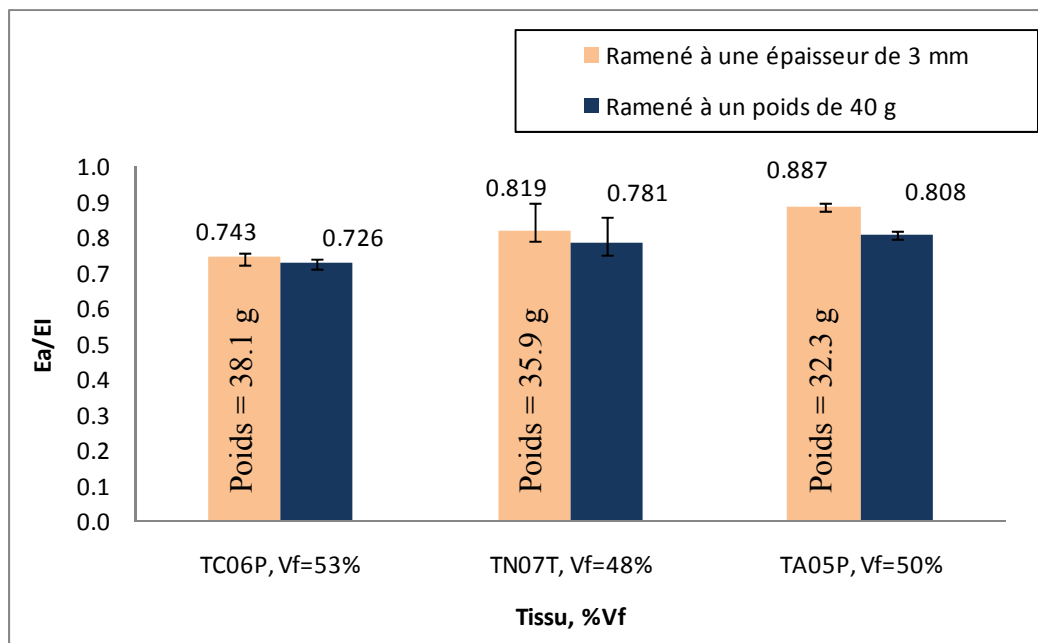


Figure 5.17 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de carbone et aramide. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²), TN07T (hybride carbone / aramide; sergé; balancé; 7 oz/vg²) et TA05P (aramide; taffetas; 5 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.15 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.17 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,0285$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TC06T			TN07T		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 90,5 : il y a au moins deux échantillons différents						
TN07T	10,2%	0,076	S			
TA05P	19,3%	0,144	S	7,7%	0,068	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 27,3 : il y a au moins deux échantillons différents						
TN07T	7,6%	0,055	S			
TA05P	11,3%	0,082	S	3,3%	0,027	NS

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

Pour ce qui est de l'hybride verre E / polyester TR08P et du verre E TG09P (voir Figure 5.18), il n'y a aucune différence de résistance à l'impact à épaisseur égale; par contre le TR08P est 7,7% plus résistant que le TG09P à poids égal. L'avantage principal de l'hybride TR08P est la diminution du poids par rapport au verre E TG09P : à épaisseur et résistance égales, il est 15,9% plus léger. Une autre différence entre les deux matériaux se situe dans le type de déformation; le renfort TR08P a une délamination plus marquée, mais une plus petite extrusion du matériau à la surface opposée de l'impact. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle montre une différence non-significative entre les renforts TG09P et TR08P pour les résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm. Par ailleurs, pour les résultats ramenés à un poids de 40 g, ils ont une différence significative. (voir Tableau 5.16)

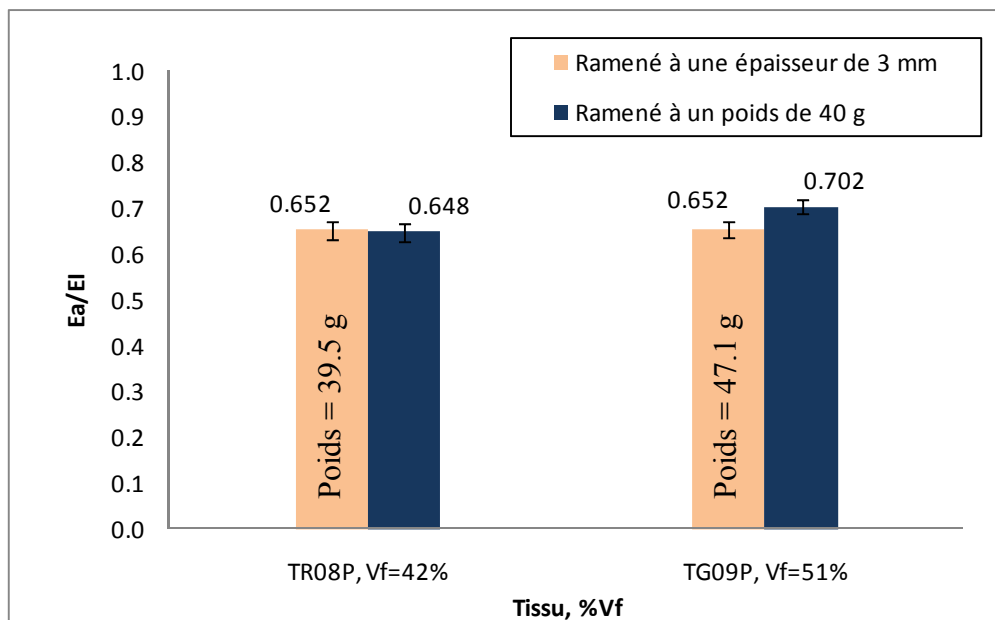


Figure 5.18 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de verre E et polyester. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : TR08P (hybride verre E / polyester; non-balancé; 8 oz/vg²) et TG09P (verre E; taffetas; 9 oz/vg²), infusés avec de la résine vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.16 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.18 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 5,32$	Différence	F – statistique	Significativité		Différence	F – statistique	Significativité
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm				Résultats ramenés à un poids de 40 g			
TR08P et TG09P	0%	0	NS	TR08P et TG09P	7,7%	24,8	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de gauche sont les plus résistants à l'impact.

L'inégra améliore de beaucoup la résistance à l'impact du verre E lorsqu'il y est combiné (voir Figure 5.18). À épaisseur égale, il y a une amélioration de 32% avec le tissu sergé EUM7T et de 19% avec le tissu taffetas EUM7P par rapport au tissu TG06P. Dans le cas des hybrides verre E/polypropylène haute densité, l'armure semble avoir une influence plus marquée qu'avec un tissu composé d'un même matériau. En effet, le composite à base de EUM7T possède une valeur de E_a/E_I significativement plus faible que celui à base de EUM7P, même si le taux de fibre est plus faible, et donc la qualité de fabrication, est largement plus faible. Cela peut être dû à une mauvaise adhésion du polypropylène haute densité avec la résine dans la configuration taffetas. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle montre une différence significative pour toutes les comparaisons (voir Tableau 5.17).

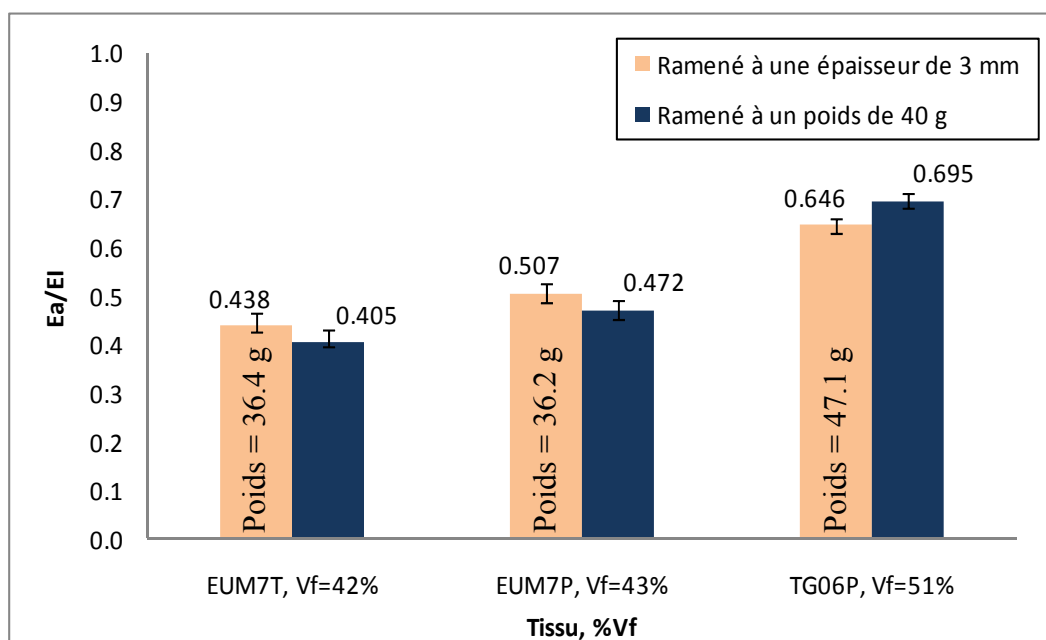


Figure 5.19 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de verre E et polypropylène haute densité. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : EUM7T (hybride verre E / polypropylène haute densité; sergé; balancé; 7 oz/vg²), EUM7P (hybride verre E / polypropylène haute densité; taffetas; balancé; 7 oz/vg²) et TG06P (verre E; taffetas; 6 oz/vg²), infusés avec du vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.17 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.19 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,0245$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	EUM7T			EUM7P		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 265,8 : il y a au moins deux échantillons différents						
EUM7P	15,8%	0,139	S			
TG06P	32,2%	0,208	S	21,5%	0,069	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 607,8 : il y a au moins deux échantillons différents						
EUM7P	16,5%	0,067	S			
TG06P	41,7%	0,290	S	32,1%	0,223	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

La comparaison à épaisseur égale démontre que l'hybride carbone/aramide EO06P non-balancé performe mieux que les autres hybrides et qu'il est 17,9% plus résistant à l'impact que le carbone TC06P (voir figure 5.21 et tableau 5.18). Pour ce qui est des autres hybrides, le renfort EOM6T est 4,7% moins résistant que le carbone TC06P et le renfort EO06P alterné l'est de 3,8% à épaisseur égale. Par contre, selon l'analyse statistique ANOVA ces deux renforts ont une différence non-significative avec le carbone TC06P (voir Tableau 5.18). À poids égale, le EO06P non-balancé est 30,8% plus résistant que le carbone TC06P, le EOM6T l'est de 6,4% et le EO06P alterné de 6,8%. Par contre, la différence entre EOM6T et EO06P alterné est non-significative (voir Tableau 5.18). L'hybride EO06P non-alterné contient des fibres de carbone dans le sens chaîne et de polypropylène haute densité dans le sens trame. Cela permet d'avoir une plus grande quantité d'énergie emmagasinée (déformation élastique) dans le sens trame, donc moins de dommage au matériau.

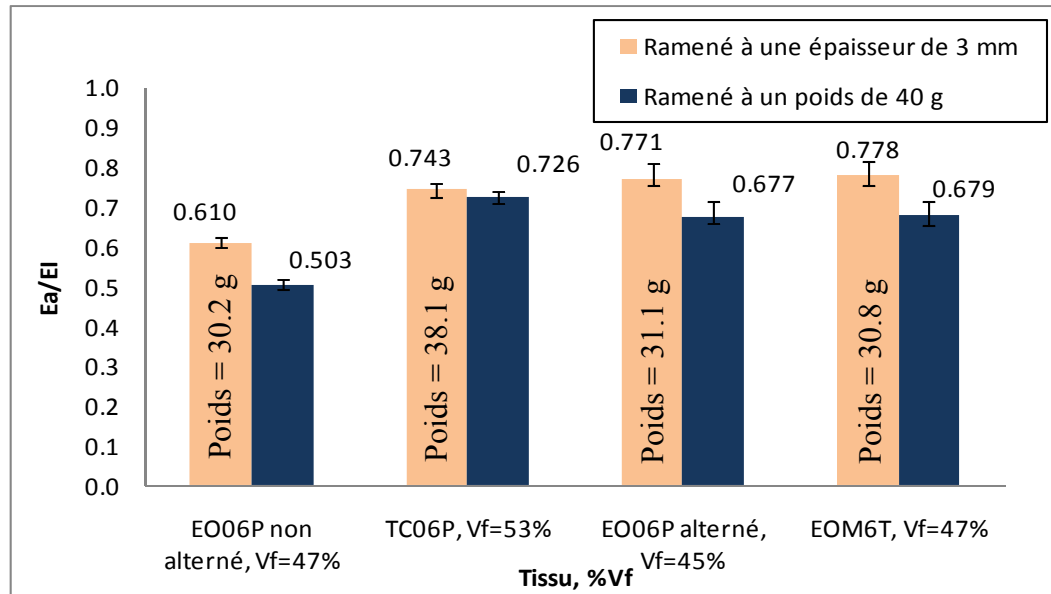


Figure 5.20 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I , en fonction de la nature des tissus, comparaison des tissus hybrides et non-hybrides de carbone et polypropylène haute densité. Les laminés sont fabriqués avec les tissus de renfort suivants : EO06P (hybride carbone / polypropylène haute densité; taffetas; non-balancé; 6 oz/vg²) avec les plis non-alterné [0/0], TC06P (carbone; taffetas; 6 oz/vg²), EO06P (hybride carbone / polypropylène haute densité; taffetas; non-balancé; 6 oz/vg²) avec les plis alterné [0/90] et EOM6T (hybride carbone / polypropylène haute densité; sergé; balancé; 6 oz/vg²), infusés avec du vinylester et impactés à 22 J.

Tableau 5.18 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 5.20 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,24$ $w = 0.0364$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	EO06P non-alterné			TC06P			EO06P alterné		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm									
F = 76,4 : il y a au moins deux échantillons différents									
TC06P	17,9%	0,133	S						
EO06P alterné	20,9%	0,161	S	3,8%	0,028	NS			
EOM6T	21,6%	0,168	S	4,7%	0,035	NS	0,9%	0,007	NS
Résultats ramenés à un poids de 40 g									
F = 144,1 : il y a au moins deux échantillons différents									
TC06P	30,7%	0,223	S						
EO06P alterné	25,7%	0,174	S	6,8%	0,049	S			
EOM6T	25,9%	0,176	S	6,5%	0,047	S	0,3%	0,002	NS

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

En parallèle, une analyse comparative des aspects visuels à l'endommagement pour les renforts hybrides est effectuée. Le Tableau 5.19 présente les résultats de l'analyse visuelle de l'endommagement des matériaux hybrides.

Tableau 5.19 Comparaison des résultats de l'analyse visuelle en fonction de la nature des fibres des hybrides

Tissus	Forme de la délamination	Cote du matériau selon le critère de résistance		
		Surface de délamination maximale [mm]	Profondeur du dommage [mm]	Extrusion du dommage [mm]
Verre E	Circulaire	15 à 34	0,21 à 0,41	0,51 à 1,03
Aramide	Circulaire	20 à 32	1,60 à 1,77	1,92 à 2,57
Verre E / Aramide	Irrégulière	10/28	0,33	1,07
Verre E / Polyester	Peanuts	14/56	0,37	0,56
Verre E/ Polypropylène haute densité	Cercle/Croix	20 à 67	0,36 à 0,46	1,12 à 1,14
Carbone	Croix / carré	47 à 55	0,31	0,36 à 1,26
Carbone/Aramide	Croix/ rectangle	13/32	0,60	1,32
Carbone/Polypropylène haute densité	Losange	18 à 20	0,75 à 2,06	1,30 à 3,02

Le tissu hybride carbone / aramide diminue les dommages de l'aramide : la quantité de dommage se situe à mi-chemin entre les deux matériaux. Pour ce qui est du verre E/ aramide, les dommages sont que légèrement plus grands qu'avec le verre E seul. Cet hybride constitue un avantage sur le verre E car son poids est inférieur. Le verre E / polyester, TR08P, a une déformation différente du verre E seul, il y a une plus grande surface de délamination et légèrement moins de d'extrusion que le verre E TG09P. Le polypropylène haute densité combiné au carbone augmente l'étendue des dommages subis comparé au carbone seul. Il ne semble pas influencer les dommages du verre E lorsqu'il y est combiné. Il peut être avantageux d'utiliser du verre E / polypropylène haute densité pour diminuer le poids du laminé.

CHAPITRE 6

ÉTUDE DE PRODUITS SPECIAUX : RENFORTS PRÉ-IMPRÉGNÉS DE RÉSINE D'ÉPOXY ET RENFORT À RÉSINE INTÉGRÉE

Afin d'élargir les connaissances sur la résistance à l'impact des composites et de créer une ouverture vers d'autres horizons, des essais préliminaires ont été faits avec des résines d'époxy prés imprégnés (produit par Nanoleedge) ainsi que des renforts twintex (tissu verre / polypropylène).

6.1 Renfort pré-imprégné de résine d'époxy

Le choix de la résine peut avoir une influence sur la résistance à l'impact des laminés. Des laminés ont été fabriqués avec différentes résines et deux tissus de renfort : le TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) et le TC06P (carbone taffetas de 6 oz/vg²), pour évaluer l'influence sur la résistance à l'impact de chacune de celle-ci. Il s'agit de la résine vinylester, mise en forme par infusion, de pré-imprégnés d'époxy et de pré-imprégnés d'époxy chargée de nanotubes de carbone mis en forme avec une presse chauffante.

Le Tableau 6.1 présente les résultats des tests d'impact des laminés fabriqués avec les renforts pré-imprégnés d'époxy et mis en forme avec une presse chauffante comparés avec les laminés infusés avec de la résine vinylester et les renforts TG09P (verre E taffetas 9 oz/vg²) et TC06P (carbone taffetas 6 oz/vg²).

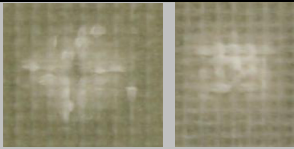
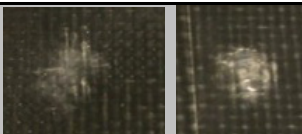
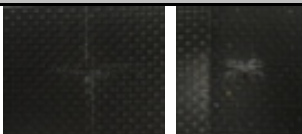
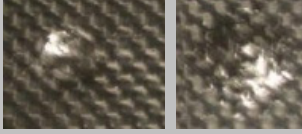
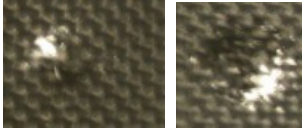
Tableau 6.1 Résultats des tests d'impact et caractéristiques des échantillons

Tissu	Résine	NB plis	Épaisseur [mm]	Poids [g]	Masse volumique laminé [g/cc]	% Vf	Ea [J]	EI [J]	Ea/EI
TG09P	Vinylester	13	2,93	45,9	1,77	51%	15,42	23,34	0,66
TG09P	Époxy	13	2,52	43,1	1,93	59%	12,32	22,55	0,55
TG09P	Époxy nano-chargé	13	2,55	44,7	1,98	58%	11,34	22,62	0,50
TC06P	Vinylester	14	2,83	35,9	1,44	53%	16,90	22,20	0,76
TC06P	Époxy	14	2,56	33,6	1,49	58%	15,56	22,43	0,69
TC06P	Époxy nano-chargé	14	2,60	34,6	1,51	57%	14,47	22,49	0,64

L'énergie d'impact appliquée aux échantillons varie de 22,43 à 23,62 J. Tel que vérifié précédemment, cette variation est trop faible pour avoir une incidence sur les résultats. L'énergie absorbée varie entre 11,34 et 16,90 J et l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact varie entre 0,50 à 0,76.

Le Tableau 6.2 présente les résultats de l'analyse visuelle des laminés fabriqués avec les renforts pré-imprégnés d'époxy comparés avec des laminés infusés avec de la résine vinylester.

Tableau 6.2 Caractérisation visuelle des impacts

Matériau	Épaisseur [mm]	Dommages	Délamination min/max [mm]	Dommage [mm]	
				Profondeur / extrusion	
TG09P/ Vinylester	2,93		13/16	0,26	0,94
TG09P/ Époxy	2,52		15/15	0,42	1,80
TG09P/ Époxy nano	2,55		9/12	0,36	1,52
TC06P/ Vinylester	2,83		11/55	0,31	1,26
TC06P/ Époxy	2,56		11/11	1,24	2,21
TC06P/ Époxy nano	2,60		11/11	0,95	1,62

Les laminés fabriqués avec les résines d'époxy présentent plus de dommages visuels que les laminés fabriqués avec du vinylester. Par contre il y a moins de délamination.

Les résultats des tests d'impact des laminés fabriqués avec tous les types de résine et avec les renforts TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) sont présentés à la Figure 6.1 et les résultats avec les renforts TC06P (carbone taffetas de 6 oz/vg²) sont présentés dans la Figure 6.2. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur les figures. Une

analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et les résultats sont présentés dans les Tableau 6.3 et 6.4.

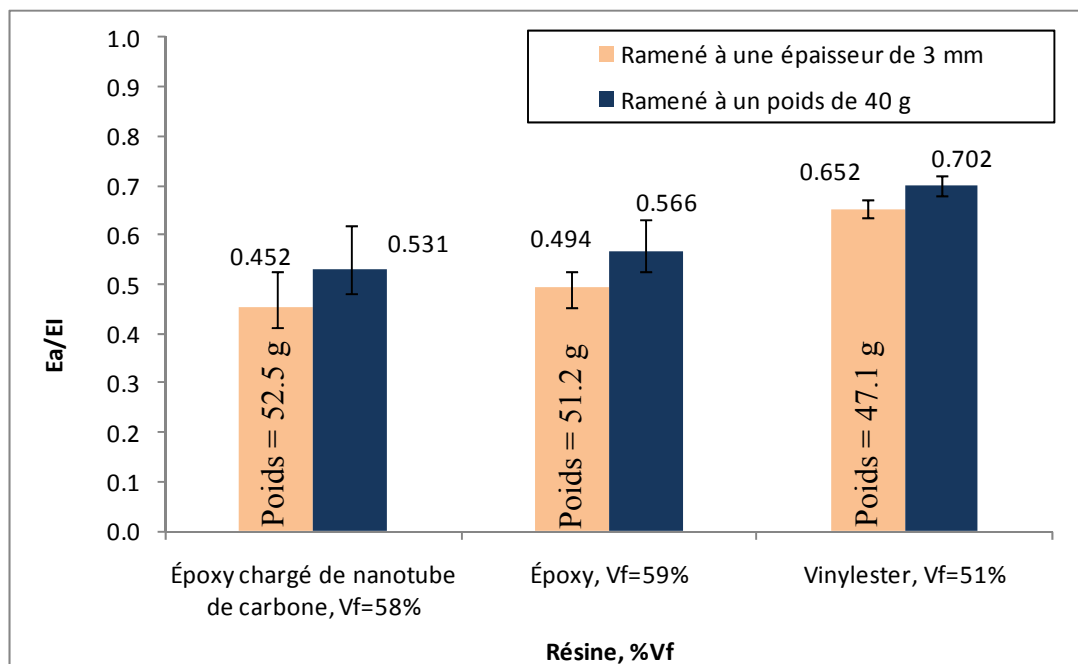


Figure 6.1 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type de résine. Les laminés sont fabriqués avec le tissu de renfort TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) et infusés avec les trois résines suivantes : vinylester, film d'époxy et film d'époxy chargé de nanotube de carbone. Les laminés sont impactés à 22 J.

Tableau 6.3 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 6.1 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,0589$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TG09P / Époxy chargé de nanotube de carbone			TG09P / Époxy		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 50,3 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG09P / Époxy	8,7%	0,043	NS			
TG09P / Vinylester	31,2%	0,204	S	24,7%	0,162	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 34,5 : il y a au moins deux échantillons différents						
TG09P / Époxy	6,6%	0,037	NS			
TG09P / Vinylester	24,8%	0,174	S	19,5%	0,137	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

Malgré que le pourcentage de différence entre les laminés d'époxy et d'époxy chargé de nanotube semble élevé, il n'est pas considéré comme significatif puisqu'il y a une forte dispersion des résultats.

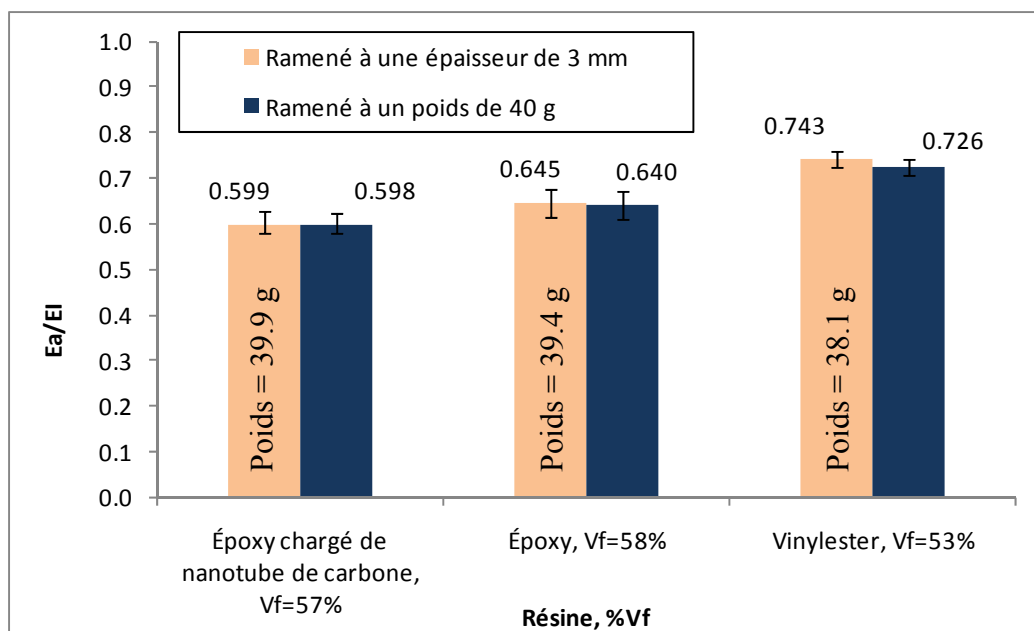


Figure 6.2 Variation de l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact, E_a/E_I en fonction du type de résine. Les laminés sont fabriqués avec le tissu de renfort TC06P (carbone taffetas de 6 oz/vg²) et infusés avec les trois résines suivantes : vinylester, film d'époxy et film d'époxy chargé de nanotube de carbone. Les laminés sont impactés à 22 J.

Tableau 6.4 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 6.2 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,0347$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	TC06P / Époxy chargé de nanotube de carbone			TC06P / Époxy		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 39,1 : il y a au moins deux échantillons différents						
TC06P / Époxy	6,7%	0,043	S			
TC06P / Vinylester	15,9%	0,114	S	9,9%	0,071	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 28,3 : il y a au moins deux échantillons différents						
TC06P / Époxy	6,2%	0,040	S			
TC06P / Vinylester	13,7%	0,095	S	8,0%	0,056	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

L'analyse statistique ANOVA montre que les différences sont non-significatives dans le cas du couple TG09P / vinylester et TG09P / époxy chargé de nanotubes de carbone. Toutes les autres comparaisons ont des différences significatives. Les résultats des deux tissus étudiés montrent que les composites fabriqués sous presse avec des renforts pré-imprégnés de films de résiné époxy donnent une meilleure résistance à l'impact que le composite verre E / vinylester. Cette performance supérieure peut provenir du fait que le procédé de fabrication des pré-imprégnés (avec une presse chauffante) donne une meilleure qualité de laminé avec des taux de fibres entre 57% et 59% versus 51% à 53% en infusion de vinylester. De plus, les nanotubes de carbone présents dans la résine d'époxy améliorent la résistance des laminés à l'impact de 6,2% à poids égal. Par contre, les données des essais TG09P / époxy et TG09P /

époxy chargé de nanotube de carbone sont trop dispersées pour que la différence de 8,7% soit significative à épaisseur égale.

6.2 Renfort à matrice intégrée

Le twintex est un renfort taffetas à résine intégrée. Il s'agit d'un mélange de 60% de filaments de verre E et 40% de filaments de polypropylène. Lors de la fabrication, le tissu est chauffé pour faire fondre le propylène qui devient alors la matrice du laminé.

Le Tableau 6.5 présente les résultats des tests d'impact des laminés fabriqués avec le renfort twintex comparer avec des laminés de TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) / vinylester.

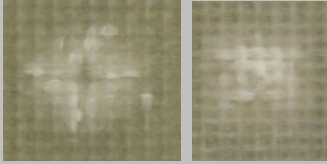
Tableau 6.5 Résultats des tests d'impact et caractéristiques des échantillons

Tissu	Résine	NB plis	Épaisseur [mm]	Poids [g]	Masse volumique laminé [g/cc]	% Vf	Ea [J]	EI [J]	Ea/EI
TG09P	Vinylester	13	2,93	45,9	1,77	51%	15,42	23,34	0,660
TWINTEX Sous vide	n/a	3	3,23	40,12	1,41	n/d	7,68	22,45	0,34
TWINTEX rouleau	n/a	3	3,35	38,05	1,29	n/d	9,49	22,32	0,43

L'énergie d'impact appliquée aux échantillons varie de 22,32 à 23,34 J. L'énergie absorbée varie entre 7,68 et 15,42 J et l'énergie absorbée sur l'énergie d'impact varie entre 0,34 à 0,66

Le Tableau 6.6 présente les résultats de l'analyse visuelle des laminés de twintex comparés avec le composite TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) / vinylester.

Tableau 6.6 Caractérisation visuelle des impacts

Matériau	Épaisseur [mm]	Dommages	Délamination min/max [mm]	Domage [mm]	
				Profondeur / extrusion	
TG09P/ Vinylester	2,93		13/16	0,26	0,9 4
Twintex sous vide	3,23		6/6	Non mesurable	0,5 9
Twintex rouleau	3,35		6/6	Non mesurable	0,4 2

Les dommages présents sur les laminés de twintex sont difficilement visibles et les dommages sont beaucoup moins importants que ceux des laminés de verre E / vinylester.

Les résultats des tests d'impact des laminés fabriqués avec du twintex et celui fabriqué avec un tissu de renfort TG09P (verre E taffetas de 9 oz/vg²) et infusé avec de la résine de vinylester sont présentés à la Figure 6.3. Les poids des laminés ramenés à une épaisseur de 3 mm sont indiqués sur la figure. Une analyse statistique ANOVA a été réalisée sur ces données et elle montre que la différence est non-significative dans le cas du couple Twintex sous vide et Twintex rouleau chauffant. Ceci est dû à la grande dispersion des résultats. Toutes les autres comparaisons sont significatives (voir Tableau 6.7).

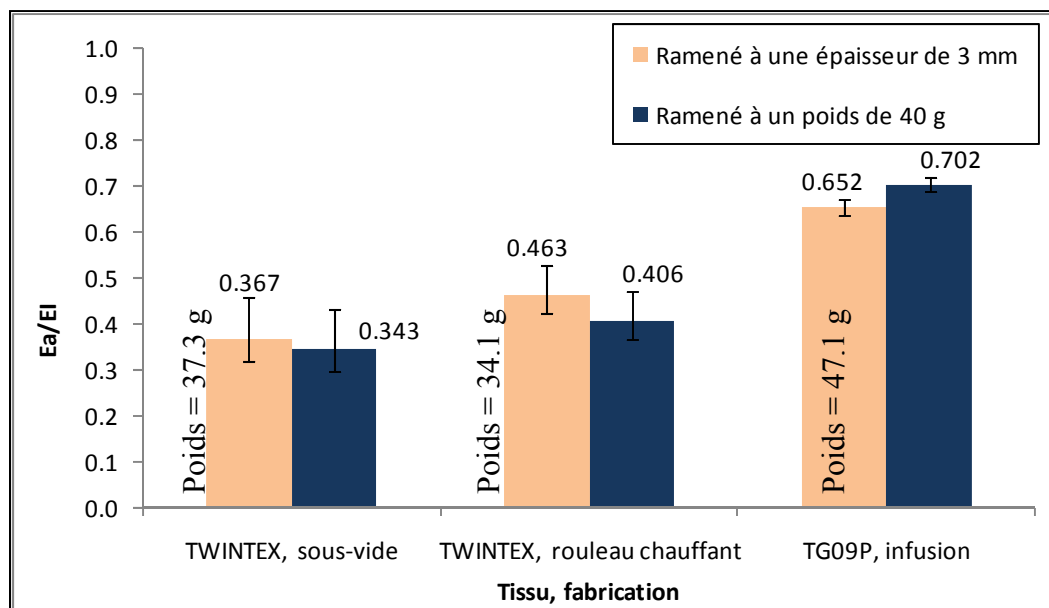


Figure 6.3 Comparaison de la résistance à l'impact des laminés de twintex fabriqués sous vide et au rouleau chauffant avec des laminés de verre E infusés avec de la résine vinylester. Les échantillons ont été impactés à 22 J.

Tableau 6.7 Pourcentage de différence entre les résultats des tests d'impact présentés dans la Figure 6.3 et test de significativité F - statistique de ces pourcentages de différence

$F_{crit} = 3,89$ $w = 0,0347$	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité	Différence	Écart entre les moyennes	Significativité
	Twintex, sous vide			Twintex, rouleau chauffant		
Résultats ramenés à une épaisseur de 3 mm						
F = 39,1 : il y a au moins deux échantillons différents						
Twintex, rouleau chauffant	26,2%	0,096	S			
TG09P, infusion	43,7%	0,285	S	29,0%	0,188	S
Résultats ramenés à un poids de 40 g						
F = 28,3 : il y a au moins deux échantillons différents						
Twintex, rouleau chauffant	18,4%	0,064	NS			
TG09P, infusion	51,1%	0,296	S	42,2%	0,360	S

Note : S pour différence significative et NS pour différence non-significative. Les composites de la ligne titre sont les plus résistants à l'impact.

Les laminés de twintex performant mieux à l'impact que le renfort en fibres de verre E. De fait, ce matériau est le plus performant à l'impact de tous ceux étudiés dans ce projet. Le twintex fabriqué sous vide est 43,7% plus résistant que le verre E à épaisseur égale et il est 51,1% plus résistant que le verre E à poids égal. Le twintex fabriqué avec le rouleau chauffant est 29,0% plus résistant que le verre E à épaisseur égale et il est 42,2% plus résistant que le verre E à poids égal. Par ailleurs, en plus d'avoir une meilleure résistance à l'impact, les laminés de twintex ont un poids largement inférieur à ceux produit avec un renfort en fibre de verre E. Le twintex fabriqué sous vide est 20,7% plus léger que le TG09P et celui fabriqué avec un rouleau chauffant l'est de 27,5%. Par contre, à la fois, la méthode de fabrication et la matrice ne sont pas les mêmes entre ces différents laminés et des conclusions sur l'origine des différences observées ne peuvent être tirées.

CHAPITRE 7

SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

L'analyse des résultats de cette étude a montré que la qualité des laminés a une influence majeure sur la résistance à l'impact. Les échantillons de qualité supérieure ont résisté à l'impact un peu plus de deux fois mieux que les échantillons de qualité standard (niveau jugé comme acceptable dans l'industrie). Ceci indique que le mouillage des fibres joue un rôle important : le matériau résiste mieux aux impacts lorsque ses fibres macroscopiques et microscopiques sont bien mouillées. Le cisaillement inter laminaire causé par les vides y est donc minimisé.

Les essais effectués indiquent aussi que l'armure tridimensionnelle a une meilleure résistance à l'impact que les autres armures et que l'armure sergé est légèrement plus résistante à l'impact que le taffetas. Par contre, aucune différence significative n'a été observée en termes de résistance à l'impact entre les autres armures testées.

Après la qualité du laminé, la caractéristique qui a la plus grande influence sur la résistance à l'impact est la nature des fibres. Voici l'ordre de performance des fibres qui a été mis en évidence :

1. Verre S2
2. Basalte
3. Verre E
4. Carbone
5. Verre R haute résistance
6. Aramide

La différence entre le verre S2 et le Basalte ainsi qu'entre le basalte et le verre E est non-significative dans la majorité des cas.

Les résultats ont également indiqué que la masse surfacique et le volume de fibre influencent peu la résistance à l'impact. Des comparaisons ont donc pu être faites entre les tissus sans que ces caractéristiques ne soient maintenues constantes.

Certains hybrides vont améliorer la résistance à l'impact des composites. Par contre, d'autres en diminueront la résistance. Par exemple, le tissu de renfort TH12R (hybride verre E / aramide sergé de 12 oz/vg²) a une résistance de 8% plus faible que le tissu de renfort TG09T (verre E sergé de 9 oz/vg²) tout en diminuant le poids du composite de 15% ce qui est un avantage considérable. Le tissu de renfort TN07T (hybride carbone/aramide sergé de 7 oz/vg²) génère une résistance à mi-chemin entre le carbone et l'aramide, par contre, ni l'un ni l'autre de ces matériaux n'a une bonne résistance à l'impact de faible vitesse. Le TR08P (hybride verre E/polyester taffetas de 8 oz/vg²) conserve la résistance à l'impact tout en diminuant le poids de 15,9%. À épaisseur égale, le polypropylène haute densité améliore la résistance à l'impact du verre E de 32% pour le renfort EUM7T et de 19% pour le renfort EUM7P. Par contre, le polypropylène haute densité diminue la résistance à l'impact que légèrement (environ 4%) et de manière non-significative dans un tissu balancé avec du carbone. Lorsque le tissu hybride carbone / polypropylène haute densité n'est pas balancé, avec du polypropylène haute densité dans le sens longitudinal et du carbone dans le sens transversal, la résistance à l'impact est améliorée de 18%.

Il y a une variation d'environ 85% de la résistance à l'impact des différentes natures de tissu de renfort. L'ordre de performance celles-ci est le suivant :

<u>Comparaison à épaisseur égale</u>	<u>Comparaison à poids égal</u>
1. <i>Hybride Verre E / Polypropylène haute densité balancé</i>	1. <i>Hybride Verre E / Polypropylène haute densité balancé</i>
2. Verre S2	2. <i>Hybride Carbone / Polypropylène haute densité non balancé</i>
3. Basalte	3. Verre S2
4. <i>Hybride Carbone / Polypropylène haute densité non balancé</i>	4. Basalte
5. Verre E $\approx$ <i>Hybride Verre E/Polyester non-balancé</i>	5. <i>Hybride Verre E / Polyester non balancé</i>
6. <i>Hybride Verre E / Aramide balancé</i>	6. Verre E = <i>Hybride Verre E/Aramide balancé</i>
7. Carbone	7. <i>Hybride Carbone / Polypropylène haute densité balancé</i>
8. Verre R haute résistance	8. Carbone
9. <i>Hybride Carbone / Polypropylène haute densité balancé</i>	9. <i>Hybride Carbone / Aramide balancé</i>
10. <i>Hybride Carbone / Aramide balancé</i>	10. Verre R haute résistance
11. Aramide	11. Aramide

Finalement, les tests exploratoires menés avec des résines époxy chargés ou non de nanotubes de carbone sous forme de pré-imprégnés et des renforts à matrice intégré montrent des résultats intéressants. Le twintex mise en forme sous vide est le composite le plus résistant à l'impact.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis d'analyser l'effet des différentes caractéristiques des renforts tissés (l'armure, la nature, la masse surfacique et l'utilisation des tissus hybrides) sur la résistance à l'impact des laminés produits. L'influence de certains paramètres liés au composite (épaisseur et le taux de fibre) et à la mesure d'impact (énergie d'impact) a aussi été étudiée. Les paramètres qui influencent le plus les performances des composites à l'impact sont la qualité du laminé (taux de fibre), la nature (matière composante du tissu) du tissu et l'armure (uniquement NCS).

La qualité des laminés a une influence majeure sur la résistance à l'impact, c'est l'aspect le plus marqué de la recherche. Cependant, la constance de la qualité des laminés est difficile à obtenir avec la méthode de fabrication par infusion. Celle-ci est largement dépendante de l'environnement et de la résine. Il serait intéressant d'élaborer un protocole de fabrication qui améliorerait la qualité des laminés et diminuerait la variation de qualité d'un laminé à l'autre. Par ailleurs, la qualité des résines varie dans le temps et d'une commande à l'autre, en particulier en raison du moyen de contrôle-qualité utilisé par le manufacturier. Un meilleur contrôle de la qualité au niveau de tout le processus de fabrication des résines aurait donc un effet majeur sur les niveaux de résistance à l'impact.

Après la qualité du laminé, la caractéristique qui a la plus grande influence sur la résistance à l'impact est la nature des fibres. De plus, certains hybrides vont améliorer la résistance à l'impact du composite, tandis que d'autres n'auront aucune influence et d'autres en diminueront la résistance. Voici l'ordre de performance selon la nature de tissus à poids égal : (1) hybride Verre E/polypropylène haute densité balancé; (2) hybride carbone/polypropylène haute densité non-balancé; (3) verre S2; (4) basalte; (5) hybride Verre E / polyester; (6) verre E; (7) hybride Verre E / aramide balancé; (8) hybride carbone/polypropylène haute densité balancé; (9) carbone; (10) hybride carbone/aramide balancé; (11) verre R haute résistance; (12) Aramide.

Cette conclusion sur le fait que l'aramide performe moins bien que les autres fibres étudiées va à l'encontre de la croyance générale dans le milieu des composites, même si elle est en accord avec certains résultats de la littérature. Cependant, il serait utile de vérifier l'évolution de ses performances à différentes énergies d'impact et vitesses d'impact. En effet, les matériaux réagissent différemment en fonction du type de contrainte auxquelles ils sont soumis. Il est donc possible que l'aramide ait une bonne résistance aux impacts à haute vitesse et/ou en balistique.

Quant à l'effet de l'armure, la structure tridimensionnelle (NCS) résiste beaucoup plus à l'impact que les autres armures. Par contre, il ne semble pas y avoir de différence significative entre les autres armures étudiées. Cette observation peut être causée par le manque d'uniformité de la qualité des échantillons fabriqués. Il serait donc intéressant de vérifier cette conclusion élaborant une méthode plus rigoureuse pour s'assurer que la qualité des échantillons est semblable. Un élément important qui mérite aussi d'être approfondi est que les résultats avec les tissus hybrides ont démontré que le sergé a des meilleurs résultats que le taffetas à l'impact. Dans le même ordre d'idée, l'étude de l'influence de l'armure avec des tissus hybrides est également suggérée.

Finalement, il a été montré que la masse surfacique et le volume de fibre des tissus influencent peu la résistance à l'impact.

Dans cette étude, les matériaux ont été comparés en fonction de leur résistance à l'impact pour une épaisseur de 3 mm. Il serait intéressant de pousser plus loin l'étude de l'influence de l'épaisseur pour les différents types de matériau : verre E, verre S2, verre R haute performance, aramide, basalte et le carbone. Ceci permettrait de mieux comprendre leurs comportements respectifs et de déterminer si certains matériaux sont plus performants à faible épaisseur ou à grande épaisseur.

Les résines d'époxy prés imprégnés de Nanoledge combinées à la fabrication avec une presse chauffante et les renforts à résine intégrée twintex donnent de meilleurs résultats à l'impact que les laminés infusés au vinylester. La présence de nanotubes de carbone dans la résine améliore la résistance à l'impact des laminés. Le twintex s'est avéré être le matériau le plus résistant à l'impact. Ces matériaux présentent un avenir nouveau pour les matériaux composites résistant à l'impact. Ils montrent aussi que le type de résine et la méthode de fabrication peuvent améliorer la résistance à l'impact des matériaux composites.

De manière générale, cette étude a donné de nouveaux outils pour la sélection des renforts tissés pour la fabrication de composites destinés à des sollicitations en impact. Elle a aussi vérifié certains paramètres majeurs pour l'obtention de matériaux offrant de meilleures performances. Il ne s'agit cependant que d'une première étape qui laisse la porte ouverte à une analyse plus complète des différents aspects mis en évidence.

ANNEXE I

ANALYSE VISUELLE DE LA RÉSISTANCE À L'IMPACT

TG06P 17 plis	• Épaisseur moyenne : 2,95 mm • Très légère délamination circulaire entre les plis • Dommages localisés à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,31 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,03 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
TG09P 13 plis	• Épaisseur moyenne : 2,93 mm • Très légère délamination circulaire entre les plis • Dommages localisés à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,26 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,94 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
TG09T 13 plis	• Épaisseur moyenne : 3,17 mm • Très légère délamination circulaire entre les plis • Dommages localisés à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,26 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,94 mm • Déformation de forme losange (mélange de cercle et carré) • Cassure des fibres
TG09N 9 plis	• Épaisseur moyenne : 2,82 mm • Très légère délamination ovale entre les plis • Dommages localisés à la zone d'impact

	• Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,41 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,7294 mm • Déformation de forme losange (cercle et carré) • Cassure des fibres
TG09J 12 plis	• Épaisseur moyenne : 2,92 mm • Très légère délamination circulaire entre les plis • Dommage localisé à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,31 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,58 mm • Déformation de forme circulaire, formation de petites stries de délamination sur la surface du haut • Cassure des fibres
TG24P 4 plis	• Épaisseur moyenne : 2,62 mm • Légère délamination ovale entre les plis • Dommage localisé à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,21 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,98 mm • Déformation de forme irrégulière à tendance ovale • Cassure des fibres
TG31E 3 plis	• Épaisseur moyenne : 2,55 mm • Légère délamination ovale entre les plis, forte délamination sur la surface inférieure • Dommage localisé à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,23 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,97 mm • Déformation de forme irrégulière à tendance circulaire • Cassure des fibres
TG33N 3 plis	• Épaisseur moyenne : 2,57 mm • Délamination en losange entre les plis, délamination sur la surface opposé à l'impact • Dommage localisé à la zone d'impact

	• Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,31 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,51 mm • Déformation de forme irrégulière à tendance losange • Pas de cassure des fibres
TG54N 2 plis	• Épaisseur moyenne : 3,00 mm • Délamination surfacique à la surface opposée à l'impact (strie); • À l'intérieur des plis les dommages sont localisés à la zone d'impact • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,23 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,97 mm • Déformation de forme circulaire • Très légère cassure des fibres
L14003 Verre S2 4 plis	• Épaisseur moyenne : 2,79 mm • Délamination entre les plis • Dommage localisé, mais s'étend légèrement dans le matériau • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,23 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,97 mm • Déformation de forme irrégulière à tendance circulaire • Pas de cassure des fibres
L14025 Verre S2 5 plis	• Épaisseur moyenne : 3,94 mm • Délamination entre les plis majeurs • Dommage étendu • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,23 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,97 mm • Déformation de forme irrégulière à tendance ovale • Pas de cassure des fibres
TA05P 12 plis	• Épaisseur moyenne : 2,87 mm • Peu de délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 1,60 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,92 mm

	• Déformation de forme losange • Cassure des fibres
TA09S 7 plis	• Épaisseur moyenne : 2,86 mm • Minimale délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 1,77 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 2,57 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
TX10P 10 plis	• Épaisseur moyenne : 2,53 mm • Délamination entre les plis, surtout sur la surface impactée, aucune délamination sur la surface opposée • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,28 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,04 mm • Déformation de forme de croix sur la surface impactée et de petit carré sur la surface opposée • Cassure des fibres
TX24P 5 plis	• Épaisseur moyenne : 2,80 mm • Délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,18 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,15 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
UX35N 3 plis	• Épaisseur moyenne : 2,66 mm • Délamination surtout sur la surface opposée à l'impact • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,15 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,19 mm • Déformation de forme irrégulière

	• Cassure des fibres minime
TC06P 14 plis	• Épaisseur moyenne : 2,83 mm • Peu de délamination entre les plis • Dommage étendu • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,31 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,26 mm • Déformation de forme de croix ressemblent à de longues fissures • Cassure des fibres
TC18N 4 plis	• Épaisseur moyenne : 2,62 mm • Forte délamination de la surface opposé à l'impact • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,31 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,36 mm • Déformation en forme de croix sur la surface de l'impact et rectangulaire sur la surface opposée. Séparation de 2-3 fils du reste du composite • Pas de cassure des fibres
TN07T 11 plis	• Épaisseur moyenne : 3,33 mm • Légère délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,60 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,32 mm • Déformation en forme de croix sur la surface de l'impact et losange sur la surface opposée • Cassure des fibres
TH12R 8 plis	• Épaisseur moyenne : 2,77 mm • Délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 1,32 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,07 mm • Déformation de forme irrégulière à tendance losange

	• Cassure des fibres
TR08P 10 plis	• Épaisseur moyenne : 2,77 mm • Délamination entre les plis • Dommage étendu • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,37 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,56 mm • Déformation de forme de 8, inversé à chaque surface • Déformation en forme de peanuts • Cassure des fibres
EOM6T 10 plis	• Épaisseur moyenne : 3,00 mm • Minime délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 2,06 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 3,02 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
EUM7P 10 plis	• Épaisseur moyenne : 2,85 mm • Délamination entre les plis • Dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,46 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,12 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
EUM7T 10 plis	• Épaisseur moyenne : 2,84 mm • Délamination entre les plis en forme de croix à 45° • Dommage étendu • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,37 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,14 mm • Déformation en forme de cercle et délamination en croix • Cassure des fibres
EO06P	• Épaisseur moyenne : 3,13 mm

alterné 10 plis	• Légère délamination entre les plis • Dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 1,54 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 2,53 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
EO06P non-alterné 10 plis	• Épaisseur moyenne : 2,96 mm • Légère délamination entre les plis • Dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,75 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,30 mm • Déformation de forme losange • Cassure des fibres
TG09P/ Époxy	• Épaisseur moyenne : 2,52 mm • Légère délamination entre les plis • Dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,42 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,80 mm • Déformation de forme circulaire • Cassure des fibres
TG09P/ Époxy nano chargé	• Épaisseur moyenne : 2,55 mm • Peu de délamination entre les plis • Dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,36 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,52 mm • Déformation de forme circulaire et petites stries irrégulières • Cassure des fibres
TC06P/ Époxy	• Épaisseur moyenne : 2,56 mm • Pas de délamination entre les plis • Dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 1,24 mm

	• Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 2,21 mm • Déformation de forme circulaire • Cassure des fibres
TC06P/ Époxy nano chargé	• Épaisseur moyenne : 2,60 mm • Pas de délamination entre les plis • Dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 0,95 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 1,69 mm • Déformation de forme circulaire • Cassure des fibres
TA05P/Époxy	• Épaisseur moyenne : 2,52 mm • Pas de délamination entre les plis • Dommages locaux, perforation complète • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 4,95 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 5,07 mm • Déformation de forme circulaire • Cassure des fibres
TA05P/Époxy nano chargé	• Épaisseur moyenne : 2,49 mm • Pas de délamination entre les plis • Dommages locaux, perforation complète • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : 3,80 mm • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 4,43 mm • Déformation de forme circulaire • Cassure des fibres
Twintex sous vide	• Épaisseur moyenne : 3,23 mm • Pas de délamination entre les plis • Très peu de dommages locaux • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : non mesurable, la surface du laminé n'est pas suffisamment uniforme pour mesurer la déformation; • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,59 mm

	• Dommage très petit de forme circulaire • Légère cassure des fibres à la surface opposée
Twintex rouleau chauffant	• Épaisseur moyenne : 3,35 mm • Pas de délamination entre les plis • Très peu de dommage local • Profondeur moyenne de la déformation (pénétration) : non mesurable • Extrusion moyenne de la déformation (extrusion) : 0,42 mm • Dommage très petit de forme circulaire • Légère cassure des fibres sur la surface opposée

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASM Handbooks Online, « Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation, Impact Toughness Testing, Charpy Impact Testing ». Powered by Granta Design. En ligne. Vol. 8. <<http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>>. Consulté le 7 mai 2008.
- ASM Handbooks Online, « Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation, Impact Toughness Testing, Other impact tests ». Powered by Granta Design. En ligne. Vol. 8. <<http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp>>. Consulté le 7 mai 2008.
- ASTM international. Revision 2002. « Standard Test Method for High Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors ». ASTM D3763-02, ASTM International, West Conohocken, p. 180-189
- Bazergui, André, Thang Bui-Quoc, André Biron, Georges McIntyre et Charles Laberge. 1987. Résistance des matériaux : édition corrigée. Montréal : École Polytechnique de Montréal, 477 p.
- Cantwell, W.J., Morton, J. 1985. « Detection of impact damage in CFRP laminates ». Composite structures, vol. 3, n°3-4. p. 241-257.
- Cantwell, W.J., Morton, J. 1991. «The impact resistance of a composite materials-a review ». Composites, vol. 22, n°5, p. 347-362.
- Choi, Hyung Y., Chang Fu-Kuo. 1992. « A model for predicting damage in graphite/epoxy laminated composites resulting from low-velocity point impact ». Journal of Composite Materials, 26. p. 2134-2169.
- Curtis, P.T., S.M. Bishop. 1984. « An assessment of the potential of woven carbone fibre-reinforced plastics for high performance applications ». Composites, vol. 15. p. 259-265.
- Davies, G.A.O., P. Robinson. 1992. « Predicting Failure by Debonding/Delamination ». Agard, Debonding/Delamination of Composites, 28p.
- Devore, Jay L. 2004. Probability and statistics: 6th edition. Toronto: Brooks/Cole. 795 p.
- Dorey, G. 1995. « Impact damage prediction in carbon composite structures ». International Journal of Impact Engineering, vol. 16, n°1. p. 149-170.
- Fiber materials inc., 2-D woven structures. <<http://www.fibermaterialsinc.com/2Dws.htm>>, consulté le 13 septembre 09

- Gibson, Ronald F. 1992. « Damping characteristics of composite materials and structures ». *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 1, n°1. p. 11 -20.
- Hong, S., D. Lui. 1989. « On the relationship between impact energy and délamination area ». *Experimental mechanics*, vol. 29, n°2. p. 115-120.
- Jackson, Wade C., C.C. Jr. Poe. 1992. « The use of impact force as a scale parameter for impact response of composite laminates ». *Nasa technical memorandum 104189*. p. 1 à 13.
- Kakarala, S.N., J.L. Roche. 1987. « Experimental Comparison of Several Impact Test Methods ». *American Society for testing and Materials, ASTM STP 936: Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials*, p. 144-162.
- Kessler, Sandra L., G.C. Adams, Stephen B. Driscoll et Donald R. Ireland. 1987. « Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials ». *American Society for testing and Materials, ASTM STP 936*, 382 pages.
- Lagace, Paula, James E. Williamson, P.H. Wilson Tsang, Edward Wolf et Stephen Thomas. 1993. « A Preliminary Proposition for a Test Method to Measure (Impact) Damage Resistance ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 12. P.584-601.
- Lagace, Paula, K.F. Ryan et M.J. Graves. 1991. « Effect of Damage on the Impact Response of Composite Laminates ». *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conferences*, 32nd, Baltimore, MD, United States. p. 1137-1143.
- Liu, Dahsin, Lawrence Malvern. 1987. « Matrix Cracking in Impacted Glass/Epoxy Plates ». *Journal of Composite Materials*, vol.21. p. 594-609.
- Lui, Dashin, Basavaraju B. Raju et Xinglai Dang. 1998. « Size Effects on Impact Response of Composite Laminates ». *International Journal Impact Engineering*, vol. 21, n°10. p. 837-854.
- Morais, W.A. de, S.N.Monteiro et J.R.M. d'Alemlida. 2005. « Effet of the Laminate Thickness on the Composite Strength to Repeated Low Energy Impacts ». *Composite Structures*, vol. 70. p. 223-228.
- Norman, J.C. 1975. « Damage Resistance of High Modulus Aramid Fiber Composites in Aircraft Applications ». *Society of automotive engineers: Business Aircraft Meeting*, 750532. 10 p.

- Rohchoon, Park, Jang Jyongsik. 2001. « Impact behavior of aramid fiber / glass fiber hybrid composite : Evaluation of four-layer hybrid composites ». *Journal of Materials Science*, vol. 36. p. 2359-2367.
- Rydin, R.W., V.M. Karbhari. 1995. « Inelastic Energy Curves – A Tool for Investigation of Low Velocity Impact Resistance ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol.14. P. 1175-1198.
- Richardson, M.O.W., M.J. Wisheart. 1996. « Review of low-velocity impact properties of composite materials ». *Composite Part A*, 27A, p.1123-1131.
- Ruiz, Eduardo. 2008. « Overview of composite manufacturing processes » [Notes de cours MEC6318 Fabrication des composites par injection]. École Polytechnique de Montréal et CREPEC (center for applied research on polymers and composites). 92 pages.
- Sabit, Adanur. 1995. *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*. Lancaster: Technomic Publishing Company, Inc, 832 pages.
- Sjöblom, Peter O., Timothy J. Hartness. 1988. « On low-velocity Impact Testing of Composite Materials ». *Journal of composite materials*, vol. 22, p.30-52.
- Talreja, R. 1987. « Fatigue of composite materials: Damage mechanisms and fatigue-life diagrams ». *Fatigue of composite materials*, Technomic publishing company, Lancaster, 25-40.
- Trudel-Boucher, David. 2000. « Impact à faible vitesse sur un composite polypropylène/fibre de verre ». *Mémoire de doctorat en génie mécanique*, Montréal, Université de Montréal, École de polytechnique de Montréal, 105 p.
- Warren Rydin, Richard. 1996. « Using the drop weight impact tower to assess impact resistance of FRP composite plates ». *Thèse de doctorat en science des matériaux*, University of Delaware, 335 p.
- Weiss A. Neil, Matthew J. Hassett. 1991. *Introductory Statistics*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 834 p.
- Zhou, G. 1995. « Prediction of impact damage thresholds of glass fibre reinforced laminates ». *Composite structure*, 31, p. 185-193