

Étude de la réponse dynamique aux impacts à basse vitesse et la progression des dommages dans les pipes en matériaux composites

A. Maziz ^{a,b}, M. Tarfaoui ^a, S. Rechak ^b

(a) ENSTA Bretagne, CNRS FRE 3744, IRDL, F-29200 Brest, France.

(b) Laboratoire GMD, ENP, El -Harrach, Alger, Algérie

Auteur correspondant. E-mail address: ammar.maziz@ensta-bretagne.org

Résumé

Les structures tubulaires en matériaux composites peuvent être exposées, à des charges d'impact et aux indentations de diverses causes, que ce soit en service ou durant la manutention, ce qui peut causer des dommages invisibles, et qui engendre une fissuration matricielle, et un délaminage local, qui sont souvent difficiles à détecter. Dans ce travail, les capacités prédictives de simulation des dommages progressifs dans les structures en matériaux composites ont été étudiées, un modèle par éléments volumiques a été développé en formant une sous-routine établie par l'utilisateur (VUMAT), et en l'exécutant dans un code de calcul ABAQUS, avec les critères de Hashin 1980, pour prédire les dommages dans les pipes en matériaux composites sous faible charge d'impact. L'initiation et l'évolution des dommages consiste à la préparation du modèle, la récupération des historiques des forces de contact et les déplacements de l'impacteur, afin de mettre en évidence le suivi des variables d'endommagements. Les dommages observés à faible énergie d'impact sont principalement relatifs à la fissuration matricielle, et la capacité d'absorption d'énergie dans la structure, devient importante et accrue, avec l'augmentation d'énergie d'impact. Les résultats montrent que Le modèle du pli implémenté avec le critère tridimensionnel de Hashin 1980 est capable de simuler les événements d'impact à basse vitesse sur les tubes composites à pleine échelle

Mots-clés : Structure composite tubulaire ; Impact à faible vitesse ; Comportement mécanique ; Formation des dommages ; Analyse par éléments finis (FEA) ,VUMAT

1. Introduction

Les tubes en matériaux composites deviennent de plus en plus attractifs, due à leurs propriétés anticorrosives, la durabilité et le rapport élevé de la résistance et le poids. L'utilisation des pipes en (GFRP) a augmenté dans diverses industries, telles que, la marine, le traitement chimique et la tuyauterie sous pression. Cependant, ces matériaux sont sensibles à la dégradation des performances mécaniques, et qui mène à la réduction de l'intégrité structurelle, et aux fuites de fluides, dues à des chocs accidentels, que ce soit en service ou pendant la manutention. Les impacts à faible vitesse peuvent produire une indentation et un délaminage local qui sont souvent difficiles à détecter et peuvent contribuer à une rupture durant le service. Ceci met en évidence la nécessité d'une caractérisation complète du

comportement des pipes GFRE dans des conditions de charge dynamique, en évaluant la gravité de ces défaillances, et leur effet sur les propriétés mécaniques. L'effet de l'impact sur les structures à enroulements filaire n'est pas encore bien abordé, et encore plus, sa simulation numérique est extrêmement compliquée. Une première étude numérique a été menée par Changliang et al [1], où un modèle 3D était développé pour l'évaluation des dommages induits par l'impact sur un navire en matériaux composites à revêtement métallique, des analyses paramétriques, variant l'énergie incidente et la pression interne, ont été effectuées. La fissuration de la matrice et le délaminage ont été évalués à l'aide des critères de Chang et Chang [2]. Même si les résultats concordaient avec le comportement physique, l'exactitude du modèle n'a pas été vérifiée par rapport aux données expérimentales. Gning et al. [3] ont étudié l'endommagement des cylindres en verre E / époxy, de 55 mm de diamètre intérieur et de 6 mm d'épaisseur, composés de 20 plis avec des orientations de $\pm 55^\circ$. Différents niveaux d'énergie (jusqu'à 45 J) ont été pris en compte avec des charges statique et dynamiques. À faible énergie d'impact, une petite empreinte locale est apparue au niveau de la zone de contact entre l'impacteur et la cible dans les plis extérieurs d'environ 0,3 mm d'épaisseur. Puis, avec l'augmentation de l'énergie d'impact, les dommages sont apparus au seuil de l'énergie, sous forme des délaminations, qui se propageait à travers l'épaisseur de la structure. Li et al. [4], [5] ont étudié les effets de divers paramètres tels que la taille de la plaque, les conditions aux limites, la vitesse d'impact et la masse de l'impacteur sur les dommages induits par l'impact. Ils ont constaté que, la modélisation numérique peut apparaître les caractéristiques du phénomène d'impact et prévoir divers dommages. Tarfaoui et al [6],[7], ont mené un campagne d'essais, arrivant à une conclusion que les dommages d'impact réduisent considérablement la pression d'implosion. De plus, le même auteur [8] a pu prédire les courbes d'impact avec une bonne précision, en utilisant un modèle d'éléments finis 2D avec une analyse d'endommagement (basée sur le critère de rupture de Hashin [9]).

Les résultats rapportés précédemment montrent qu'il y a des incertitudes sur le comportement des pipes, quand elle est soumise à des charges d'impact, et jusqu'à présent y a quelques investigations numériques sur l'endommagement des pipes en matériaux composites, notamment avec les éléments 3D. pour cela, un modèle avec des éléments volumiques a été utilisé pour prédire et mieux comprendre les événements d'impact. Un modèle d'endommagement est implémenté sous forme d'une routine (Vumat) sous Abaqus Explicit, basé sur un modèle intra-laminaires (critère du Hashin [9]).

2. Description du modèle

Des modèles de ruptures et des dommages progressive ont été adoptés dans les simulations par éléments finis pour modéliser mieux l'apparition des dommages et leur propagation dans les matériaux composites sur la base du concept de la mécanique continue de l'endommagement (CDM). Le comportement du matériau composite se caractérise en deux phases substantielles, à savoir la zone élastique et la zone de rupture. La zone élastique, où le matériau lors du déchargement reprendre ses dimensions initiales sans déformation, ce phénomène due à l'énergie élastique qui dépend du type et de nature du matériau. D'autre part, la deuxième

phase représente la région de rupture suivie quand, le matériau satisfait le début des dommages, et un chargement supplémentaire entraîne une dégradation des propriétés mécaniques de la structure, par la suite, une réduction de sa rigidité provoquée par l'accumulation des fissures. La relation entre la contrainte effective ($\hat{\sigma}$) et la contrainte nominale (σ) peut être définie de la manière suivante:

$$\hat{\sigma} = d \cdot \sigma \quad (1)$$

Où d est l'opérateur des dommages.

Ainsi la contrainte avec la présence des dommages est donnée comme suite :

$$\sigma_{i,j} = C_{i,j} (d) \cdot \varepsilon_{i,j} \quad (2)$$

Où C représente la matrice de rigidité orthotrope non endommagée. Cette matrice prend la forme suivante :

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matrice de rigidité des dommages s'écrit sous cette forme [12] :

$$\begin{aligned} dC_{11} &= (1 - d_f)E_1(1 - \nu_{23}^2)\Gamma, \\ dC_{33} &= (1 - d_f)(1 - d_m)E_3(1 - \nu_{21}^2)\Gamma \\ dC_{23} &= (1 - d_f)(1 - d_m)E_2(\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31})\Gamma, \\ dC_{44} &= (1 - d_f)(1 - d_{mt}s_{mt})E_1(1 - d_{mc}s_{mc})G_{12}, \\ dC_{66} &= (1 - d_f)(1 - d_{mt}s_{mt})E_1(1 - d_{mc}s_{mc})G_{31}, \\ dC_{22} &= (1 - d_f)(1 - d_m)E_2(1 - \nu_{13}^2)\Gamma \\ dC_{12} &= (1 - d_f)(1 - d_m)E_1(\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23})\Gamma \\ dC_{31} &= (1 - d_f)(1 - d_m)E_1(\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32})\Gamma \\ dC_{55} &= (1 - d_f)(1 - d_{mt}s_{mt})E_1(1 - d_{mc}s_{mc})G_{23} \quad (4) \end{aligned}$$

Où les variables d'endommagement et Γ sont données par l'équation 5 [13]:

$$d_f = 1 - (1 - d_{ft})(1 - d_{fc})$$

$$d_m = 1 - (1 - d_{mt})(1 - d_{mc})$$

$$\Gamma = 1/(1 - v_{12}^2 - v_{23}^2 - v_{13}^2 - 2 v_{12}v_{23}v_{13})$$

Ou d_f , d_m et d_s sont les variables d'endommagement pour les modes de rupture de la fibre, rupture de la matrice et du cisaillement, respectivement

2-2 Critère de rupture intra-laminaire

L'amorçage des dommages se produit lorsque la contrainte appliquée atteint la résistance ultime du stratifié. Explicitement, l'interface s'endommage en raison d'une différence entre le module de compression transversale des fibres et le module matriciel, qui représente la cause principale de l'apparition des dommages. Une routine VUMAT a été codée en langage FORTRAN et exécutée par le logiciel d'éléments finis Aba pour caractériser les dommages intra-laminaires. L'apparition des dommages était basée sur les critères de Hashin 1980 sous forme tridimensionnelle pour la fibre et la matrice. Ces critères ont été largement appliqués pour prédire l'apparition de dommages dans les composites unidirectionnels [9,11]. Dans la présente étude, ces critères ont été proposés à la fois pour les fibres et la matrice (tableau 1)

2-3 Evolution des dommages

Comme indiqué précédemment, une fois les critères de rupture initiaux satisfaits, une charge supplémentaire entraîne une régression de la rigidité du matériau, par conséquent, les propriétés du matériau ont été modifiées selon un modèle de dégradation des propriétés. Sur la base de la relation entre la contrainte effective et le déplacement, l'évolution des dommages peut être constituée. Par conséquent, les variables d'endommagements pour chaque mode dans les fibres et les matrices sont exprimées sous la forme du déplacement :

$$d_i = \frac{\delta_{i,eq}^f (\delta_{i,eq} - \delta_{i,eq}^0)}{\delta_{i,eq} (\delta_{i,eq}^f - \delta_{i,eq}^0)} \quad , \quad \delta_{i,eq}^0 \leq \delta_{i,eq} \leq \delta_{i,eq}^f \quad (4)$$

Ou d_i est la variable d'endommagement définie pour chaque mode de dommage. Les variables δ_{eq}^0 , δ_{eq} et $\delta_{i,eq}^f$ représentent respectivement le déplacement initial lorsque le critère de rupture est atteint le déplacement équivalent et le déplacement équivalent en cas de défaillance. Ces derniers peuvent être calculés à partir de l'énergie de rupture correspondant à chaque variable d'endommagement comme suit :

$$G_i = \int_{\delta_{i,eq}^0}^{\delta_{i,eq}^f} \sigma \, d\varepsilon = \frac{1}{2} (\delta_{i,eq}^f - \delta_{i,eq}^0) \sigma_{i,eq}^0$$

$$\delta_{i,eq}^f - \delta_{i,eq}^0 = \frac{2G_i}{\sigma_{i,eq}^0} \quad (5)$$

$$\delta_{i,eq}^0 = \delta_{i,eq} / \sqrt{f_i}$$

$$\sigma_{i,eq}^0 = \sigma_{i,eq} / \sqrt{f_i}$$

$\sigma_{i,eq}$, $\sigma_{i,eq}^0$, f_i et G_i sont respectivement la contrainte équivalente, la contrainte initiale équivalente, la défaillance initiale et l'énergie de rupture correspondant à chaque mode. Ces variables sont calculées pour le point d'intégration de chaque élément, pour d'écrire la dégradation de la rigidité du matériau pour chaque mode d'endommagement, tableau 2. Le déplacement équivalent et la contrainte équivalente sont déterminés pour chaque itération jusqu'à la rupture complète ($d_f = 1$) de l'élément se produit. A ce stade, l'élément se supprime du modèle et ses contraintes deviennent nulles. Ainsi, la rigidité de l'élément est supprimée de la rigidité du stratifié. [11].

Fibre en tension ($\sigma_{11} \geq 0$)	$f_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 \geq 1$
Fibre en compression ($\sigma_{11} < 0$)	$f_{fc} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \geq 1$
Matrice en tension ($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$)	$f_{mt} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_t^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$
Matrice en compression ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)	$f_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left(\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1 \right) (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1$

Table 1. Critère de Hashin 1980[14].

Mode de rupture	$\delta_{i,eq}$	$\sigma_{i,eq}$
Mode d'endommagement Fibre en tension	$L_c \sqrt{(\varepsilon_{11})^2 + (\varepsilon_{12})^2 + (\varepsilon_{31})^2}$	$L_c(\sigma_{11}\varepsilon_{11} + \sigma_{12}\varepsilon_{12} + \sigma_{31}\varepsilon_{31})/\delta_{1,eq}$
Mode d'endommagement Fibre en compression	$L_c \sqrt{(-\varepsilon_{11} - \frac{\langle \varepsilon_{33} \rangle \cdot E_{33}}{E_{11}})^2}$	$L_c(E_{11}(-\varepsilon_{11} - \frac{\langle \varepsilon_{33} \rangle \cdot E_{33}}{E_{11}}))/\delta_{2,eq}$
Mode d'endommagement Matrice en tension	$L_c \sqrt{(\varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{12})^2 + (\varepsilon_{23})^2}$	$L_c(\sigma_{22}\varepsilon_{22} + \sigma_{12}\varepsilon_{12} + \sigma_{23}\varepsilon_{23})/\delta_{3,eq}$
Mode d'endommagement Matrice en compression	$L_c \sqrt{(-\varepsilon_{22} - \frac{\langle \varepsilon_{33} \rangle \cdot E_{33}}{E_{22}})^2 + (\varepsilon_{12})^2}$	$L_c(E_{22}(-\varepsilon_{22} - \frac{\langle \varepsilon_{33} \rangle \cdot E_{33}}{E_{22}} + \sigma_{12}\varepsilon_{12}))/\delta_{2,eq}$

Table 2. Déplacement équivalent et la contrainte équivalente pour chaque mode [16].

Ou $\langle \varepsilon_{ii} \rangle$ est l'opérateur de Macaulay et sa formule comme suit as:

$$\langle \varepsilon_{ii} \rangle = \frac{\varepsilon_{ii} + |\varepsilon_{ii}|}{2} \quad (6)$$

L_c est la longueur caractéristique, qui est définie pour surmonter la localisation de la déformation lorsque le matériau présente un comportement d'adoucissement des déformations [17], ce dernier est intégrée dans le modèle pour rendre l'énergie absorbée indépendante de la sensibilité du tissu. Dans le cas d'un élément solide, la longueur caractéristique est obtenue par la racine cubique de la zone associée au point du matériau

Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont issus directement de l'investigation de Tarfaoui et al [8]. Les tubes utilisés dans cette étude sont fabriqués par le procédé de l'enroulement filamentaire et se compose de 6 plis enroulé avec une orientation de $\pm 55^\circ$. La géométrie des échantillons est indiquée dans le tableau 3 et les propriétés de composite utilisés sont présentées dans le tableau 4.

Rayon interne, R_i (mm)	Rayon externe, R_e (mm)	Longueur de tube, L (mm)	Orientations
36	38.4	300	$[\pm 55]_6$

Table 3. Géométrie de Pipe

Les propriétés	valeurs
Les propriétés élastiques	$E_1=49.5\text{GPa}$, $E_2=E_3=15.9\text{GPa}$, $G_{12} = G_{23} =5.6\text{GPa}$, $G_{13}=5\text{ GPa}$, $\nu_{12}=\nu_{13} =0.26$, $\nu_{23} =0.34$.
Les limites d'élasticités (MPa)	$X_t=1470$, $X_c=888$, $Y_t=Z_t=66$, $Y_c=Z_c=99$ $S_{12}=S_{13}=S_{23} = 66$
Densités (kg/m^3)	$\rho= 1960\text{ (kg/m}^3)$

Table 4. Les propriétés mécaniques de la structure

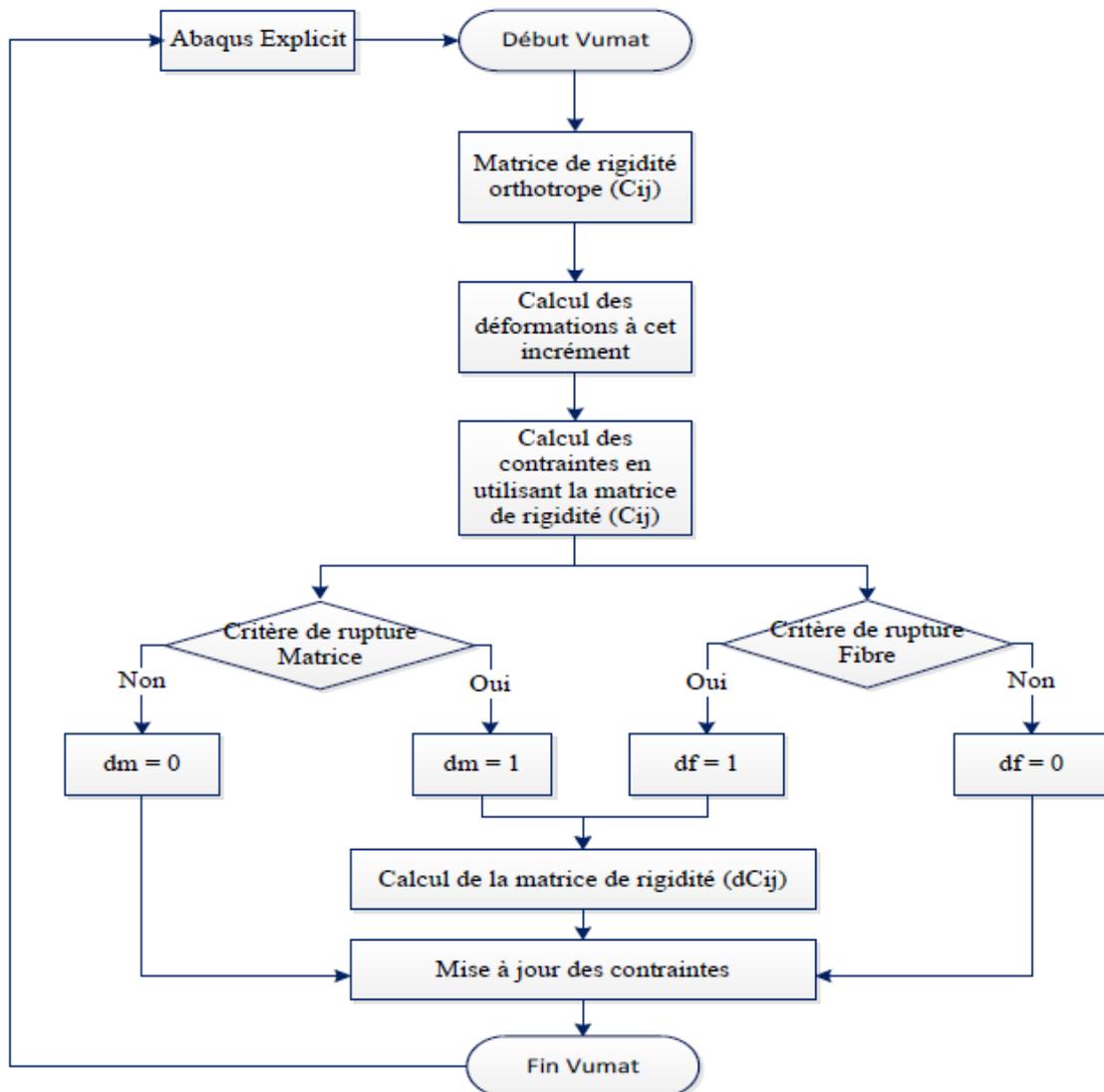


Figure 1: Implémentation numérique du modèle d'endommagement (Vumat) sous Abaqus

2.5. Structure, conditions aux limites

À l'aide de la configuration illustrée dans la (Figure 2 et 3). Le modèle était développé, pour simuler des tests d'impact, d'analyser le comportement dynamique et de suivre la cinétique de l'endommagement. Les pipes en composites sont soumis à des charges

critiques dues à la densité des fluides et aux impacts accidentels durant leur fonctionnement. Le dimensionnement commence par la mise en œuvre d'une conception offrant un compromis entre le poids et les coûts. On a choisi dans notre étude des conditions aux limites, qu'il reflète aux tests expérimentaux, les pipes considérées ont une longueur de 300 mm, un diamètre interne de 72 mm et une épaisseur de 2,4 mm et ont été placés et fixés sur un guide en forme de V, serré dans les deux bords, et connecté au support avec un contact linéaire, Figure 2. Pour une bonne conception du système, des simulations étant lancées avec différentes vitesses d'impact. Les pipes composites ont été exposés à une forme d'impacteur hémisphérique de 24 mm de diamètre.

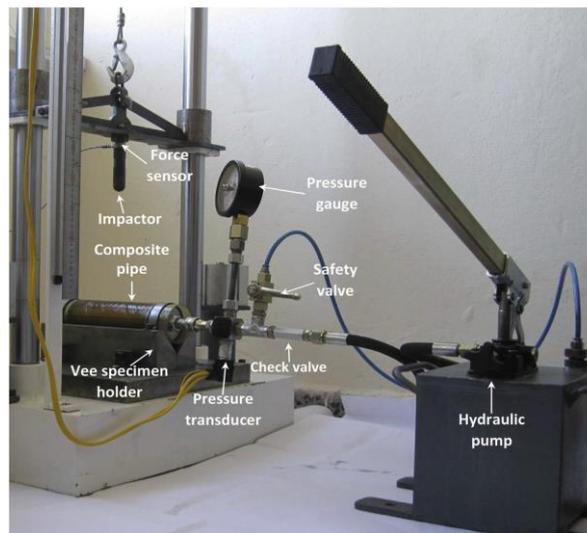


Figure 2 : Photographie du montage du dispositif d'impact (Gemi et al 2018 [14])

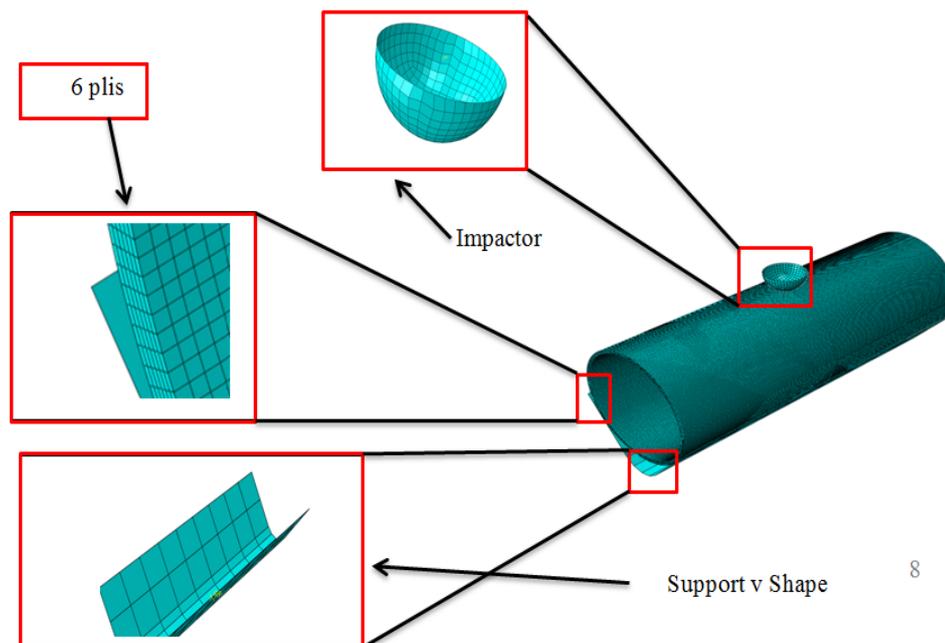


Figure 3: Maillages du pipe et de l'impacteur

Les mailles générées sont constituées d'éléments volumiques linéaires de type C3D8R pour la cible, et des éléments rigides quadrilatéraux de type R3D4 pour l'impacteur et le support de forme V. Les résultats des calculs successifs semblent converger à partir d'une taille de 1 mm de longueur sans qu'elle ne consomme trop de temps de calcul.

3-Résultats et discussion :

3-1-l'historique de Force du contact-temps et les déplacements de l'impacteur.

La force de contact augmente avec le contact de la cible, et atteint une valeur maximale, correspondant au niveau d'énergie de 15J. Au début, la courbe est linéaire, par suite elle devient non linéaire en raison de l'initiation des dommages, et c'est la même allure observée dans l'investigation de Perilo et al [13], des fluctuations sont observées et certainement présente l'indicateur de la formation de dommages. Il est clair que la variation des forces de contact sa diffère pour chaque vitesse d'impact et montre la même tendance, et lorsque l'énergie d'impact augmente, la force de contact et les déplacements d'impacteur augmentent.

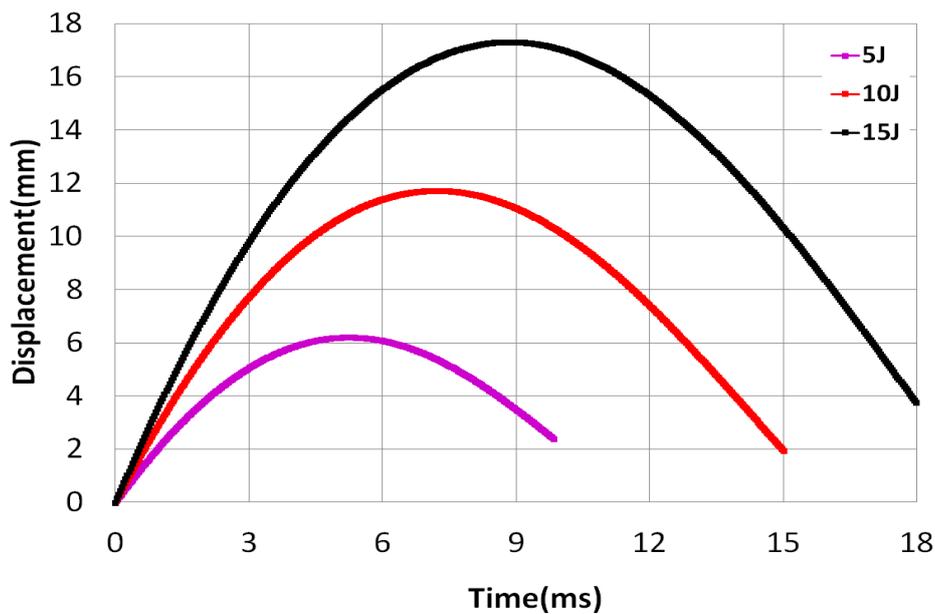


Figure 4 : Déplacement de l'impacteur à différente énergie d'impact

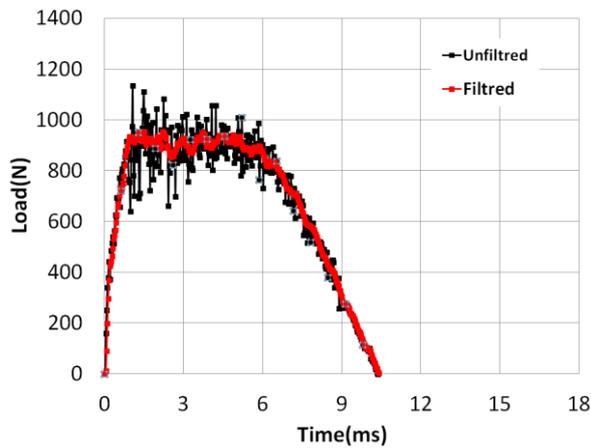
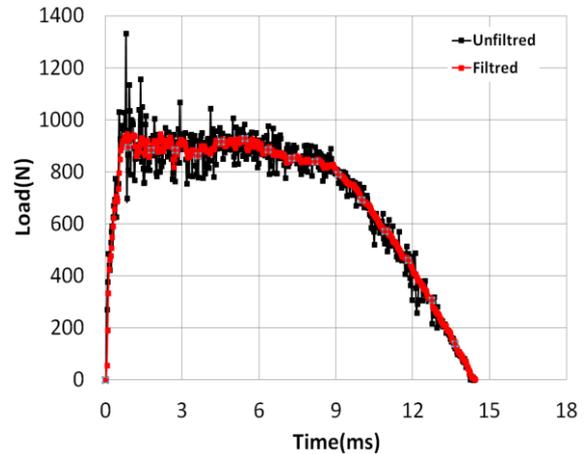
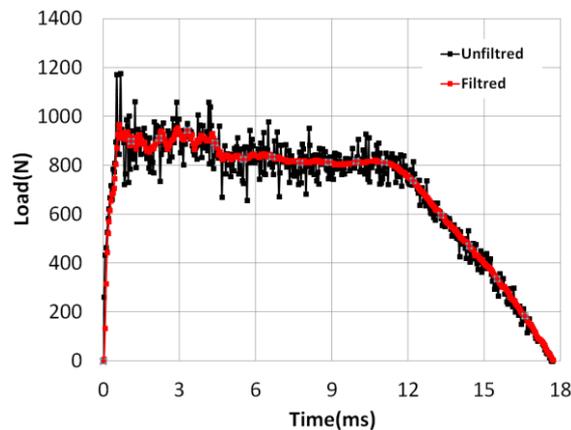
(a) Force de contact , $v=2.236$ m/s(b) Force de contact , $v=3.162$ m/s(c) Force de contact , $v=3.872$ m/s

Figure 5 : Historiques des Force de contact

D'après les résultats. Nous pouvons voir qu'il y a une apparence de l'endommagement, et la progression est régie par la dissipation de l'énergie de fracture dans la modélisation de CDM. Par conséquent, la dégradation progressive de la rigidité de l'élément endommagé se poursuit jusqu'à la rupture complète. Les dommages observés sont principalement relatifs à la fissuration matricielle.

Une visualisation des dommages matriciels, prévus pour plusieurs énergies d'impact, est présentée dans la Figure 6. Et montrent que plus l'énergie d'impact augmente, plus l'état d'endommagement présente un caractère diffus.

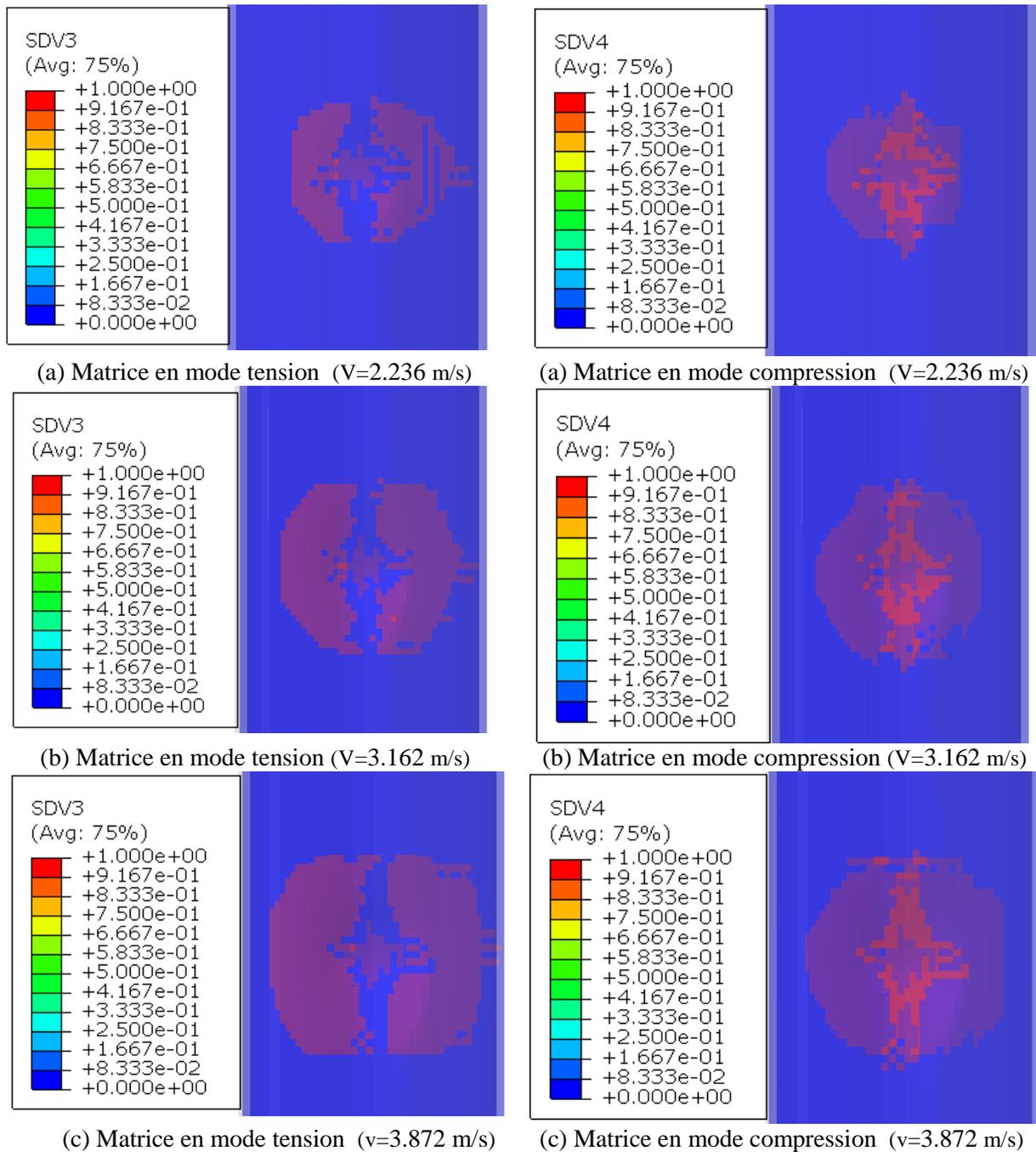


Figure 6: Etat d'endommagement matriciel du calcul d'impact prévu par la loi de Comportement du pli implémenté dans la Vumat

3-2 Capacité d'absorption d'énergie

L'énergie absorbée est l'énergie absorbée par les structures par l'effet de la formation des dommages, et le frottement entre la cible impactées et l'impacteur, les réponses d'énergie internes sont illustrées à la figure 7. Il est conclu que la capacité d'absorption d'énergie des pipes en matériaux composites devient importante et accrue avec la formation des dommages

Par exemple, on observe que l'énergie absorbée dans a une vitesse d'impact de ($v=3.872$ m/s), atteint 9.85 j, tandis que aux autres vitesse $v=3.162$ et 2.236 m/s fournissent environ 6.5j et 3j respectivement. Étant donné que la capacité d'absorption d'énergie est généralement une indication de la taille des dommages dans les matériaux composites, pour cela le suivi de l'évolution de l'énergie absorbé peut nous indiquer le la gravité d'endommagement pour éviter des dégâts.

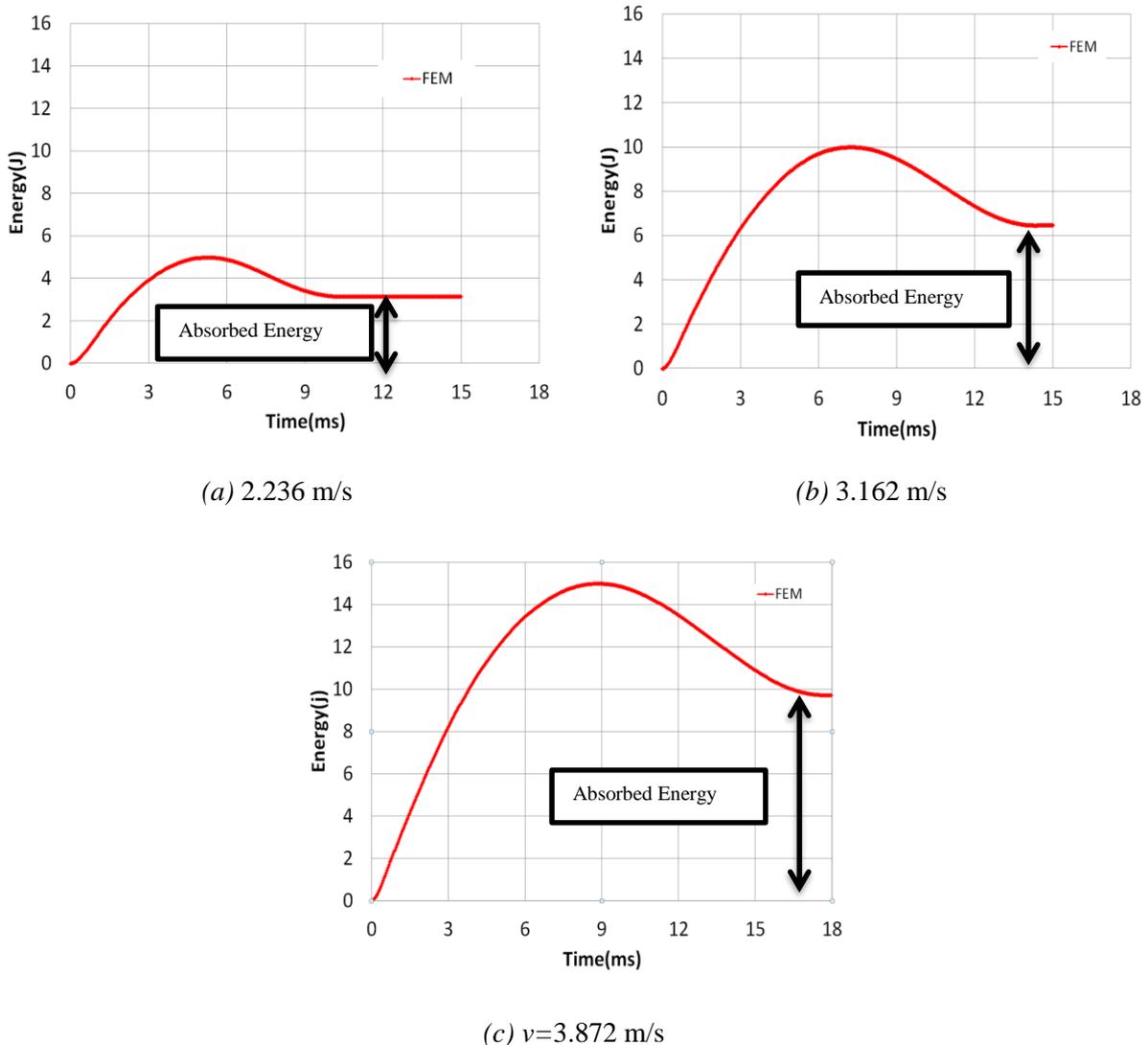


Figure 7: l'allure des énergies absorbées

4-Conclusion

La modélisation numérique des événements d'impact à faible vitesse sur des pipes en matériaux composites verre /époxy sont menées. Les pipes composites ont été soumises à 3 vitesses d'impact de 2.236,3.162, et 3.872 m/s. Les courbes des forces de contact et l'historique des énergies absorbées sont déterminés et analysés pour chaque cas. Les résultats de modèle montrent que la force de contact et le déplacement maximale ont observée lors

d'une vitesse d'impact de 3.872 m/s, et la capacité d'absorption d'énergie devient importante et accrue avec la formation des dommages. Les résultats montrent que Le modèle du pli implémenté avec le critère tridimensionnel de Hashin 1980 qui a été accompli en formant une sous-routine établie par l'utilisateur (VUMAT) est capable de reproduire le comportement et prédire l'intégrité de la structure tubulaire.

References

- [1] Changliang, Z., Mingfa, R., Wei, Z., & Haoran, C. (2006). Delamination prediction of composite filament wound vessel with metal liner under low velocity impact. *Composite structures*, 75(1-4), 387-392.
- [2] Chang, F. K., & Chang, K. Y. (1987). A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of composite materials*, 21(9), 834-855.
- [3] Gning, P. B., Tarfaoui, M., Collombet, F., Riou, L., & Davies, P. (2005). Damage development in thick composite tubes under impact loading and influence on implosion pressure: experimental observations. *Composites Part B: Engineering*, 36(4), 306-318.
- [4] Li, C. F., Hu, N., Yin, Y. J., Sekine, H., & Fukunaga, H. (2002). Low-velocity impact-induced damage of continuous fiber-reinforced composite laminates. Part I. An FEM numerical model. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 33(8), 1055-1062.
- [5] Li, C. F., Hu, N., Cheng, J. G., Fukunaga, H., & Sekine, H. (2002). Low-velocity impact-induced damage of continuous fiber-reinforced composite laminates. Part II. Verification and numerical investigation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(8), 1063-1072.
- [6] Gning, P. B., Tarfaoui, M., Collombet, F., & Davies, P. (2005). Prediction of damage in composite cylinders after impact. *Journal of composite materials*, 39(10), 917-928..
- [7] Tarfaoui, M., Gning, P. B., & Collombet, F. (2007). Residual strength of damaged glass/epoxy tubular structures. *Journal of composite materials*, 41(18), 2165-2182.
- [8] Tarfaoui, M., Gning, P. B., & Hamitouche, L. (2008). Dynamic response and damage modeling of glass/epoxy tubular structures: Numerical investigation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(1), 1-12. [9] Kostopoulos, V., Baltopoulos, A., Karapappas, P., Vavouliotis, A., Paipetis, A.: Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes. *Compos Sci Technol* 70, 553–63 (2010).
- [9] Hashin, Z.: Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics* 31, 223-232 (1980).
- [10] Wang, S., Wu, L., Ma, L.: Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates. *Materials and Design* 31, 118-125 (2010).
- [11] Xin, S.H., Wen, H.M.: A Progressive Damage Model for Fiber Reinforced Plastic Composites Subjected to Impact Loading. *International Journal of Impact Engineering* 75, 40-52 (2015).
- [12] GUO, W., XUE, P., YANG Y. : Nonlinear progressive damage model for composite laminates used for low-velocity impact. *Applied Mathematics and Mechanics* 34, 1145-1154 (2013).

[13] Perillo, G., Vedivik, N. P., & Echtermeyer, A. T. (2015). Numerical and experimental investigation of impact on filament wound glass reinforced epoxy pipe. *Journal of Composite Materials*, 49(6), 723-738.

[14] Gemi, L. (2018). Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure. A comparative study. *Composites Part B: Engineering*, 153, 217-232.