



Revue des Matériaux & Energies Renouvelable

Journalhome : <https://www.univ-relizane.dz>

ISSN : 2507-7554

E-ISSN : 2661-7595



FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE, UNIVERSITE DE RELIZANE.

Effet de l'impact du projectile sur le comportement mécanique des aéronefs

Open
Access

Abdessamed BACHIRI^{1*}, Noureddine DJEBBAR², Benali BOUTABOUT¹

¹ Département de Génie mécanique, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbès 22000, Algérie.

² Département de Génie mécanique, Université Hassiba Benbouali de Chlef 02000, Algérie.

^{1,2} Laboratoire Mécanique Physique des Matériaux (LMPM), Sidi Bel Abbès 22000, algérie.

RESUME

Article history:

Received 15 July 2020.

Received in revised form 28 November 2020.

Accepted 05 July 2021.

Keyword : zone plastique ; impact ; déformation ;
MEF, résistance ; endommagement.

Cette étude a pour objectif d'analyser le comportement des structures des aéronefs aux chocs mécaniques rapides afin d'améliorer la résistance à l'impact d'un projectile. L'effet de la géométrie du projectile, de sa masse sur le processus d'endommagement et de perforation a notamment été mis en évidence. Pour ce faire, une plaque en aluminium 2024-T3 de forme carrée de dimensions 150.150.1 mm³ est analysée. Ce modèle est un élément d'une aile d'un aéronef. Le contact entre le projectile et la plaque a été modélisé en utilisant la méthode de pénalisation avec une formulation de glissement réduit. Les projectiles cylindriques à bout conique conduisent à l'endommagement par perforation de ces structures. Ce risque de ruine est d'autant peu probable que ce bout tend à devenir plat. De ce dernier résultent que des déformations réversibles.

Les résultats obtenus montrent clairement que la forme et la masse du projectile sont deux paramètres étroitement liés et déterminent la prédiction de la résistance aux chocs mécaniques.

Copyright©2021.....-Allrightsreserved

1. Introduction

De nombreux problèmes posés au cours du dimensionnement de certaines structures civiles, militaires ou spatiales sont liés au comportement des matériaux dans le domaine des grandes déformations aux grandes vitesses de déformation. Lors du fonctionnement nominal ou accidentel de ces objets, les matériaux constitutifs se trouvent souvent sollicités à des chocs initiaux d'intensité élevée. Le chargement mécanique complexe qui en résulte soumet le matériau à une succession de sollicitations extrêmes en termes de pressions, de grandes déformations. Le domaine des essais statiques et dynamiques couvre un très large éventail de situations et intéressent les ingénieurs de différentes disciplines. Par exemple, les ingénieurs de production cherchent à comprendre les problèmes d'impact sur structure/carrosserie dans le domaine des transports [1-3].

Les situations d'impact de micrométéorites sur structures spatiales ou satellites, dans le but d'améliorer la performance et la sécurité de leurs produits. Les scientifiques qui travaillent sur les thématiques militaires ont également besoin de comprendre le comportement des matériaux pour des situations similaires afin de concevoir des structures qui sont plus efficaces pour résister à l'impact d'un projectile ou afin de concevoir des missiles balistiques performants. Il s'agit donc de répondre aux besoins scientifiques de l'industrie en matière d'utilisation des matériaux métalliques et de conception de structures sous sollicitations statiques [4, 5]. Ceci notamment pour une meilleure maîtrise des lois de comportement des matériaux constitutifs, de la rupture et de l'absorption d'énergie pour la protection des personnes et des structures contre des catastrophes naturelles ou pour la sécurité passive, Pour les structures primaires métalliques actuellement utilisées, les

* Corresponding author: abdessamed300@yahoo.fr

solutions de réparation sont matures et optimisées. Cependant, le recours à des solutions en matériaux composites directement exposées à ces agressions extérieures (fuselage par exemple) induit d'adapter ces méthodes à ces matériaux. Cela est d'autant plus vrai que les matériaux composites sont connus pour être très sensibles à ce type d'agressions impliquant des endommagements pouvant réduire de manière notable leurs performances mécaniques. Un des enjeux de ces futures années, sera notamment la mise en place d'une maintenance adaptée à ces nouveaux matériaux pour l'aéronautique civile avec pour objectif la diminution du coût de possession associé à l'appareil et notamment le coût de maintenance [6].

L'impact est identifié comme le mode de chargement le plus critique pour les matériaux composites [7]. Depuis le milieu des années 1980, ces matériaux ont vu leurs applications s'étendre aux structures aéronautiques dites primaires telles que les ailerons et les stabilisateurs horizontaux des AIRBUS A310, A300/600, A320 et A340 ou le caisson de voilure de l'avion militaire français RAFALE. À titre indicatif, ces matériaux représentent 22,6 % de la structure totale de L'ATR 72. Leur utilisation sur cet avion de transport régional concerne les caissons extrêmes de voilure dont la longueur avoisine 8,5m chacun ainsi que la quasi-totalité des capotages externes [8]. Les matériaux composites en général sont caractérisés par une meilleure résistance spécifique que les métalliques et ont une dissipation d'énergie particulièrement élevée [9] mais la problématique aujourd'hui réside dans le couplage des aspects expérimentaux, analytiques et numériques afin de fournir une analyse détaillée du comportement des structures sous sollicitations dynamiques rapides. Ceci notamment pour une meilleure maîtrise de l'absorption d'énergie pour la protection des personnes et des structures contre les catastrophes naturelles ou pour la sécurité passive. Beaucoup d'études ont été publiées traitant du problème de l'impact et des réponses mécaniques et dynamiques y associées. Néanmoins, avec des matériaux et des procédés émergents en permanence, il y a un manque de connaissances approfondies liées à ce phénomène et les relations entre propriétés/performances/endommagements qui peuvent fournir des informations sur le comportement des composites soumis à un des impacts dynamiques [10].

Cependant, l'utilisation de ces matériaux est assujettie à la connaissance de leur comportement mécanique, aussi bien en statique qu'en dynamique, également à la possibilité de les simuler. Néanmoins, les résultats de simulation sont loin d'être satisfaisants à moins de rechercher des modèles numériques au cas par cas. Cela entraîne un surdimensionnement des structures et une perte des avantages liés à l'utilisation de matériaux composites.

Cette étude rentre dans ce contexte et a pour objectif l'analyse du comportement des structures des aéronefs aux chocs mécaniques rapides afin d'améliorer la résistance à l'impact d'un projectile. Pour ce faire, l'effet de la forme géométrie du projectile, de sa masse sur le processus d'endommagement et de perforation a notamment été étudié.

2. Propriétés des matériaux utilisés

Sur les tableaux 1 et 2 sont regroupés les caractéristiques mécaniques et physiques de projectile et de la cible utilisée dans cette étude.

Table 1 : Caractéristiques de l'alliage d'aluminium 2024-T3 [11].

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Module d'élasticité	E	72400	MPa
Module de rigidité	G	28000	MPa
Coefficient de poisson	ν	0.33	-
Chaleur spécifique	C_p	875	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Coefficient de dilatation	α	23.2	$\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Densité	ρ	2780	kg m ⁻³
Conductivité thermique	λ	120	W m ⁻¹ K ⁻¹
Limité élastique	R_e	345	MPa
Limite de traction	R_t	485	MPa

Table 2 : Caractéristiques de l'acier E360 [11].

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Module d'élasticité	E	210000	MPa
Module de rigidité	G	79000	MPa
Coefficient de poisson	ν	0.28	-
Chaleur spécifique	C_p	460	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Coefficient de dilatation	α	13	$\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Densité	ρ	7700	kg m ⁻³
Conductivité thermique	λ	50	W m ⁻¹ K ⁻¹
Limité élastique	R_e	620.422	MPa
Limite de traction	R_t	723.8256	MPa

3. Definition du modèle

Il s'agit donc de comprendre et de maîtriser les phénomènes de réponse des matériaux à des sollicitations mécaniques instantanées. Ceci notamment pour une meilleure maîtrise des mécanismes d'endommagement, de la rupture et de l'absorption d'énergie pour la protection des personnes et des structures contre des catastrophes dans le domaine des transports aériens, maritimes ou terrestres. Autrement dit maîtriser les mécanismes de l'absorption d'énergie et ceux de rupture pour des chargements de type impact et perforation. Ce n'est pas toujours facile, car cela nécessite le développement de moyens expérimentaux et numériques adaptés. De nombreuses études expérimentales, analytiques et numériques sont aujourd'hui disponibles dans la littérature internationale. Des travaux sur la pénétration et la perforation des structures par des projectiles ont été menés par des chercheurs comme Goldsmith [12].

Cette étude rentre dans ce contexte et a pour objectif l'analyse de l'effet d'impact d'un projectile sur le comportement d'une structure des avions au choc mécanique rapide (résistance à l'impact). Cette analyse permet donc la prédiction du comportement de ces structures aux chocs mécaniques. Pour ce faire, une plaque, en aluminium 2024-T3, de module de Young $E=73000\text{MPa}$, de coefficient de poisson $\nu=0.33$, de forme carrée, de dimensions $150 \times 150 \times 1\text{ mm}^3$ (fig.2) est analysée. Cette plaque est un élément d'une aile d'un avion "Avion supersonique Concorde" (fig.1).



Figure 1– Aile d'avion supersonique Concorde.

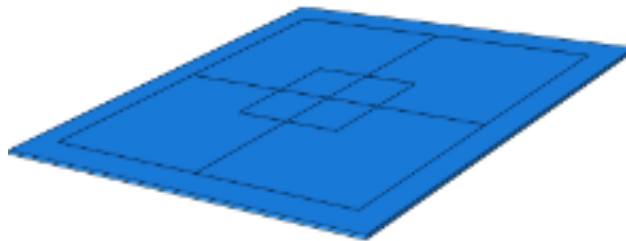


Figure 2– Plaque en Al 2024T3 analysée.

L'effet de la forme géométrique du projectile et de sa masse, sur le comportement mécanique de la cible a notamment été étudié. Cette analyse a donc pour but la compréhension des mécanismes d'endommagement des structures soumises à des sollicitations statiques rapides.

Les conditions aux limites de la structure analysée sont indiquées sur la figure.3. La plaque est donc supposée encastree sans aucun déplacement, ni rotation suivant les trois axes et le projectile présente un seul déplacement selon l'axe z (Fig.4)

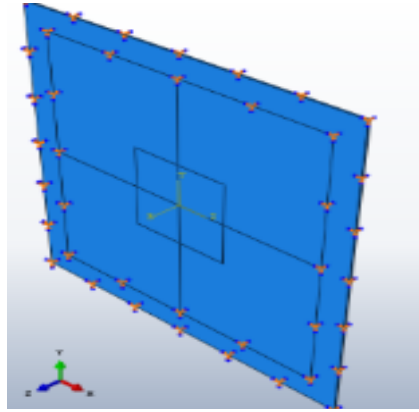


Figure 3– Conditions aux limites de la plaque.

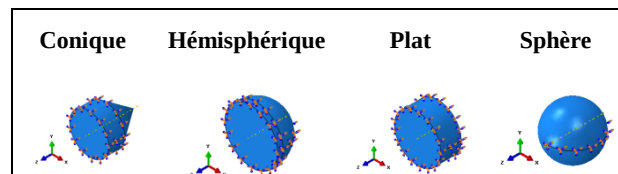


Figure 4– Conditions aux limites du projectile.

La simulation numérique, par éléments finis envisagé ici, est destinée à une analyse tridimensionnelle "3D" du problème d'impact et de perforation en vue de prédire les condition d'endommagement.

La déformation globale de la plaque n'étant pas forcément symétrique, nous avons donc choisi de modéliser le problème entier. La plaque et le projectile ont été modélisés à l'aide des éléments cubiques (hexaèdres) à huit nœuds. Pour la fiabilité et la reproductibilité des résultats, le maillage utilisé sur la zone ciblée (centre du la plaque) a été particulièrement raffiné, La plaque a été modélisée par 498322 éléments (Fig.5).

La figure 6 représente le maillage des projectiles avec un nombre des éléments bien déterminé pour chaque forme.

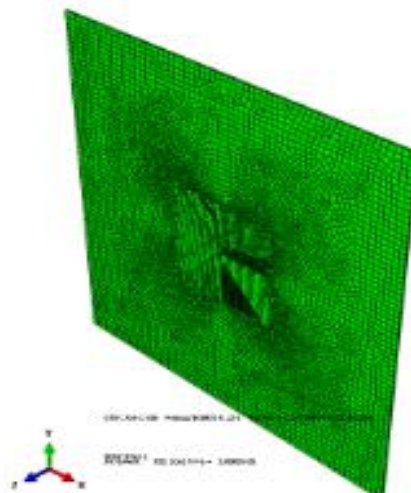


Figure 5– Maillage de la structure analysée.

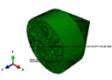
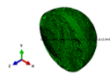
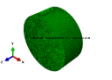
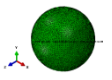
Conique	Hémisphérique	Plat	Sphère
			
192580 élément	40155 élément	54956 élément	150250 élément

Figure 6– Maillage des projectiles.

Le projectile et la plaque ont été modélisés comme deux corps tridimensionnels déformables. Le contact entre le projectile et la plaque a été modélisé en utilisant la méthode de pénalisation avec une formulation de glissement réduit. Dans le but d'optimiser le maillage et en tenant compte du type d'élément, de la densité du maillage et du temps de calcul, nous avons choisi, après avoir essayé plusieurs approches, de partitionner la géométrie de la plaque en deux parties : une partie centrale carrée (Fig.3) et une partie extérieure qui vient compléter la structure parallélépipédique de dimensions. La figure 7 représente la modélisation de cette partie centrale carrée.

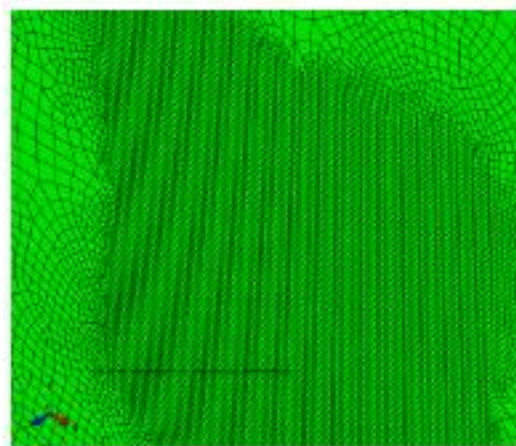


Figure 7– Maillage de la partie centrale carrée.

4. Analyse des résultats numériques

4.1 Effet de la forme du projectile

Dans cette partie de travail, une analyse de l'effet de la forme du projectile sur le comportement de la plaque aux chocs mécaniques rapides a été réalisée. Ce comportement est analysé en termes de distribution et d'amplitude des contraintes induites dans la cible. Pour ce faire, un projectile de forme variable, en acier E360, de masse 2.65 g, est éjecté avec une vitesse de 18m.s⁻¹ sur une plaque en aluminium 2024-T3. Quatre formes ont été retenues pour cette étude : Cylindrique à bout plat, cylindrique à bout sphérique, cylindrique à bout conique, sphérique comme le montre la figure 6.

La répartition des contraintes sur la zone ciblée est représentée sur la figure 8. Cette figure montre que le niveau de ces contraintes est d'autant plus élevé lorsque le bout de l'impacteur est de forme géométrique aigue. En effet, dans les conditions utilisées, la zone impactée est d'autant plus déformée que le projectile présente un bout conique. Cette figure illustre clairement, que lors du processus du choc, la limite de rupture de la plaque a été franchie. Ceci montre que les limites de perforation de la cible ont été atteintes. Dans de telles conditions, la structure ciblée est totalement endommagée. Ce comportement est illustré en termes de contraintes localisées dans la plaque lors du choc mécanique (Fig.8.d). Il est à noter cependant que les formes cylindriques, à bout sphérique et hémisphérique, induisent dans la cible, lors du processus de collision projectile-plaque, des contraintes pratiquement de niveau et de distribution comparables (Fig.8.b et c). Ces contraintes, localisées dans la zone de choc, dépassent la limite d'écoulement de la cible et sont emmagasinées dans la plaque 2024-T3, sous forme de déformation plastique. Autrement dit, lors du choc mécanique, une partie de l'énergie de l'impactant est absorbée par la plaque par déformation.

Les figures 8.b et 8.c montrent que la géométrie projectile et plus particulièrement la forme du bout impactant a une influence sur le niveau et la répartition des contraintes dans la cible et donc elle détermine le comportement des structures des aéronefs aux chocs mécaniques rapides.

Les résultats indiqués sur la figure 8.a montrent que, lors de la collision avec la structure en Al 2024-T3, le projectile cylindrique à bout plat induit des contraintes d'intensité beaucoup plus faible que les trois autres formes. Ces contraintes, d'un niveau beaucoup plus bas que le seuil de plastification, ne constituent aucun risque d'endommagement pour la cible.

Les résultats obtenus montrent que, dans les conditions utilisées dans cette étude, la forme du projectile détermine le comportement de la plaque au choc mécanique. En effet, l'impacteur à bout non plat, engendre, lors du processus de choc, dans la cible des contraintes, dont le niveau conduit, en fonction de la géométrie du bout, à un endommagement de la structure par plastification ou par rupture (perforation).

Pour une meilleure illustration de l'effet de la forme du projectile sur le comportement aux chocs mécanique instantanées, la figure 9 montre l'étendu de la zone sous contraintes (zone plastiquement déformée) en fonction de la forme du projectile. Cette figure montre nettement que la zone endommagée plastiquement par un projectile à bout sphérique est environ deux fois plus étendue que celle engendrée par un impacteur à bout conique. La forme aigue du bout impactant engendre des contraintes plus fortes très localisées et des zones plastiques très restreintes. Rappelons que le niveau de ces contraintes a franchi la limite de rupture de la plaque ce qui mène à la perforation de la cible.

Les deux autres formes du bout impactant sphérique et hémisphérique induisent dans la plaque, pendant la collision projectile-cible, des zones plastiquement déformées de taille comparables. Le choc mécanique rapide projectile-cible conduit à un endommagement de la structure par déformation plastique.

Sur la figure10, est représentée la variation de la contrainte équivalente de von Mises le long de la zone endommagée. Les résultats illustrés sur cette figure confirment ceux indiqués sur la figure 9. En effet, les contraintes sont localisées sur des zones très restreintes de la plaque lorsque celle-ci est impactée avec un impacteur cylindrique à bout conique. Cette zone tend à s'élargir quand elle est impactée à l'aide d'un projectile de géométrie curviligne. Cette figure montre qu'un projectile à bout plat induit dans la plaque des contraintes les plus faibles, largement inférieures à celle de la limite élastique, mais la zone plastique est inexistante puisque la déformation est purement élastique.

Les résultats de cette analyse montrent que la forme du projectile est un facteur géométrique essentiel et déterminant du comportement des structures des avions aux chocs mécaniques instantanés. Les projectiles cylindriques à bout conique conduisent à l'endommagement par perforation de ces structures. Ce risque de ruine est d'autant peu probable que ce bout tend à devenir plat. De ce dernier résultent que des déformations réversibles.

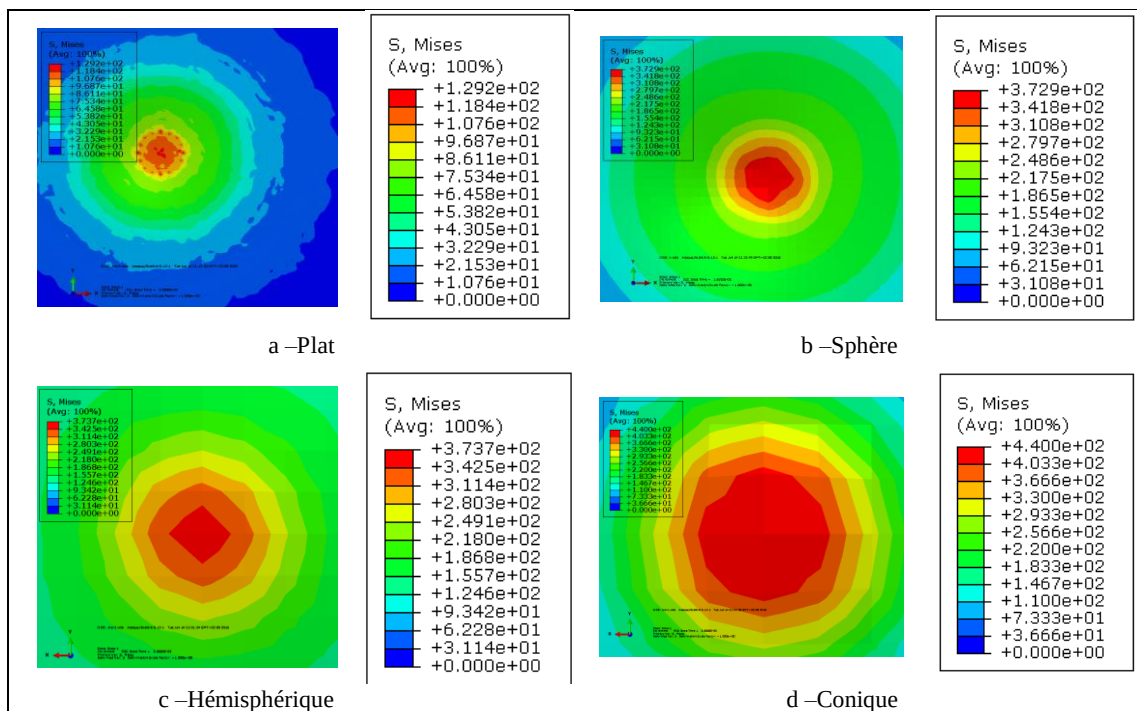


Figure 8– Effet de la forme du projectile sur le niveau et distribution des contraintes de von Mises dans la plaque.

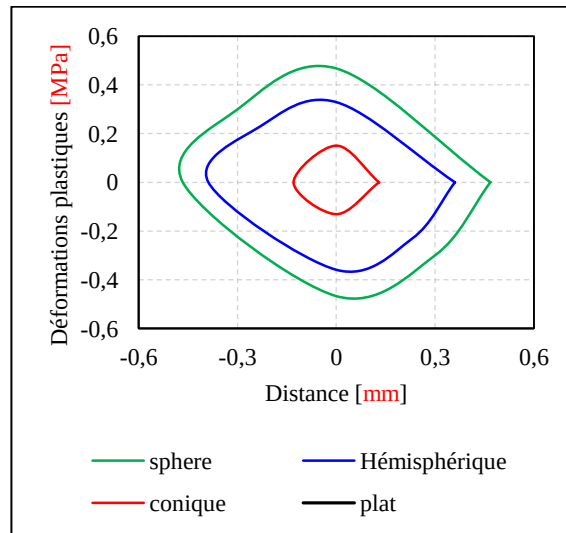


Figure 9– Effet de la forme du projectile sur la taille de la zone endommagée de la plaque.

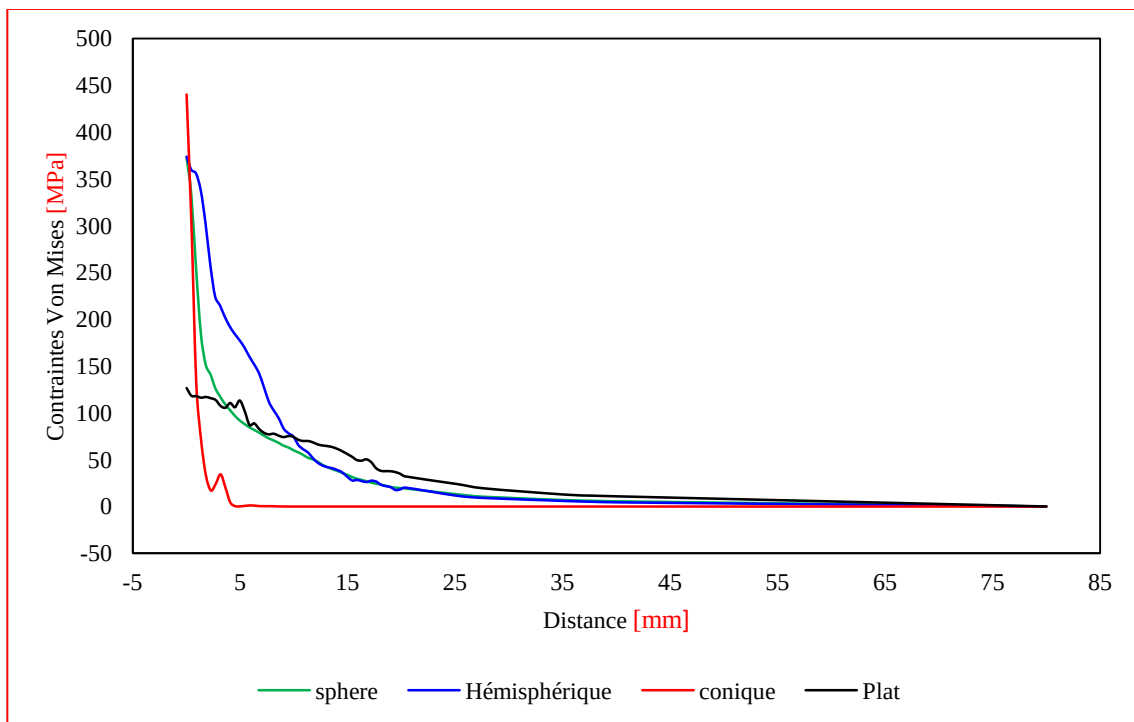


Figure 10– Variation de la contrainte de Von Mises le long de la zone endommagée de la plaque.

4.2 Effet de la masse du projectile

Dans l'étude précédente, il a été montré que le projectile cylindrique à bout conique conduit à un endommagement par perforation de la plaque. C'est donc cette forme de l'impacteur qui a été retenue pour cette analyse. Dans cette partie de travail l'effet de la masse du projectile sur le comportement de la plaque aux chocs mécaniques rapides, a été examiné. Ce comportement est analysé en termes de répartition et d'intensité des contraintes induites dans la cible. Pour ce faire, un projectile de masse variable, en acier E360, est éjecté avec une vitesse de 11 m.s-1 sur une plaque en aluminium 2024-T3. La répartition des contraintes engendrées dans la structure par le choc mécanique rapide du projectile est représentée sur la figure 11.d. Cette figure montre que le niveau de ces contraintes est d'autant plus élevé que l'impacteur est de masse plus importante. Dans les conditions utilisées, la zone sous contraintes est plus étendue lorsque le projectile est plus lourd. Sous

l'effet d'un impacteur de masse importante, les zones endommagées (déformées plastiquement) sont plus large (Fig.12). En effet, les contraintes localisées dans la plaque ont franchi la limite d'écoulement. Il en résulte une plastification de la structure. Pour des masses plus grandes le seuil de rupture de la cible est dépassé ce qui conduit à un endommagement par perforation de la plaque.

Pour une meilleure représentation de la distribution des contraintes engendrées dans la cible par l'impacteur de masse "m", la figure 13 illustre la variation de la contrainte équivalente de von Mises le long de la zone impactée en fonction de la masse du projectile. Cette figure montre que, vue la géométrie du projectile cylindrique à bout impactant de forme conique en acier E360, les contraintes de forte intensité sont localisées au niveau des zones extrêmement restreintes et ce, quelle que soit la masse du projectile. Le niveau de contrainte équivalente dépend de l'énergie cinétique du projectile et son niveau croît avec l'accroissement de sa masse.

Les résultats obtenus montrent que la masse du projectile est un paramètre déterminant du comportement de la plaque au choc mécanique. Les zones déformées, plastiquement, sont plus étendues lorsque la cible est impactée avec un impacteur de masse importante. Il est clair que la vitesse et la masse du projectile sont deux paramètres étroitement liés, effectivement une partie de l'énergie cinétique du projectile est emmagasiné dans la cible, ce qui donne naissance à un champ de contraintes dans la structure impactée. L'énergie cinétique de l'impacteur détermine la prédiction de la résistance aux chocs mécaniques instantanés.

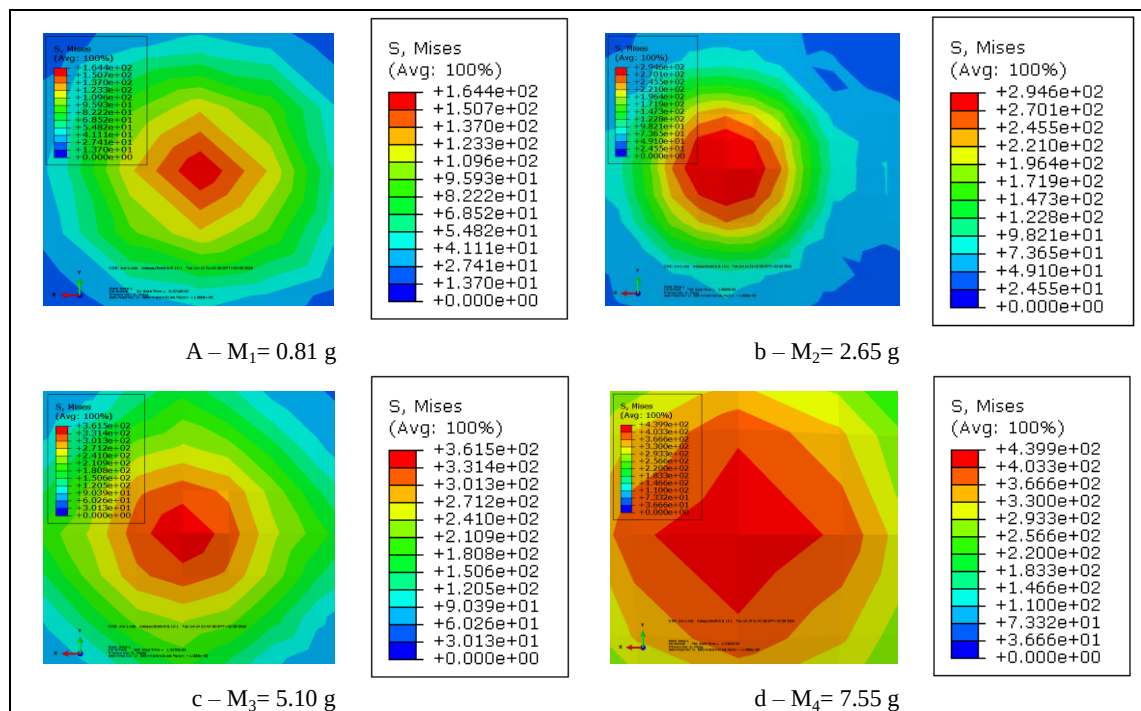


Figure 11– Effet de la masse du projectile sur le niveau et distribution des contraintes de von Mises dans la plaque.

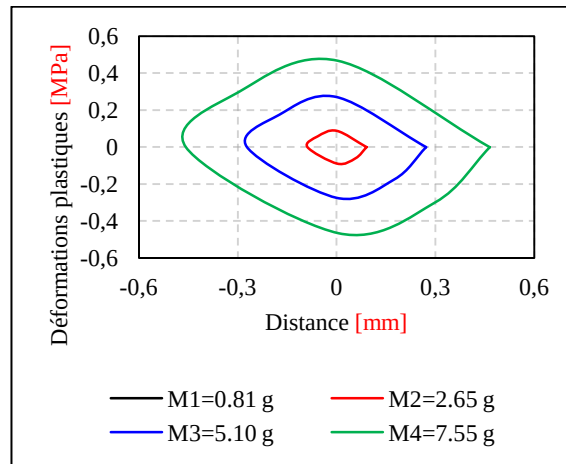


Figure 12– Effet de la masse du projectile sur la taille de la zone endommagée de la plaque.

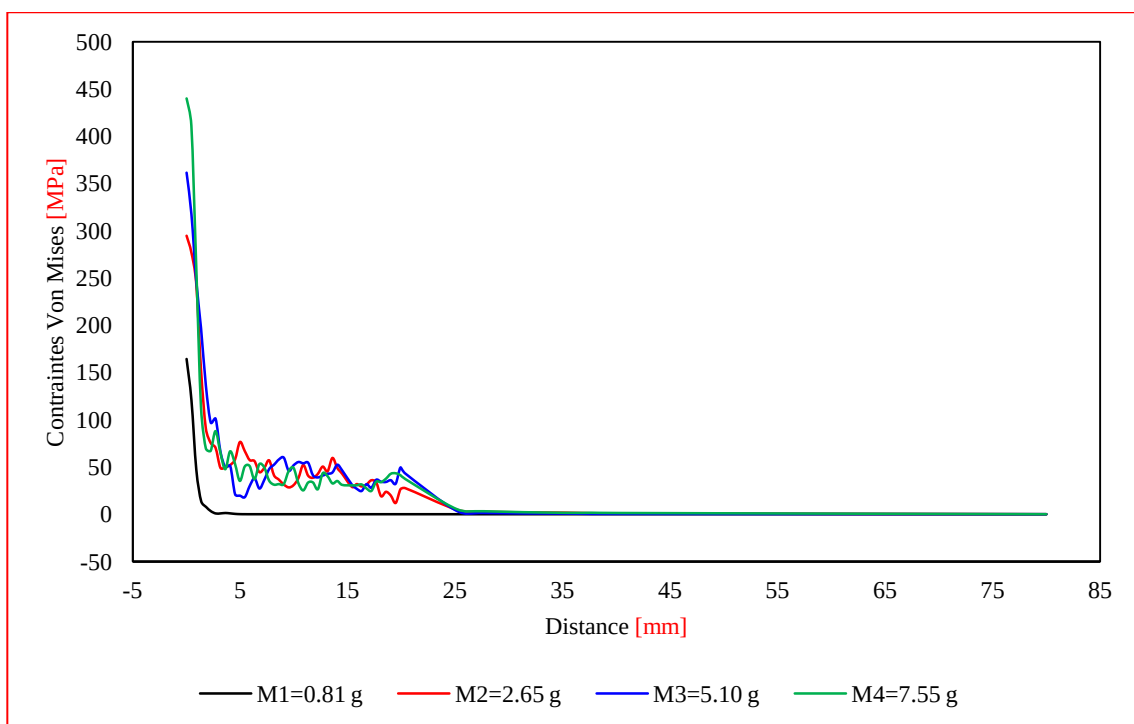


Figure 13– Variation de la contrainte de von Mises le long de la zone endommagée de la plaque.

Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que:

- ❖ La forme du projectile est un facteur géométrique essentiel et déterminant du comportement des structures des aéronefs aux chocs mécaniques instantanés. Les projectiles cylindriques à bout impactant de forme conique conduisent à l'endommagement par perforation de ces structures. Ce risque de ruine est d'autant peu probable que ce bout tend à devenir plat. De ce dernier résultent que des déformations réversibles;
- ❖ La masse du projectile est un paramètre déterminant du comportement de la plaque au choc mécanique. Les zones déformées plastiquement sont plus étendues lorsque la cible est impactée avec projectile de masse importante. L'énergie cinétique varie proportionnellement à la masse du projectile, une énergie cinétique importante conduit à la perforation de la cible.

Références

- [1]- KokouviMawuli KPENYIGBA. 2013. Etude du comportement dynamique et modélisation thermoviscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique. Thèse doctorat, Université de LORRAINE.
- [2]- Roland FORTUNIER. 2015. Comportement Mécanique des Matériaux. Ecole Nationale Supérieure des Mines. Saint-Etienne.
- [3]- F. Montheillet and F. Moussy. Physique et mécanique de l'endommagement. Editions de physique, 1986. Travaux du GRECO grandes déformations.
- [4]- F. Cristini. 2014. Amélioration de la résilience de systèmes spatiaux soumis à des menaces : vers des réseaux de satellites autonomes. Thèse doctorat, Université de Toulouse.
- [5]- Georges Menahem. 1986. La direction de l'effort scientifique français l'armée. Editions Le Seuil, pp. 45-75.
- [6]- HAUTIER. M. 2010. Analyse des réparations des matériaux composites : mise en oeuvre d'un procédé par infiltration et étude du comportement mécanique. thèse doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- [7]- Kim J.-H. 2008. 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.
- [8]- J. Rouchon. 1995. Fatigue and damage tolerance aspects for composite aircraft structures. Fatigue and damage tolerance of aircraft structures Delft, pp.1-11.
- [9]- Z. Jendli, F. Meraghni, J. Fitoussi, D. Baptiste. 2004. Micromechanical analysis of strain rate effect on damage evolution in sheet molding compound composites. Composites, Part A 35, pp. 779-785.
- [10]- Abrate S. 2001. Modeling of impacts on composite structures. Composite Structures, Vol. 51, pp.129-138.
- [11]- Bibliothèque "pppts des matériaux" en SolidWorks (2016).
- [12]- Werner Goldsmith. Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids. Book (2018).