

Étude paramétrique de l'impact d'un panneau pour différentes forme d'impacteur

**Kaouter HAMAMOUSSE^{1*}, AmerSEMMANI¹, NadjiaDEGHOUL¹,
RachidBENZIDANE¹, Zouaoui SEREIR¹**

¹Laboratoire: Structures de Composites et Matériaux Innovants (LSCMI),

Département de Génie Maritime, Faculté de Génie Mécanique Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, BP 1505 El M'naouer, USTO, Oran, Algérie.

*Kaouter HAMAMOUSSE : ha.kawter@outlook.com

Résumé - Dans une étude menée dans le cadre du projet de recherche MONITOR [1], l'impact est identifié comme le mode de chargement le plus critique pour les matériaux composites [2]. En effet, la particularité des matériaux composites est qu'ils peuvent s'endommager intérieurement sans laisser de trace visible du défaut, en particulier lors de « petits chocs ». Cette particularité est d'autant plus grave que l'impact est un phénomène courant [3], allant des configurations basses vitesse et faible énergie aux configurations grande vitesse et haute énergie. Une solution pour limiter ces coûts est le recours à la simulation numérique. Le « Virtual Testing » permettrait en effet de rationaliser les campagnes d'essais en comblant les manques de la matrice d'essais par des simulations numériques. La simulation numérique permettrait également d'établir plus facilement des règles de similitude pour tenir compte des effets d'échelle. L'estimation numérique des performances résiduelles consiste en premier lieu à prévoir par la simulation les dommages créés lors d'un impact, puis d'injecter ces dommages dans un modèle de prévision des performances résiduelles. Dans ce contexte, un modèle numérique a été développé pour étudier la réponse d'une plaque raidie en composite avec la séquence d'empilement [(0/90/0/90/0)_s], à l'impact à faible vitesse. La modélisation numérique a été faite à l'aide du logiciel ANSYS Workbench (AUTODYN). Ce panneau est considéré comme simplement appuyé aux quatre cotés avec une sphère métallique rigide qui vient de l'impacter au milieu. Ce modèle numérique a été validé avec les résultats issus de la littérature. Par la suite, une étude paramétrique a été faite pour montrer l'effet de la forme de l'impacteur, l'épaisseur de la plaque raidie ainsi le type de matériau de construction du panneau. Finalement, le déplacement transversal, l'énergie d'impact, la force de contact ont été représentée en fonction du temps d'impact.

Mots Clés : Panneaux, Matériaux Composite, Impact, Modélisation Numérique.

1. Introduction

Les matériaux composites sont utilisés dans presque tous les aspects des domaines de fabrication industriels et commerciaux des avions, des navires, des véhicules et d'autres structures de haute performance en raison de leur grande rigidité spécifique et leur force, une excellente résistance à la fatigue, une plus grande durabilité par rapport aux structures métalliques, et la capacité d'être adaptés pour des applications spécifiques.

Le comportement des matériaux composites sous l'impact à faible vitesse est devenu une des plus grandes préoccupations au cours de ces dernières décennies, ceci du aux dommages induits par l'impact à faible vitesse, les dommages induits par l'impact à faible vitesse pourrait réduire la résistance de la structure de façon significative en outre les dommages internes ne sont pas

déTECTABLES par l'observation visible. Si les dommages internes résultant d'un choc ne sont pas détectés et réparés dans le temps, la zone de dégâts va continuellement grandir et finalement conduire à un effondrement structurel.

2. Phénomène de l'impact

L'impact peut être défini comme une application brève d'une force impulsive, à un volume limité d'un matériau. Les effets de l'impact et l'analyse du phénomène sont largement connus. La détermination des forces en action et des propriétés du matériau s'avèrent difficiles pour prévoir des solutions à des problèmes particuliers [4]. Les résultats de l'impact peuvent être complètement élastiques avec une partie d'énergie dissipée comme chaleur, son...etc. Alternativement, elles peuvent être une déformation, un dommage permanent, une pénétration complète du projectile ou bien une fragmentation du projectile ou de la cible, ou bien des deux à la fois [5].

Selon Abrate [6], les modèles d'analyses utilisés pour obtenir la réponse de l'impact peuvent être classés en trois catégories: les modèles du bilan énergétique, les modèles de masse-ressort et des modèles complets.

Dans les modèles du bilan énergétique, la dynamique de l'impact est de considérer l'équilibre de l'énergie dans le système et les comportements de structure sont quasi-statiques. Lorsque la structure atteint sa déformation maximale, la vitesse de l'élément de frappe devient nulle et toute l'énergie cinétique initiale est utilisée pour déformer la structure.

Dans les modèles de ressorts de masse, la rigidité linéaire de la structure, la raideur de la membrane et la force de contact sont représentés par des modèles ressort, la masse effective de la structure et l'élément de frappe sont représentées par les modèles de masse ressort. Par conséquent, le système dynamique d'impact peut être simplifié pour un modèle d'un degré de liberté ou de deux degrés de liberté. La rigidité utilisée dans les modèles masse-ressort peut être déterminée à partir de formules théoriques disponibles dans de nombreux manuels, ou numériquement en utilisant la méthode des éléments finis.

Avec un modèle complet, le comportement dynamique de la structure est décrit de façon précise. Habituellement, dans de nombreux cas, la théorie classique de plaque peut être utilisée mais, dans certains cas, des déformations de cisaillement transversales deviennent significatifs et les théories d'ordre supérieur doivent être utilisées.

2.1 Classification de l'impact

Dans l'étude de l'impact des structures, trois régimes d'impact sont distingués :

Impact à une vitesse de l'ordre de 300 m/s, où le projectile pénètre ou perce la cible, tous les dommages sont confinés dans un espace réduit autour du point d'impact et la structure elle-même ne participe pas dans le processus.

Impact à une vitesse comprise dans la plage 50-300 m/s, les ondes de contraintes déclenchées à partir du point d'impact transmettent les charges au reste de la structure, l'analyse dynamique incluant l'action des charges d'inertie et les ondes de contraintes est nécessaire.

Impact à faible vitesse avec réflexion multiple d'ondes, cet impact est souvent assimilé à un impact quasi-statique [7].

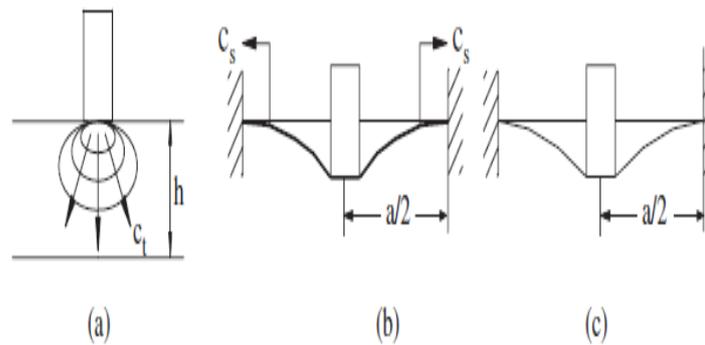


Figure1: Classification d'impact par la vitesse

2.2 Énergie d'impact

Dans l'article de Belingardi et Vadori [8], l'historique de la force de contact est détaillé selon trois cas d'impact : un cas avec rebond de l'impacteur, un cas où l'impacteur est stoppé et un cas où l'impacteur perce la plaque. Ces trois cas correspondent, respectivement, aux segments A-B, B-C et C-D du diagramme du profil énergétique d'impact proposé par Aktaş *et al.* [9] (Figure 2). Ce diagramme représente la part de l'énergie d'impact qui a été absorbée par le spécimen.

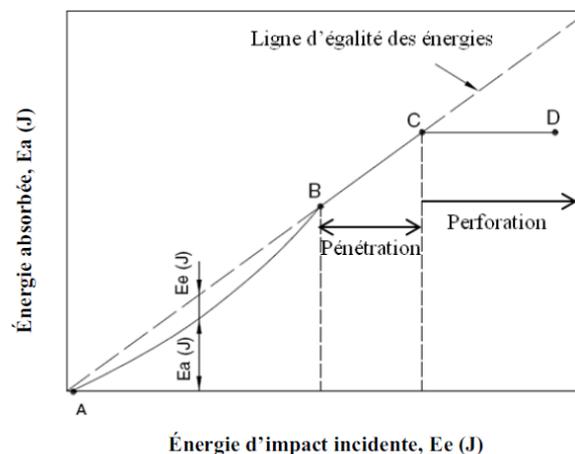


Figure2: Diagramme de profil énergétique des impacts[9].

Dans le cas d'un rebond de l'impacteur, cas de cette étude, celui-ci indente la cible sans qu'il n'y ait de pénétration puis repart dans la direction opposée à celle de l'impact. La déflexion maximale est atteinte lorsque la vitesse de l'impacteur s'annule. La fin du contact a lieu lorsque la force de contact, mesurée sur l'impacteur, devient nulle. L'historique de la force de contact présente deux seuils : un premier où la forme de la courbe est marquée par de brusques oscillations attribuées aux premiers endommagements au sein du matériau et un second caractérisé par une brusque chute de la force, suivie d'une nouvelle augmentation mais selon une pente plus faible. Le second seuil marque le début d'effets significatifs des dommages sur le comportement global de la cible, ce qui lui vaut le nom de seuil d'endommagement. Il est attribué à l'apparition des délaminages [10] [11]. Lorsque l'ensemble de l'énergie d'impact incidente a été fournie au panneau, celle-ci est en partie restituée à l'impacteur pour le renvoyer vers sa position initiale : c'est le phénomène de rebond. La différence entre l'énergie d'impact incidente et l'énergie d'impact restituée constitue l'énergie absorbée par le panneau, principalement sous forme d'endommagement. Cette énergie absorbée correspond à l'aire de la boucle fermée formée par la courbe de la force de contact en fonction du déplacement de l'impacteur.

2.3 Nature de l'impacteur

La classification des impacts en fonction de la vitesse initiale de l'impacteur est la plus couramment employée. Cependant, Olsson préfère l'usage d'un critère en masse pour déterminer la nature de la réponse à un impact [12]. La masse, ainsi que la géométrie et la raideur de l'impacteur sont en effet aussi à prendre en compte. La forme de l'impacteur influe sur le taux de pénétration dans la structure, le pic de force, le temps de contact et la charge seuil de dommage. Dans leurs travaux, Mitrevski *et al.* [13] [14] ont testé l'influence de la forme de l'impacteur sur les réponses d'impact et les dommages induits de plaques composites tissées en fibres de verre et matrice polyester ou en fibres de carbone et matrice époxy.

3. Résultats et discussion

Il est notable que la rigidité des panneaux raidis est affectée de manière significative par la forme et la distribution des raidisseurs. Pour cela, un panneau stratifié raidi avec quatre raidisseurs en Graphite époxy (voir figure 3) est étudiée dans cette section. L'influence des différents paramètres des raidisseurs et impacteur, tels que l'épaisseur de la plaque, la forme de l'impacteur et le matériau de construction du panneau, sur les réponses et les dommages sont à évaluer. En utilisant le logiciel ANSYS (Workbench), une simulation numérique à été réalisée, ou un maillage régulier des éléments de la structure modélisée a été généré (Figure 3). Ensuite, nous avons introduit les conditions aux limites et une vitesse pour l'impacteur de l'ordre de 3m/s. Les caractéristiques mécaniques et géométriques de la bille et du panneau sont données aux tableaux 1 et 2.

Tableau 1 : les propriétés mécaniques de l'impacteur.

| Matériaux | Acier |
|--|---------------------------|
| Contrainte à la rupture [Mpa] | $\sigma_x=360\text{à}540$ |
| Module de Young [Gpa] | $E_x = 210$ |
| Coefficient de Poisson | $\nu=0.3$ |
| Densité du matériau [Kg/m ³] | $\rho=7850$ |

Tableau2 : Les propriétés mécaniques du panneau en composites stratifiés.

| Propriétés élastique [Gpa] | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| $E_{11}=156.5$ | $G_{12}=6.96$ | $\nu_{12}=0.23$ |
| $E_{22}=13.0$ | $G_{13}=6.96$ | $\nu_{13}=0.23$ |
| $E_{33}=13.0$ | $G_{23}=3.45$ | $\nu_{23}=0.4$ |
| Propriétés de résistance [Mpa] | | |
| $\sigma_{12}^f=106.9$ | $\sigma_{13}^f=106.9$ | $\sigma_{23}^f=106.9$ |

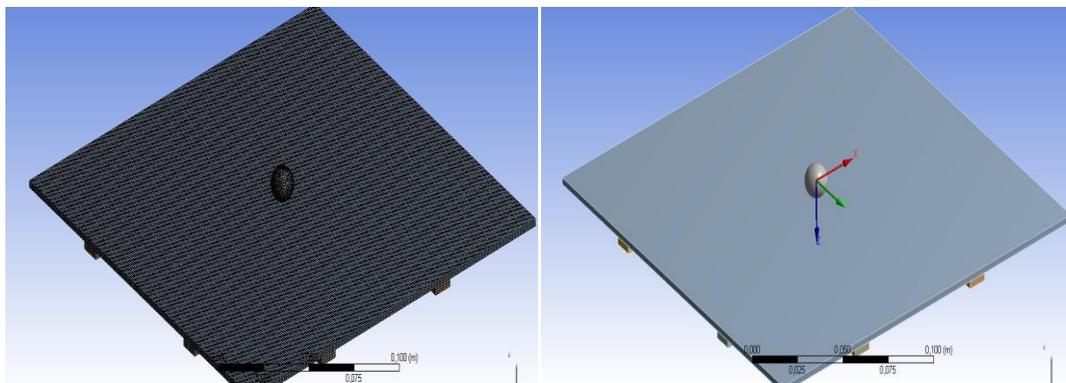


Figure 3 : Model du panneau et maillage

3.1 Validation des résultats

Pour pouvoir vérifier la qualité des résultats de notre modèle, une validation a été faite avec ceux de la littérature [15]. Il s'agit d'une plaque stratifiée [0/90/0/90/0]_s simplement appuyée aux quatre extrémités avec une force d'impact avec une vitesse d'impact de 3 m/s. La comparaison de la force de contact et de la flexion transversale au milieu obtenues par la méthode actuelle avec les résultats obtenus par la littérature [15, 16, 17, 18] sont montrées la figure 4 et 5. Il est évident l'évolution en fonction du temps de la force de contact et de la flexion centrale obtenue par le code ANSYS est en une bonne concordance avec la littérature.

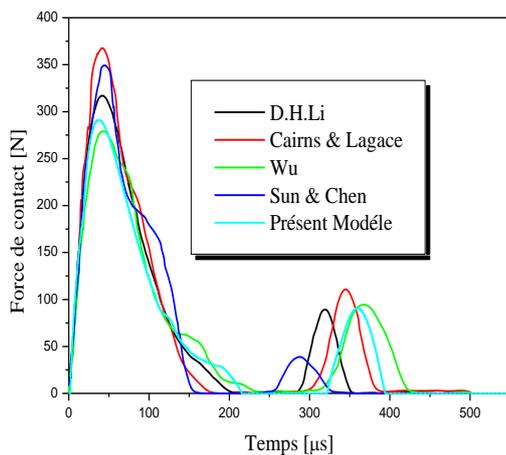


Figure 4 : Validation de la force de contact.

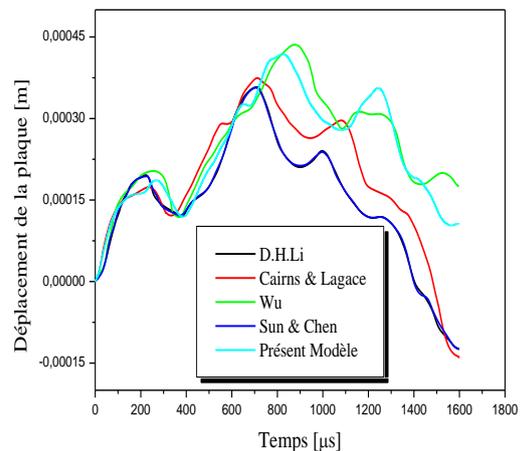


Figure 5 : Validation du déplacement de la plaque.

3.1 Effet de variation de la forme de l'impacteur

Après validation de notre modèle, une étude paramétrique a été effectuée afin de mettre en valeur l'effet de la forme de l'impacteur sur le comportement de notre panneau. La simulation de quatre formes d'impacteur (figure 6) a été effectuée: plan, sphérique, balle et pyramide. Cet ordre correspond au classement des formes d'impacteur selon le maximum de force de contact qu'elles induisent, le déplacement maximal mesuré et l'énergie totale absorbée.

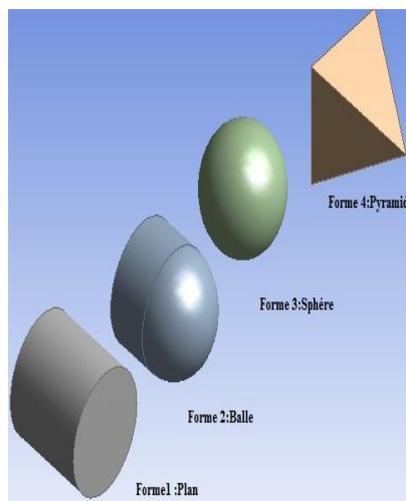


Figure 6 : Formes d'impacteur

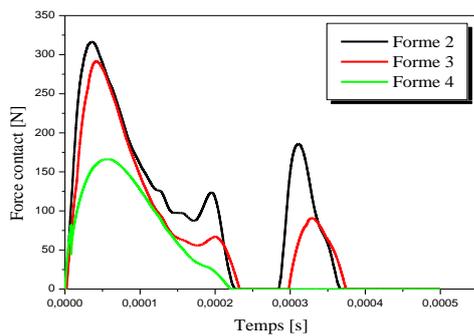


Figure 7 : Effet de variation de la forme de l'impacteur sur la force d'impact. (forme 2, 3,4)

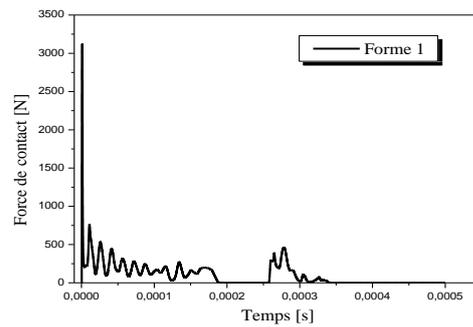


Figure 8 Effet de variation de la forme de l'impacteur sur la force d'impact. (forme 1)

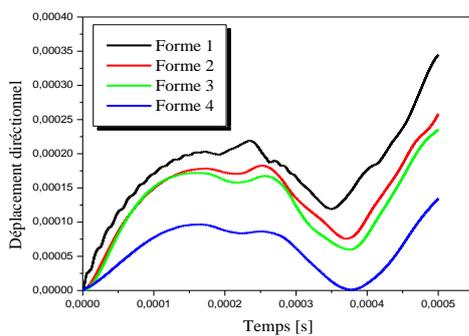


Figure 9 : Effet de la variation de la forme de l'impacteur sur le déplacement.

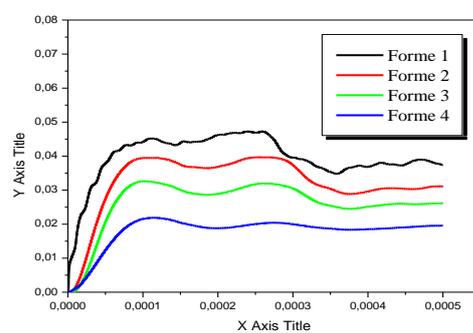


Figure 10 : Effet de la variation de la forme de l'impacteur sur l'énergie totale.

3.2 Effet de variation du matériau de construction

Afin d'avoir une idée générale sur le comportement et la rigidité des panneaux construits par différents matériaux (Graphite-époxy, Acier et Aluminium) dans le cas d'impact avec une vitesse de l'ordre de 3 m/s, on a présenté la figure 11, 12,13et14. Ces dernières montrent une comparaison entre les différentes grandeurs en fonction du types de matériaux. La rigidité du panneau construit en acier est très élevée par rapport à celle construite en aluminium/Graphite -époxy, ceci est dû aux propriétés mécaniques (module de Young) élevées de l'acier par conséquent son déplacements est faible par rapport a celui des deux matériaux (Aluminium et Graphite-époxy) mais l'inconvénient est que sa rigidité est réduite par la corrosion. En ce qui concerne la force de contact, l'énergie cinétique et l'énergie totale en remarque que plus l'épaisseur de la plaque augmente plus ces grandeurs sont élevées donc on conclut une proportionnalité inversé.

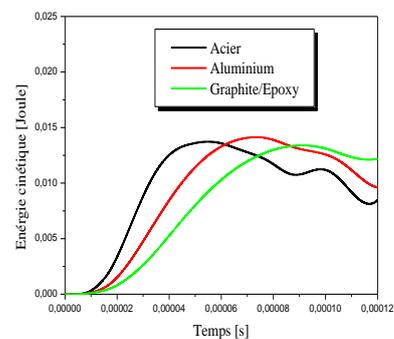
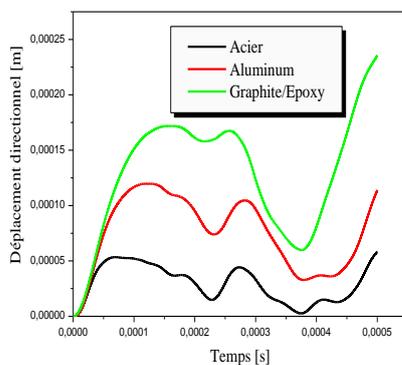


Figure11 : Effet de la variation du matériau de construction sur le déplacement.

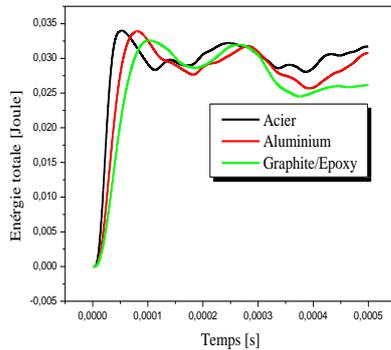


Figure12: Effet de la variation du matériau de construction sur l'énergie cinétique.

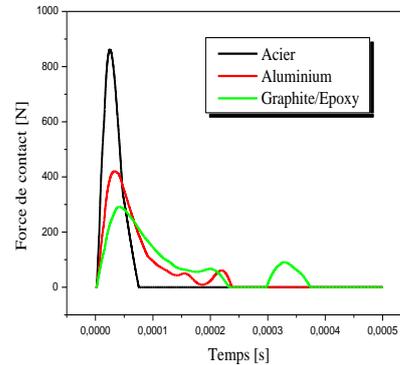


Figure13 : Effet de la variation du matériau de construction sur l'énergie totale.

Figure14 : Effet de la variation du matériau de construction sur la force de contact.

3.3 Effet de variation de l'épaisseur panneau

Les influences de l'épaisseur de la plaque raidie sur les réponses et sur les distributions de dommages de cette dernière sont présentées aux figures 14, 15, 16, 17,18 et 19 pour une vitesse d'impact de 3 m/s et une épaisseur de raidisseurs de 5.0mm.

Il a été observé que l'épaisseur du panneau a une influence significative sur la réponse de la plaque raidi. Avec l'augmentation de l'épaisseur de la plaque raidie, la force de contact, et l'énergie interne de la plaque ont augmenté rapidement et pour une épaisseur de plaque inférieure à celle des raidisseurs on remarque la présence du phénomène de rebond contrairement au cas où l'épaisseur de la plaque est égale ou supérieure à celle des raidisseurs donc il ya proportionnalité entre la force de contact et l'épaisseur de la plaque. En effet la probabilité d'endommagement devient de plus en plus réal. Parce que l'énergie de rebondissement devient très faible. La grande partie a été dissipée sous forme d'endommagement. Pour le déplacement transversal, l'énergie cinétique et l'énergie totale absorbée, la proportionnalité est inversée.

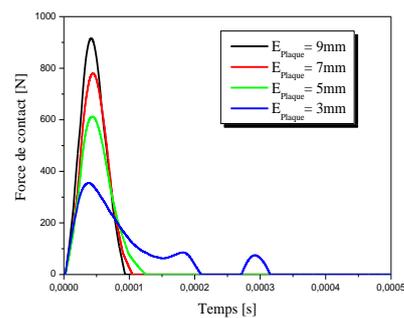
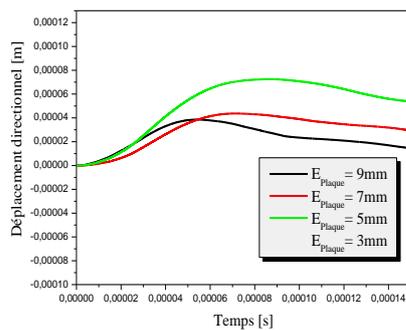


Figure15 : Effet de la variation de l'épaisseur de la plaque sur le déplacement.

Figure16: Effet de la variation de l'épaisseur de la plaque sur la force contact.

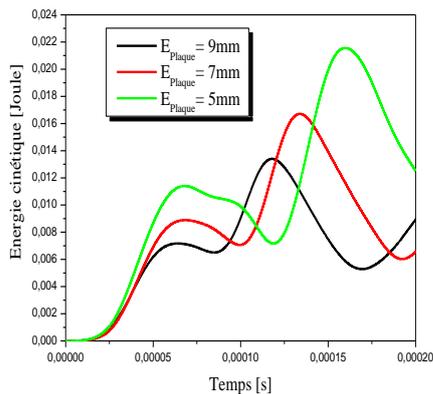


Figure17: Effet de la variation de l'épaisseur de la plaque sur l'énergie cinétique.

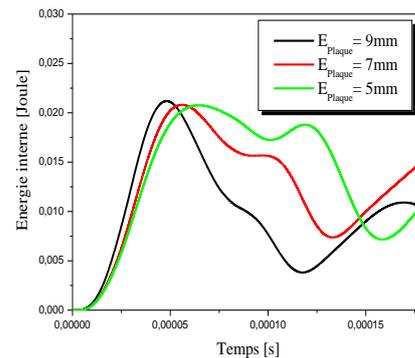


Figure18 : Figure17: Effet de la variation de l'épaisseur de la plaque sur l'énergie totale.

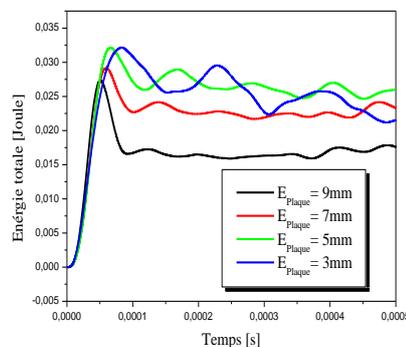


Figure19: Effet de la variation de l'épaisseur de la plaque sur l'énergie interne.

4. Conclusion

Par le présent travail, une simulation de l'impact à faible vitesse d'un panneau raidi en composite et différentes forme d'impacteur a été présentée. A partir des résultats obtenus, nous avons constaté que la force de contact est maximale au point de contact ceci pour une épaisseur de plaque maximale, une plaque en acier. En fonction de la forme d l'impacteur, de la rigidité du panneau, il se développe une énergie qui peut être soit absorbée par le panneau ou bien rebondie. L'absorption de cette énergie engendre des déformations permanentes qui sont souvent sources de délaminage, de fissurations transverses ou de rupture. En fonction des paramètres étudiés il a été remarqué que trois régions peuvent être clairement distinguées. Il s'agit de la zone de contact, la zone délimitée par les raidisseurs et la zone d'interface entre la plaque et les raidisseurs. Le déplacement transversal du panneau a tendance à réduire en fonction de l'augmentation de la rigidité de la plaque, par contre les endommagements induits par le choc ont tendance à augmenter.

Références

1. Staszewski W., Boller C., Tomlinson, G.R. *Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing* Editions Wiley, 2004.
2. Kim J.-H. *Identification de cartes d'endommagement de plaques composites impactées par la méthode des champs virtuels*. Thèse présentée à l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers, 2008.

3. Aboissière J. *Propagation de dommages d'impact dans un matériau composite stratifié à fibres de carbone et résine époxyde*. Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2003.
4. B. J. Schwartz and M. H. Richardson, *Experimental modal analysis, CSI Reliability week, Orlando, FL, (Octobre 1999)*.
5. Stéphanie Lasquellec (insa de rennes) Jean-Bernard kovraik (stcpmvn), *Choc de bateaux contre les obstacles fixes*, Rapport Technique. (Novembre 1998),
6. Abrate S. Modeling of impacts on composite structures. *Composite Structure* 2001; 51(2):129–38.
7. Thèse de doctorat, *Modélisation de la viscoplasticité et de l'endommagement en grandes vitesses de déformation* présenté par Laurence campagne(2013).
8. Belingardi G., Vadori R. *Low-velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates*. *International Journal of Impact Engineering*, vol.27, p. 213-229, 2002.
9. Aktaş M., Atas C., İçten B.M., Karakuzu R. *An experimental investigation of the impact response of composite laminates*. *Composite Structures*, vol. 87, p. 307-313, 2009.
10. Davies G.A.O., Olsson R. *Impact on composite structures*, *The Aeronautical Journal*, vol. 108, p. 541-563, 2004.
11. González E.V., Maimí P., Camanho P. P., Turon A., Mayugo J. A. *Simulation of drop-weight impact and compression after impact tests on composite laminates*. *Composite Structures*, vol. 94, p. 3364-3378, 2012.
12. Olsson R. *Mass criterion for wave control impact response of composite plates*. *Composites: Part A*, vol. 31, p. 879-887, 2000.
13. Mitrevski T., Marshall I.H., Thomson R., Jones R., Whittingham B. *The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates*. *Composite Structures*, vol. 67, p. 139-148, 2005.
14. Mitrevski T., Marshall I.H., Thomson R., Jones R. *Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes*. *Composites Structures*, vol. 76, p. 209-217, 2006.
15. Li D.H., Y. Liu, X. Zhang, *Low-velocity impact responses of the stiffened composite laminated plates based on the progressive failure model and the layerwise/solid-elements method*, *Composite Structures* 110 (2014) 249–275.
16. Sun C, Chen J. *On the impact of initially stressed composite laminates*. *J Compos Mater* 1985; 19:490–504.
17. Stéphanie Lasquellec (insa de rennes) Jean-Bernard kovraik (stcpmvn), *Choc de bateaux contre les obstacles fixes*, Rapport Technique. (Novembre 1998),
18. Cairns D, Lagace P. *Transient response of graphite/epoxy and Kevlar/epoxy laminated subjected to impact*. *AIAA J* 1989;27(11):1590–6.