

# Réponse mécanique d'une plaque métallique impactée par un projectile

L. ZOUAMBI<sup>1</sup>, H. FEKIRINI<sup>2</sup>, M. BOURDIM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>. Laboratoire Génie Industriel et Développement Durable, Centre Universitaire Ahmed Zabana  
Relizane, 48000, Algérie  
zouambileila@yahoo.com

<sup>2</sup>. LMPM, Département de Génie Mécanique, Faculté de Technologie, Université de Djilali Liabes,  
Sidi Bel Abbès, 22000, Algérie

*RESUME.* L'ensemble des résultats provenant d'une analyse par la méthode des éléments finis de chargement quasi-statique ainsi que la modélisation du comportement mécanique (viscoplastique) du matériau sont présentés à l'aide de la loi constitutive de Johnson-Cook. Cette loi de comportement étant pré-intégrée dans le code ABAQUS. Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'influence du comportement mécanique et la nature du matériau cible sur sa réponse vis-à-vis de l'impacteur qui est supposé rigide.

*MOTS-CLÉS :* Impact, plaque métallique, cible, impacteur, rigide, Johnson-Cook, loi empirique, viscoplastique, thermo-viscoplastique.

## 1. Introduction

Le comportement mécanique d'une plaque métallique impactée par un projectile reste un processus complexe incluant souvent : une déformation élastique et plastique, l'effet de l'écroutissement et de la vitesse de déformation, l'adoucissement thermique, la formation de fissure, le cisaillement adiabatique (la chaleur n'a pas le temps de s'évacuer et provoque une élévation notable de la température de la pièce), l'éjection de bouchon, la formation de pétales etc... Le modèle utilisé ici s'applique est très utile pour la simulation numérique dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'automobile, l'industrie pétrolière et navale, les procédés d'usinage, les applications militaires ou de génie civil [1]. La voie de modélisation envisageable dans cette étude est le modèle empirique le plus simple et le plus utilisé de Johnson-Cook. Ce modèle repose sur des observations expérimentales. Rusinek et al. [2, 3] l'ont utilisé pour des simulations numériques de comportement à l'impact de plaques minces en acier au moyen de projectiles coniques et hémisphériques non-déformables en utilisant le code ABAQUS Explicit. Le comportement de la plaque a été modélisé par une loi de type Johnson Cook (I) [4]. Ce modèle Johnson et Cook propose une loi empirique [4, 5] conçue à partir de résultats expérimentaux, et destinée à l'implantation rapide dans les codes de calcul. Ce modèle est basé sur celui de Ludwik [6] et inclut les influences de la vitesse de déformation, de l'écroutissement et de la température :

$$\sigma = \left[ A + B \varepsilon^n \right] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right]$$

Le premier terme représente la fonction d'écroutissement, pour  $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$ .  $A$  désigne la limite d'élasticité du matériau,  $B$  et  $n$  étant les paramètres d'écroutissement. Le deuxième terme décrit l'effet de la vitesse de

déformation, C'étant le paramètre de sensibilité à cette vitesse. Enfin, le troisième terme représente l'effet de la température (ou adoucissement thermique). Le coefficient  $m$  détermine la sensibilité de la contrainte à la variation de la température,  $T_r$  est la température ambiante et  $T_f$  la température de fusion. C'est la loi de comportement la plus utilisée dans les codes de calcul.

## 2. Description du modèle éléments finis utilisé

Nous avons traité l'exemple d'un impact linéique sur une plaque en acier standard de forme rectangulaire de dimensions 200\*100mm. Son épaisseur est de 6mm. Elle repose sur deux appuis simples situés chacun à 30mm des extrémités. Un impacteur dont l'extrémité est semi-cylindrique ( $d=20$ mm) et 60 kg de masse vient en contact avec la plaque à une vitesse initiale de 4 m/s [7]. Le modèle est destiné à une analyse à 3D. Le projectile est modélisé comme un corps rigide non déformable. La plaque est considérée comme un corps déformable. Le contact entre le projectile et la plaque a été modélisé.

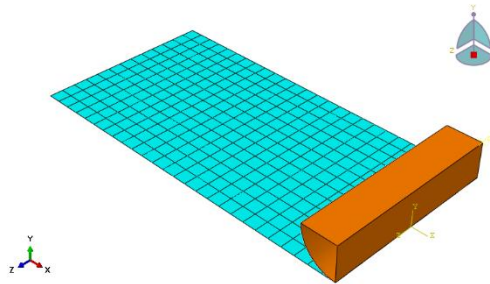


Figure 1. Modèle analysé

Tableau I : Paramètres Input pour le modèle à comportement élastique

Matériau	Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	Module de Young [GPa]	Coefficient de Poisson
Acier 4340, C30	7.83	262	0.3
Aluminium 6061-T651	2.703	69	0.3

Tableau II : Paramètres Input pour le modèle de plasticité de Johnson-Cook

Matériau	A [MPa]	B [MPa]	n	$T_r$ [K]	$T_{transition}$ [K]	m	C	$\dot{\epsilon}_0$ [1/s]	Chaleur Spécifique [J/(kg K)]
Acier 4340, C30	792	510	0.26	1793	293.2	1.03	0.014	1.0	477.0
Aluminium 6061-T6	324.1	113.8	0.42	925	293.2	1.34	0.002	1.0	88.5

La déformation globale de la plaque étant symétrique, nous avons donc choisi de modéliser le quart du problème (Symétrie plan (XY) et (YZ)). Les conditions d'analyse utilisées dans cette étude sont restreintes à un caractère non endommageable. Les liaisons de type appui simple (U2) et blocage de la plaque suivant les axes (OY et OZ) présentant une flexion trois points permettent de laisser un maximum de liberté (trois degrés de liberté) à la structure et ainsi de limiter la nocivité de l'impact. La figure

Il représente le maillage de la plaque analysé. Le nombre total d'éléments Linéaires quadrilatéraux à 4 nœuds de type S4R est de 338.

### 3. Analyse et Résultats

#### 3.1. Comportement mécanique du matériau

Dans cette partie, nous avons analysé le comportement mécanique du matériau (élastique, viscoplastique, thermo-viscoplastique). L'évolution de l'énergie de déformation en fonction du temps est illustrée sur la figure 2. La déformation atteint un pic ensuite diminue considérablement jusqu'à atteindre une valeur qui demeure constante. La valeur de cette énergie est d'autant plus élevée que le comportement varie de l'élasticité vers la thermo-viscoplasticité. La plasticité consomme énormément d'énergie : c'est le mécanisme qui permet aux métaux de résister aussi bien aux chocs. Dans tous les cas, la déformation plastique résulte de mouvements au sein de la matière qui s'accompagnent de frottements (force de Peierls-Nabarro dans le cas des dislocations) et produisent donc de la chaleur. On peut noter que la plus grande partie de l'énergie absorbée par la structure impactée est dissipée par sa déflexion globale. La variation de l'énergie cinétique transmise au matériau par l'impacteur pour différents comportements de la cible est représentée sur la figure 3. Celle du matériau à comportement thermo-viscoplastique est plus significative. Le retour de la courbe est de 75% inférieur à l'énergie initiale. La figure 4 représente une comparaison de l'évolution de la force en fonction du déplacement. Les courbes présentent des boucles fermées. La réponse à l'impact de la cible à comportement viscoplastique se traduit par une augmentation jusqu'à 1400N suivie d'une diminution progressive de la force.

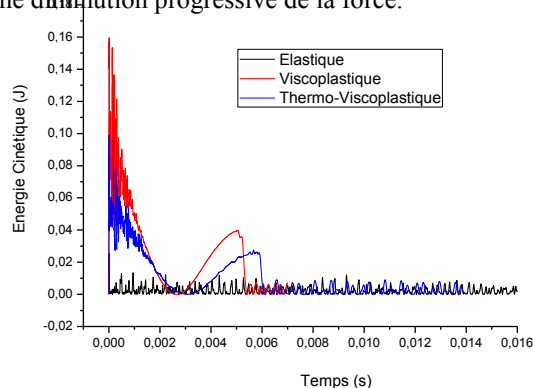
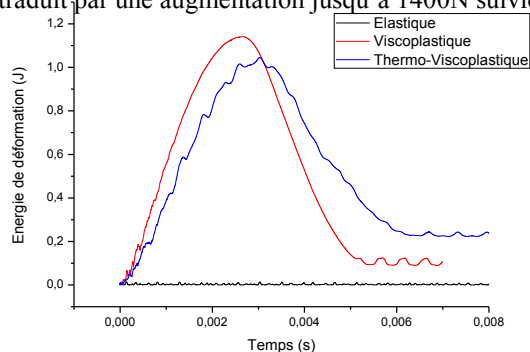


Figure 2. Variation de l'énergie de déformation en fonction du temps

Figure 3. Variation de l'énergie cinétique en fonction du temps

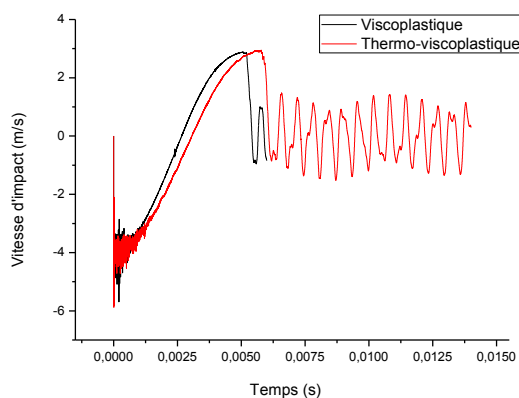
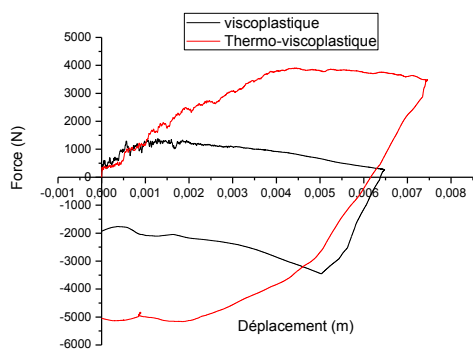


Figure 4. Variation de la force d'impact en fonction du déplacement et du comportement du matériau

Figure 5. Variation de la vitesse d'impact en fonction du temps et du comportement du matériau

Concernant la réponse globale de la plaque à comportement thermo-viscoplastique, on peut noter qu’une forte évolution de la force a eu lieu jusqu’à un maximum de 4000N qui reste quasiment constant pendant un déplacement de 3.5mm. Cet effort chute brutalement et atteint sa valeur minimale comprise entre -5000 et -2000N. Relativement à cette chute, la direction du déplacement est inversée. La force de l’impact est la force de décélération que subit un impacteur à la fin d’une chute. En effet, l’aire contenue dans la courbe représente l’énergie absorbée par la cible. En conséquence, l’énergie absorbée par le matériau à comportement thermo-viscoplastique est plus élevée. La figure 5 montre l’évolution de la vitesse d’impact (nous avons choisi le nœud du milieu de la plaque) en fonction du temps. La courbe marque des oscillations au début puis augmente de -4 à 3.5m/s pour les deux comportements. Le retour est noté de 1m/s à 0.0055s et 0.006s pour les comportements viscoplastique et thermo-viscoplastique respectifs. Ce retard peut être expliqué par l’augmentation de la viscoplasticité avec la température et par conséquent l’accroissement de l’énergie absorbée.

**3.2. Effet de la nature de la cible**

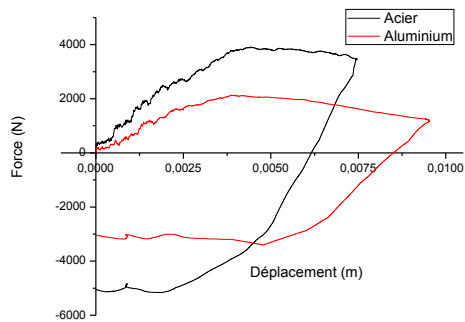


Figure 6. Variation de la force d’impact en fonction du temps pour différents matériaux

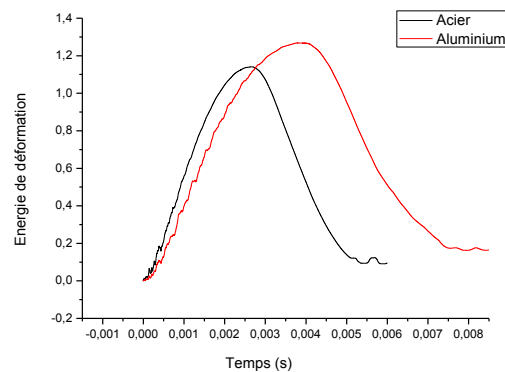


Figure 7. Variation de l’énergie de déformation en fonction du temps pour différents matériaux

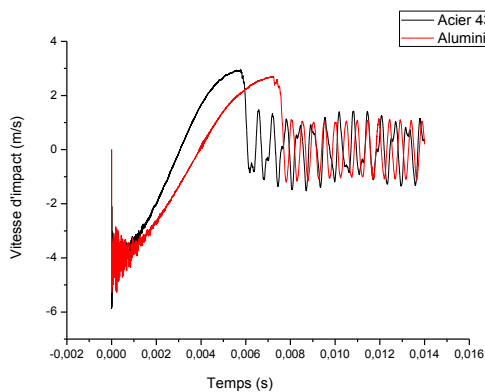


Figure 8. Variation de la vitesse d’impact en fonction du temps pour différents matériaux

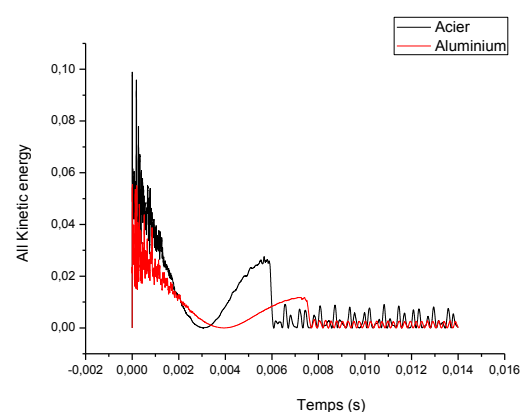


Figure 9. Variation de l’énergie cinétique en fonction du temps

Dans cette partie, nous avons analysé le comportement thermo-viscoplastique de la cible tout en variant sa nature. Une comparaison de la variation de la force en fonction du déplacement entre deux matériaux de natures différentes est représentée sur la figure 6. La réponse globale de la cible prend la même allure que la figure 4. Elle s'interprète par une diminution de l'amplitude de la force d'impact de l'Aluminium par rapport à celle de l'acier. Cette diminution est accompagnée par un allongement de la courbe suivant l'axe du déplacement. L'énergie absorbée est plus élevée pour l'acier que pour l'Aluminium. La variation de l'énergie de déformation en fonction du temps est illustrée sur la figure 7. Cette énergie atteint son maximum après une évolution rapide, le niveau de ce pic est de 1.15J à 0.0025s pour l'acier et 1.3J à 0.004s pour l'aluminium. Cette valeur diminue considérablement pour atteindre une valeur constante différente de zéro. La figure 8 représente la variation de la vitesse d'impact en fonction du temps et de la nature du matériau. La courbe marque une augmentation de -4 à 3.5m/s pour les deux matériaux avec un décalage de temps. Le retour est noté de 1m/s à 0.006s et 0.008s pour l'acier et l'aluminium respectifs. L'énergie cinétique de l'acier est plus significative que celle de l'aluminium (Fig.9).

## Références

- [1] S. Umiastowski. (2005). "Etude du comportement à l'impact basse vitesse d'une tôle de construction navale,".
- [2] A. Rusinek, J. A. Rodríguez-Martínez, A. Arias, J. R. Klepaczko, and J. López-Puente. (2008). "Influence of conical projectile diameter on perpendicular impact of thin steel plate," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 10, pp. 2946–2967.
- [3] A. Rusinek, J. A. Rodríguez-Martínez, C. Zaera, J. R. Klepaczko, A. Arias, and C. Sauvelet. (2009). "Experimental and numerical study on the perforation process of mild steel sheets subjected to perpendicular impact by hemispherical projectiles," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 565–587.
- [4] G. R. JOHNSON and W. H. COOK. (1983). "A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperatures," *7th International Symposium on Ballistics Proceedings*, pp. 541–547.
- [5] G. R. JOHNSON and W. H. COOK. (1985). "Fracture Characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, pp. 31–48.
- [6] P. Ludwik. (1909). "Element der Technologischen Mechanik," Springer.
- [7] Formation sur le code de calcul ABAQUS – module Explicit. (2006). Ecole Centrale de Nantes.