



Faculty of Sciences and Technology  
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2023

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

*Thème*

**ETUDE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT AUX  
CHOCES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM A FAIBLES  
VITESSES**

Présenté par :

❖ KABOUCHE AHMED

❖ LARDJANI RATIBA

*Soutenu le 25 / 06 / 2023 devant le jury composé de :*

Président	Pr ZENASNI Ramdane	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr BENKHATAB Mohamed	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Mr. BENAÏSSA Mohamed	Université de Mostaganem UMAB

**Année Universitaire : 2022 / 2023**



# Remerciement

*Tout d'abord nous remercions avant tout Allah le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour atteindre notre PFE*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadrant*

*Monsieur **BEN AISSA Mohamed***

*Pour son encadrement, conseils et sacrifices afin de donner le meilleur et pour son suivi durant la période de préparation de notre mémoire d'afin d'étude.*

*Je remercie tous les enseignants de département de Génie Mécanique et les personnels administratifs et techniques, qui ont contribué de près ou de loin à ma formation durant ces cinq années*

*Je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu, d'une façon ou d'une autre, m'éprouvons incessamment leur estime et amabilité.*

*Je termine ces remerciements en saluant vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de lire et juger ce travail.*





# *Dédicace*



*Quel que soit l'importance d'un travail exécuté, on ne peut le*

*Dédier qu'aux personnes chères à notre cœur.*

*De ce fait, je dédie ce travail*

*Ma très chère mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*Que dieu les protège et leur donne santé et longue vie.*

*Mes chers frères et me belle-sœur puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.*

*A toute ma famille, Surtout la famille ALIDRA et KHARFI Et auxquels j'exprime mon plus Grande gratitude.*

*A tous mes professeurs grâce à qui le contact*

*A tous ceux qui, ont participé de près ou de loin à la réussite de*

*Ce travail a tous je dédie ce modeste travail.*



## Résumé

Les matériaux métalliques occupent un intérêt croissant de la part de nombreux secteurs industriels et leurs emplois tendent à se généraliser. Les alliages d'Aluminium sont largement utilisés comme structures ou parois légères ayant de bonnes propriétés mécaniques et une grande capacité d'absorption d'énergie. Pour limiter le coût des essais mécaniques on a recours à la simulation numérique au moyen de la méthode des éléments finis. C'est dans ce contexte que ce mémoire est préparé. Sur la base d'une modélisation numérique, le code de calcul Abaqus, a été utilisé durant cette étude.

Le but de ce travail est l'analyse du comportement aux chocs à faibles vitesses des deux alliages d'Aluminium H116-5080 et T6-6061. Quatre exemples différents de problème d'impact ont été étudiés en utilisant un projectile rigide et des plaques en alliages d'Aluminium. Le premier cas étudié est l'effet de la forme de projectile en fonction de la vitesse d'impact, trois formes de projectiles ont été utilisés (cylindrique à bout plat, cylindrique à bout conique et cylindrique à bout hémisphérique). Dans la suite, l'effet de diamètre du projectile, l'angle d'impact et la masse du projectile sur les déformations des plaques en Aluminium a été étudié.

## Summary

Metal materials are of increasing interest to many industrial sectors and their use is becoming widespread. Aluminium alloys are widely used as lightweight structures or walls with good mechanical properties and high energy absorption capacity. In order to limit the cost of mechanical tests

à numerical simulation using the finite element method. It is in this context that this brief is prepared. Based on numerical modelling, the Abaqus calculation code was used during this study.

The aim of this work is to analyse the low-speed impact behaviour of the two Aluminum alloys H116-5080 and T6-6061. Four different examples of impact problems were studied using a rigid projectile and Aluminum alloy plates. The first case studied is the effect of the shape of the projectile as a function of the speed of impact, three forms of projectiles were used (flat-tipped cylindrical, conical-tipped cylindrical and hemispherical-tipped cylindrical). Subsequently, the effect of the diameter of the projectile, the angle of impact and the mass of the projectile on the deformations of the Aluminium plates was studied.

## ملخص

المواد المعدنية هي ذات أهمية متزايدة لكثير من القطاعات الصناعية واستخدامها أصبح على نطاق واسع. تستخدم سبائك الألومنيوم على نطاق واسع كهيكل خفيفة الوزن أو جدران ذات خصائص ميكانيكية جيدة وقدرة عالية على امتصاص الطاقة. للحد من تكلفة الاختبارات الميكانيكية ð المحاكاة العددية باستخدام طريقة العنصر المحدد. وفي هذا السياق، يجري إعداد هذا الموجز. بناء على النمذجة العددية ، تم استخدام رمز حساب Abaqس خلال هذه الدراسة.

الهدف من هذا العمل هو تحليل سلوك التأثير المنخفض السرعة لسبائك الألومنيوم H116-5080 و T6-6061. وقد درست أربعة أمثلة مختلفة لمشاكل الارتطام باستخدام قذيفة صلبة ولوحات من سبائك الألومنيوم. الحالة الأولى التي تمت دراستها هي تأثير شكل القذيفة كدالة لسرعة الارتطام ، تم استخدام ثلاثة أشكال من المقذوفات (أسطوانية مسطحة الرأس ، أسطوانية مخروطية الرأس ، أسطوانية نصف كروية الرأس). في وقت لاحق ، تمت دراسة تأثير قطر القذيفة وزاوية التأثير وكتلة القذيفة على تشوهات لوحات الألومنيوم.

# *Sommaire*

# Sommaire

Remercîment .....	
Dédicace .....	
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I :</b>	
<b>Généralité sur les alliage d'aluminium</b>	
I.1.Introduction .....	2
I.2.Comment l'Aluminium est-il fabriqué .....	2
I.2.1. La bauxite .....	2
I.2.2. L'alumine .....	3
I.2.3. L'aluminium .....	3
I.3.Propriétés de l'Aluminium ... ..	3
I.3.1. Physico _chimiques .....	3
I.3.2. Mécaniques .....	4
A. Légèreté .....	4
B. Résistance mécanique .....	4
C. Résistance à la corrosion .....	4
D. Conductivité thermique et électrique .....	4
E. Ductilité, malléabilité .....	5
F. Recyclable .....	5
G. Imperméabilité, effet barrière .....	5
H. propriétés réfléchissantes .....	5
I.3.3. Propriétés de mise en forme .....	5
I.4. Domaines d'utilisation .....	5
I.5. Différents types d'alliages d'Aluminium.....	7
1.5.1. Les alliages corroyés .....	7
1.5.2. Les alliages fonderie .....	7
1.5.3. Caractéristiques des alliages .....	8
A. Série 1001 .....	8

B. Série 3003 .....	8
C. Série 4000 .....	8
D. Série 5000 .....	8
E. Série 6000 .....	8
F. Série 7000 .....	8
1.5.4. Désignation des alliages d'Aluminium .....	9
A. Alliages corroyé .....	9
B. Alliages fonderie .....	9
I.6. Avantages et inconvénients de l'Aluminium .....	9
I.6.1. Avantages .....	9
I.6.1.1. Sa rigidité .....	10
I.6.1.2. Durable .....	10
I.6.1.3. Résistance à la corrosion .....	10
I.6.1.4. Économique .....	10
I.6.1.5. Malléable .....	10
I.6.1.6. Conductivité .....	10
I.6.1.7. Recyclage .....	11
I.6.1.8. Soudage .....	11
I.6.2. Inconvénients de l'Aluminium .....	11
I.6.2.1. Un matériau peu résistant aux chocs .....	11
I.6.2.2. Un matériau au prix plus élevé .....	11

## **Chapitre II :**

### **Comportement à l'impact des matériaux métalliques**

II.1. Introduction .....	12
II.2. Définition d'un choc .....	12
II.3. Energie cinétique .....	13
II.4. Catégories d'impact .....	13
II.5. Comportement à l'impact des matériaux métalliques .....	14
II.6. Études expérimentales et numériques d'impact sur matériaux .....	15

II.6.1. Caractéristiques du projectile et son influence .....	15
II.6.2. Effet de la forme du projectile sur les performances à l'impact .....	16
II.6.3. Épaisseur de la plaque à utiliser .....	16
II.6.4. Influence des propriétés de la plaque .....	16
A. Rupture ductile .....	16
B. Fissures .....	16
C. Le cisaillement adiabatique localisé .....	17
D. Ecaillage .....	17
E. Erosion .....	17
II.7. Simulation numérique de la perforation .....	17
II.8. Etude du comportement mécanique des matériaux .....	18
II.9. Loi de l'écoulement (modèle de Johnson Cook) .....	18
II.10. Domaines d'application de l'impact .....	19
II.10.1. Automobiles .....	19
a. Conditions d'impacts .....	19
II.10.2. Aéronautiques .....	20
a. Conditions d'impacts .....	20
b. Crash sur vivable .....	20
c. Choc à l'oiseau .....	21
II.10.3. Militaires .....	21
a. Impacts de balles .....	21
b. Gillet pare-balle .....	21
c. Casque militaire .....	21

### **Chapitre III :**

#### **Etude du comportement à l'impact des plaques en Aluminium**

III.1. Introduction .....	23
III.2. Définition du modèle .....	23
III.3. Analyse des résultats .....	26
III.3.1. Effet de la vitesse d'impact et la formes de projectile .....	26

III.3.1.1. Influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur les contraintes...	<b>26</b>
III.3.1.2. Influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur les déformations.	<b>28</b>
III.3.2. Effet de diamètre de projectile sur les contraintes et les déformations.....	<b>29</b>
III.3.3. Effet de l'angle d'impact sur les déformations des plaques .....	<b>31</b>
III.3.4. Effet de la masse de projectile sur les déformations .....	<b>32</b>
Conclusion générale.....	<b>33</b>
Bibliographie .....	

# Liste des figures

## Chapitre I :

<b>Figure I.1</b> : Procédés de fabrication de l'Aluminium .....	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b> : : Procédés de fabrication de l'Aluminium .....	<b>6</b>
<b>Figure I.3</b> : Désignation des alliages corroyés .....	<b>9</b>
<b>Figure I.4</b> : Désignation des alliages fonderie .....	<b>9</b>

## Chapitre II :

<b>Figure II.1</b> : Exemples d'impact de projectiles sur des structures dans le domaine des transports .....	<b>12</b>
<b>Figure II.2</b> : Différentes géométries de projectile à queue cylindrique. a- projectile plat ; b-projectile conique ; c- projectile hémisphérique ; d- projectile ogive.....	<b>15</b>
<b>Figure II.3</b> : Différents modes de rupture .....	<b>17</b>

## Chapitre III:

<b>Figure III.1</b> : Représentation schématique des plaques utilisées .....	<b>24</b>
<b>Figure III.2</b> : Représentation schématique des projectiles utilisées .....	<b>24</b>
<b>Figure III.3</b> : Conditions aux limites des plaques .....	<b>25</b>
<b>Figure III.4</b> : Maillage de la plaque .....	<b>25</b>
<b>Figure III.5</b> : Modélisation des projectiles utilisés .....	<b>25</b>
<b>Figure III.6</b> : L'effet de la vitesse de projection sur l'intensité de contraintes cas de L'Aluminium H116-5080 .....	<b>27</b>
<b>Figure III.7</b> : L'effet de la vitesse de projection sur l'intensité de contraintes cas de	

L'Aluminium T6-6061.....	27
<b>Figure III.8 :</b> L'effet de la vitesse de projection sur les déformations cas de l'Aluminium H116-5080 .....	28
<b>Figure III.9 :</b> L'effet de la vitesse de projection sur les déformations cas de l'Aluminium T6-6061 .....	28
<b>Figure III.10:</b> L'effet du diamètre de projectile sur les contraintes et déformations cas du D=16mm .....	29
<b>Figure III.11:</b> L'effet du diamètre de projectile sur les contraintes et déformations cas du D=19mm .....	30
<b>Figure III.12 :</b> L'évolution des déformations en fonction de l'angle d'impact .....	31
<b>Figure III.13 :</b> L'effet de la masse de projectile sur les déformations .....	32

## Liste des tableaux

### Chapitre II :

<b>Tableau II.1</b> : Catégories d'impact .....	<b>13</b>
---	-----------

### Chapitre III :

<b>Tableau III.1</b> : Propriétés des alliages d'Aluminium utilisés .....	<b>26</b>
<b>Tableau III.2</b> : paramétré de Johnson-Cook des alliages d'Aluminium .....	<b>26</b>
<b>Tableau III.3</b> : paramétré d'endommagement Johnson-Cook des alliages d'Aluminium [Damage paramètre] .....	<b>26</b>

## Nomenclature

**$\sigma$**  : Contrainte équivalente

**$\epsilon$**  : La déformation plastique

**$\dot{\epsilon}$**  : La vitesse de déformation.

**$T$**  : La température.

**$\epsilon_f$**  : La déformation à la rupture.

**$A$**  : La limite élastique

**$B$**  : Constante d'écrouissage.

**$n$**  : Coefficient d'écrouissage.

**$m$**  : Coefficient d'adoucissement thermique.

**$C$**  : Coefficient vitesse de déformation.

**$T_m$**  : Température de fusion.

**$D_1$**  : Défaillance de contrainte initiale.

**$D_2$**  : Facteur d'exponentielle.

**$D_3$**  : Facteur de tri-axialité.

**$D_4$**  : Facteur de vitesse de déformation.

**$D_5$**  : Facteur de température.

# *Introduction générale*

# *Introduction générale*

Malgré l'apparition de nouveaux matériaux comme les composites à base de fibres et les structures sandwiches, les matériaux métalliques gardent leurs importance et leurs place dans le domaine de l'industrie. Aujourd'hui, on utilise les matériaux métalliques dans de très nombreux domaines comme le transport, le bâtiment, l'outillage, la médecine, les ustensiles de cuisine, l'électricité, l'électronique et bien d'autres...

L'un des problèmes posés par l'analyse de sûreté des installations, est de caractériser le comportement des structures lorsqu'elles subissent l'impact. Il s'agit en général de vérifier que les déformations d'ensemble restent acceptables, ou de démontrer que même endommagées, les structures permettent l'arrêt de l'installation en toute sécurité.

Ce mémoire est structuré sur deux grandes parties, une partie théorique ou bibliographique et une deuxième partie analytique (numérique).

- ✓ La première partie constituée de deux chapitres présentera dans un premier temps des généralités sur les alliages d'Aluminium, les différents types d'Aluminium, leurs compositions et leurs domaines d'utilisation.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, généralités sur l'impacte, catégories d'impact, modèles numériques pour les matériaux métalliques, loi de l'écoulement.
- ✓ Dans le dernier chapitre (partie analytique), une modélisation numérique du comportement des plaques en Aluminium H116-5080 et T6-6061 impactée à faibles vitesses avec différents projectiles (conique, cylindrique, hémisphérique) a été réalisée, ainsi qu'une étude de l'influence de la masse, diamètre et l'angle de projection de projectile sur la contrainte et la déformation....etc

# *CHAPITRE 1*

## Généralité sur les alliages D'Aluminium



## I.1. Introduction

L'Aluminium est l'élément métallique le plus abondant dans la nature, il vient au second rang des métaux les plus employés après l'acier. Il est léger, robuste, facile à usiner, économique et résistant à la corrosion. Il est un métal blanc tirant légèrement sur le bleu, dont on obtient facilement un beau fini poli.

L'Aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendéléiev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C. Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées, avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa masse volumique est 2.7 kg/dm<sup>3</sup>, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de 23.10<sup>-6</sup>, son module de Young de 6600 bar.

L'Aluminium industriel contient 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique (Al > 99.99%) [1].

Ces impuretés ont différents effets sur leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

Les propriétés d'Aluminium peuvent être améliorées par des traitements thermique et mécanique, ainsi par l'addition des éléments comme le Mg, Si, Mn, etc... A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde  $Al_2O_3$  (alumine), épaisse et adhérente, qui protège le métal des effets, mécaniques et physiques et les attaques chimiques. [2]

## I.2. Comment l'Aluminium est-il fabriqué ?

La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en Aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'Aluminium et être la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe ( $Na_3AlF_6$ ) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. [3]

### I.2.1. La Bauxite

L'Aluminium est un métal très commun sur terre et est le troisième élément après l'oxygène et le silicium.

La bauxite (40-60%), une roche riche en Aluminium, est actuellement presque la seule source de ce métal. [4]

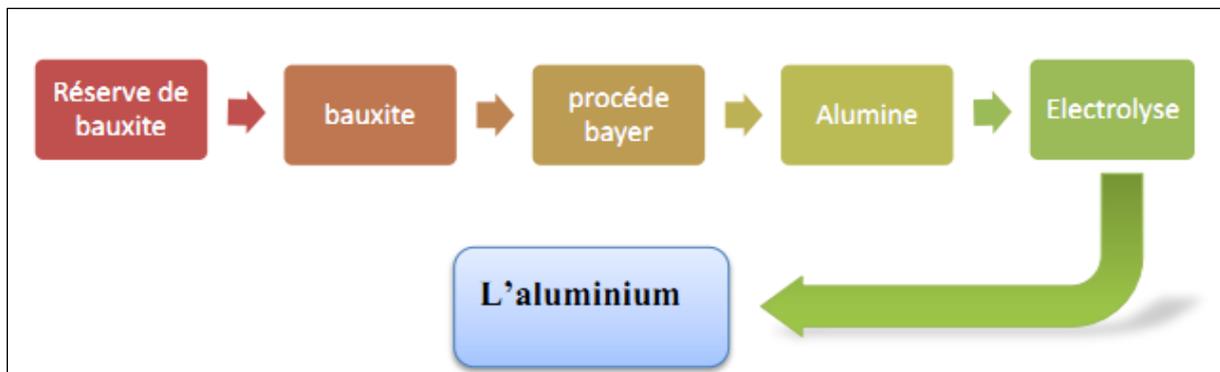
### I.2.2. L'Alumine

L'alumine est obtenue à partir de la bauxite selon le procédé Bayer. La bauxite est broyée et attaquée thermiquement avec de la soude. Une fois la lessive obtenue et l'oxyde de fer et l'oxyde de silicium séparés, elle est introduite dans le décomposeur pour précipiter l'oxyde d'Aluminium. [4]

### I.2.3. L'Aluminium

L'Aluminium est obtenu à partir d'alumine par électrolyse dans des Réservoirs à revêtement de carbone (cathode).

L'Aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.[5]



***Figure I.1 : Procédés de fabrication de l'Aluminium***

## I.3. Propriétés de l'Aluminium

### I.3.1. Physico – Chimiques

L'Aluminium est un élément du groupe III du tableau périodique. Il a le numéro atomique  $Z = 13$ . Il a une structure cubique à faces centrées (CFC) et un paramètre  $a = 4,0412$  Å. L'Aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. C'est un métal blanc brillant d'une densité de 2,7 qui fond à  $660^{\circ}\text{C}$ .

Il est assez doux et facile à jouer. Travailler de préférence entre  $100$  et  $150^{\circ}\text{C}$ . Cela signifie que des pièces avec une grande variété de géométries très complexes peuvent être produites sans aucun problème.

L'Aluminium est pratiquement imperméable à l'air car il est recouvert d'une fine couche protectrice d'oxyde d'Aluminium. L'eau distillée, l'eau de pluie et la vapeur d'eau n'affectent

pas sensiblement l'Aluminium. Attaque l'eau de mer. Les acides, comme le peroxyde d'hydrogène, ont peu d'effet sur l'Aluminium.

Par contre, il attaque fortement la soude, le carbonate de soude, le chlorure de magnésium et le chlorure de calcium en solution.

### **I.3.2. Mécaniques**

La demande pour des produits en Aluminium ou intégrant de l'Aluminium dans leur composition ne cesse de croître année après année. Au-delà de la croissance démographique mondiale et de l'augmentation du pouvoir d'achat dans les pays émergents, la consommation d'Aluminium augmente aussi par l'effet de substitution (l'Aluminium remplaçant progressivement d'autres matériaux) grâce à une combinaison unique de propriétés telles que légèreté, résistance mécanique et résistance à la corrosion, conductivité, ductilité, recyclabilité et de nombreuses autres propriétés.

#### **A. Légèreté**

L'Aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm<sup>3</sup>) ou du cuivre (8,96 g/cm<sup>3</sup>).

#### **B. Résistance mécanique**

L'Aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'Aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'Aluminium est adaptée à l'application requise. A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'Aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

#### **C. Résistance à la corrosion**

Sa résistance à la corrosion est élevée car le métal, bien que très oxydable, se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice (couche naturelle étanche d'alumine < 0,1 μm). Les éléments d'addition diminuent plus ou moins cette résistance.

#### **D. Conductivité thermique et électrique**

L'Aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'Aluminium est utilisée dans de nombreuses applications

d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules). A poids égal, l'Aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.

### **E. Ductilité, malléabilité**

L'Aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées, une ductilité élevée ( $A\% \approx 40\%$ ).

### **F. Recyclable**

L'Aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire.

### **G. Imperméabilité, effet barrière**

Même à très faible épaisseur, une feuille d'Aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.

### **H. Propriétés réfléchissantes**

L'Aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie. [6]

#### **I.3.3. Propriétés de mise en forme**

L'Aluminium a un point de fusion relativement bas d'environ 660 °C, cela permet une fusion aisée, avantage décisif pour les opérations de coulée. L'Aluminium est très ductile et peut être facilement mis en forme par déformation plastique à l'état solide. Il peut être façonné soit par moulage, soit par fonderie.

- **A froid** : Laminage, filage, cintrage, emboutissage ... ;
- **A chaud** : Fonderie, soudure, usinage... ; [7]

## I.4. Domaines d'utilisation

L'Aluminium est malléable et ductile ce qui permet un usinage facile. Avec un point de fusion bas 660°C contre 1500°C pour le fer – il se prête facilement au moulage de petites pièces, de plus l'économie d'énergie faite lors de sa fabrication est considérable.

Depuis l'apparition de l'électrolyse en 1887 le coût de production de l'Aluminium a chuté. Les secteurs des transports, de la construction, de l'emballage et de la vie quotidienne constituent les marchés les plus importants pour les produits en Aluminium. Les autres utilisations concernent les équipements électriques, la mécanique, la chimie et la pharmacie.

- **Le bâtiment** : Facilement malléable et résistant en alliages, l'Aluminium permet de réaliser des formes complexes dans une gamme étendue de coloris. Il est donc très apprécié en architecture moderne et ne nécessite que très peu d'entretien.

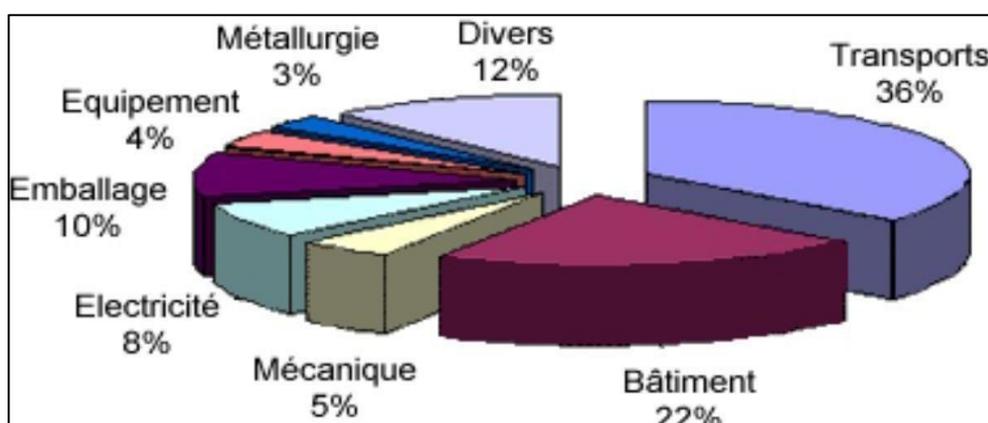
- **Le transport** : Aéronautique, automobile, train, bateau...

Il est apprécié dans ce domaine grâce à sa légèreté qui permet de réduire la consommation et les émissions de carburant. De plus il se lie facilement avec du cuivre de silicium ou de magnésium pour former des alliages résistants qui évacuent bien la chaleur, idéal pour les moteurs. Son utilisation réduit également le bruit et les vibrations.

- **L'électricité** : L'Aluminium est particulièrement apprécié dans ce domaine grâce à sa conductivité électrique élevée, son absence de magnétisme et son inertie chimique. L'Aluminium a remplacé le cuivre dans les lignes à haute tension et est aujourd'hui la manière la plus économique de transmettre l'énergie électrique.

- **L'alimentation** : L'emballage en Aluminium est largement répandu du fait de son faible coût de production, sa légèreté et son caractère isolant. Une mince feuille d'Aluminium (0.1 mm environ) suffit à isoler le produit du monde extérieur : Imperméabilité à la lumière, à l'air, aux rayons ultraviolets,

- **Autres utilisations** : Filtrant dans les crèmes solaires, texturant et colorants alimentaires dans les laitages, immunisant dans les vaccins et purifiant dans le traitement des eaux, l'Aluminium est également utilisé à plus faibles quantités dans l'industrie chimique.[8]



**Figure I.2 : Procédés de fabrication de l'Aluminium**

## I.5. Différents types Alliages d'Aluminium

En raison de ses faibles propriétés mécaniques, l'Aluminium pur ne peut pas être utilisé pour construire des structures mécaniques. Cependant, l'ajout d'éléments supplémentaires à l'Aluminium sous forme d'alliages doit être utilisé, certains éléments d'alliage améliorent la résistance mécanique ou la résistance à la corrosion, certains améliorent l'usinabilité, la formabilité, la soudabilité et la résistance aux hautes températures.

Deux grandes familles :

- ✓ **Alliages corroyés** : Obtenu par déformation plastique (par exemple laminage, emboutissage)
- ✓ **Alliages de fonderie (Moulage)** : Obtenus par fonderie seulement écrouer. [9]

### I.5.1. Les Alliages Corroyés

Cette famille-là plus populaire comprend les barres, les profilés, les tôles, les plaques et les bandes de tous les produits laminés courants. Produits de filature et d'étréage Fils. Forgeage ou produits destinés au forgeage, etc.

Les principales propriétés requises de ces alliages sont, selon les applications :

- *Résistance mécanique*
- *Ductilité*
- *Résistance à la propagation des fissures*
- *Résistance à la fatigue (efforts alternés)*
- *Résistance aux multiples formes de corrosion*
- *Conductibilité électrique.* [10]

### I.5.2. Les Alliages Fonderie

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire. Inconvénient : grand retrait au moulage (3,5 à 8,5% en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce. Beaucoup des alliages usuels contiennent suffisamment de silicium pour entraîner une réaction eutectique, ce qui donne aux alliages un bas point de fusion, une bonne fluidité et une bonne mouillabilité.

Le moulage en moule métallique ("en coquille", sous pression...) amène un refroidissement plus rapide que les autres procédés (sable...), ce qui provoque un affinage du grain et une amélioration des propriétés mécaniques. Les additions de bore et de titane provoquent également un affinage du grain. Le cuivre, le magnésium et le zinc engendrent ou favorisent le phénomène de maturation.

### **I.5.3. Caractéristiques des alliages**

#### **A. Série 1001**

Cet alliage, auquel peut être ajouté du magnésium, se caractérise par une excellente résistance mécanique, justifie généralement le coût élevé ("le duralumin" est particulièrement apprécié, ses propriétés sont vieillissement après revenu). Si le comportement à haute température est très correct, il n'en est pas de même en raison de sa soudabilité ou de sa résistance à la corrosion.

#### **B. Série 3003**

Un alliage de manganèse avec une excellente durabilité dans l'atmosphère océanique et dans l'eau de mer.

#### **C. Série 4000**

Cet alliage est composé d'Aluminium et de silicium et est principalement utilisé comme métal d'apport dans la fabrication de soudage.

#### **D. Série 5000**

Cet alliage Aluminium-magnésium relativement coûteux est exceptionnel, résistant à la corrosion, notamment à l'eau de mer, ce qui le rend intéressant malgré ses qualités mécaniques somme toute assez moyenne.

#### **E. Série 6000**

Ajoutez simplement une touche de silicium au précédent composé d'aluminium et de magnésium de la série 5000

Additif secondaire pour obtenir les alliages légers les plus couramment utilisés dans les applications structurelles.

Excellente inertie chimique contre divers agents corrosifs et très bonne soudabilité. Il est nécessaire

Notez cependant que même le cordon de soudure a une résistance considérablement réduite.

#### **F. Série 7000**

Alliage à base de zinc avec un mélange secondaire de magnésium, ce métal présente les caractéristiques suivantes : Modérément corrosif avec une résistance mécanique et une soudabilité adéquates restriction spéciale [11]

### I.5.4. Désignation des alliages d'Aluminium

#### A. Alliages corroyés



Figure I.3: désignation des alliages corroyés

#### B. Alliages fonderie

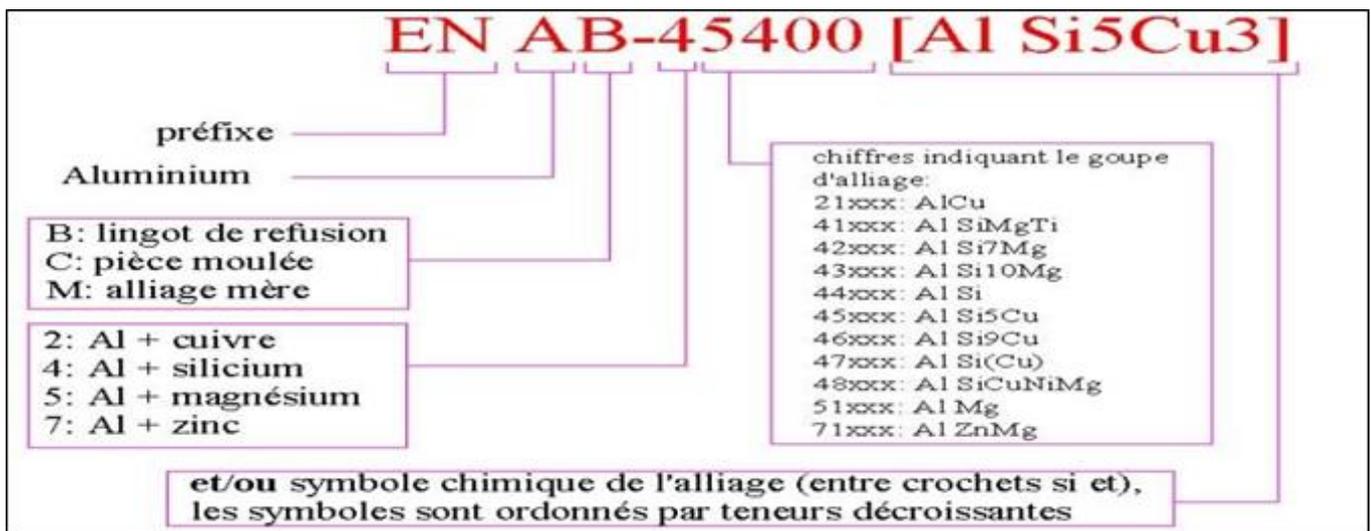


Figure I.4: désignation des alliages fonderie

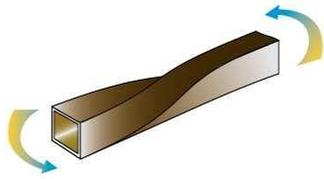
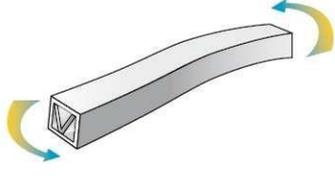
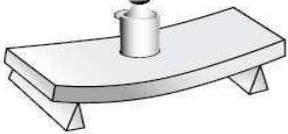
### I.6. Avantages et Inconvénients de l'Aluminium

#### I.6.1. Avantages

L'Aluminium est un matériau extraordinaire en raison de ses nombreux avantages, sa longue durée de vie, son entretien minimal et sa contribution à l'efficacité énergétique, pour n'en nommer que quelques-uns, le rendent particulièrement populaire dans les secteurs de la construction, des infrastructures et des transports.

**I.6.1.1. Sa rigidité**

Il est plus haut que l'acier car il a une section transversale plus importante et le matériau permet un meilleur profil que l'acier.

	Acier	Aluminium
<b>Résistance à la torsion</b>		
<b>Résistance à la flexion</b>		
<b>Résistance au flambage</b>		

**I.6.1.2. Durable**

L'Aluminium est très résistant à la corrosion et peut faire le travail avec un minimum d'entretien. Cependant, une sélection appropriée des alliages et des méthodes d'assemblage est essentielle pour assurer une durabilité maximale.

**I.6.1.3. Résistance à la corrosion**

Une couche d'oxyde solide ( $Al_2O_3$ ) se forme naturellement à la surface de l'Aluminium au contact de l'air. Cette passivation naturelle agit comme une barrière entre l'atmosphère et l'Aluminium, protégeant l'alliage d'Aluminium de la corrosion.

**I.6.1.4. Économique**

L'Aluminium est facile à entretenir, ce qui réduit les coûts de maintenance à long terme. Aucune précaution n'est nécessaire pour conserver ses propriétés.

En bref, l'Aluminium nécessite le moins d'investissement et a le plus grand impact économique et social.

**I.6.1.5. Malléable**

L'Aluminium est un métal facile à travailler. Son point de fusion relativement bas est un avantage pour les fonderies. De plus, l'Aluminium est un métal ductile.

Cela rend le métal facilement accessible au laminage, au forgeage, à l'extrusion et à tous les autres types de déformation par déformation plastique.

#### **I.6.1.6. Conductivité**

L'Aluminium est un excellent conducteur électrique et thermique. L'Aluminium est utilisé dans les fils haute tension en raison de son rapport conductivité/densité. Il est également très courant d'utiliser l'Aluminium dans les systèmes de transfert de chaleur tels que les échangeurs de chaleur des climatiseurs, les radiateurs de voiture, etc.

#### **I.6.1.7. Recyclage**

L'Aluminium est l'un des matériaux les plus recyclés. Près de 75 % de l'Aluminium produit dans le monde est encore utilisé aujourd'hui depuis le début de la production industrielle. L'Aluminium peut être recyclé indéfiniment dans une véritable boucle fermée. Le recyclage de l'Aluminium est relativement facile et utilise 95 % moins d'énergie que le processus d'électrolyse. L'économie de l'Aluminium contribue également à son statut de l'un des métaux les plus recyclés au monde. [12]

#### **I.6.1.8. Soudage**

Le soudage est aisé grâce à la présence d'une couche protectrice d'oxyde d'Aluminium. Le procédé est donc sous gaz protecteur (TIG, MIG) ou sous vide (faisceau d'électrons). Cependant, s'il n'y a pas de problème avec les alliages non Trempés, des problèmes peuvent survenir avec les alliages à taux de trempe élevés (série 2000 ou Al-Cu). La corrosion par exfoliation peut se produire même après le soudage des séries 7000 et des alliages Al-Zn.

### **I.6.2. Inconvénients de l'Aluminium**

#### **I.6.2.1. Un matériau peu résistant aux chocs**

Bien sûr, l'Aluminium est un métal solide, mais lorsqu'il est fin, il est moins malléable, ce qui signifie qu'il ne peut pas résister aux coups et aux chocs sans se déformer ni s'enfoncer. Cependant, plus l'Aluminium est épais, plus il est durable. Si cette solution n'est pas possible, elle doit être associée à un métal plus résistant.

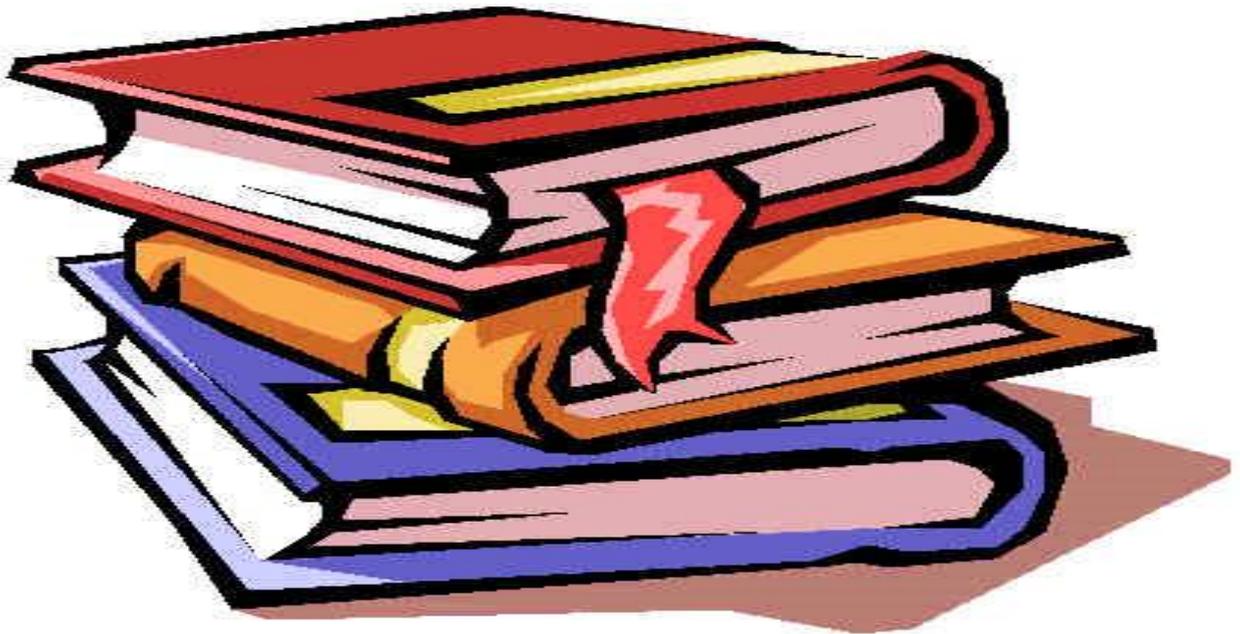
#### **I.6.2.2. Un matériau au prix plus élevé**

L'Aluminium est plus cher que le bois et beaucoup plus cher que le PVC, Car selon les éléments que vous construisez avec de l'Aluminium, vous devrez prévoir Un budget 3 à 10 fois plus élevé que n'importe quel autre matériau. [13]

# *CHAPITRE 2*

Comportement à l'impact  
des matériaux

Métalliques



## II.1. Introduction

Tous les matériaux ont une limite élastique qui correspond à une charge critique au-delà de laquelle la composante matérielle devient irréversible. Une rupture soudaine (dans le cas du verre), une rupture progressive (dans le cas du béton), ainsi qu'une déformation plastique du matériau peuvent se produire. Cela signifie que la forme change de manière irréversible proportionnellement à l'effort. Cela est particulièrement vrai lorsque l'instabilité de déformation plastique de nombreux matériaux, métaux ou polymères, se produit généralement dans des processus où le taux de déformation est important, par opposition aux régimes élastiques où les solides retrouvent leur forme d'origine. En usinage à grande vitesse, déformations causées par des formes explosives ou magnétiques et des impacts de véhicules ou de projectiles.

Ce chapitre présente une formulation de la loi de comportement adaptée aux grandes déformations plastiques et aux faibles vitesses de déformation.

## II.2. Définition d'un choc

En mécanique, un choc correspond à une application momentanée d'une grande force, généralement accompagnée d'un changement rapide de vitesse. L'impact peut être défini comme un cas particulier où un projectile frappe une surface. Les impacts à haute énergie semblent causer les dommages les plus graves, car ils produisent souvent des piqûres. Cependant, les effets à faible énergie ne doivent pas être négligés car ils provoquent des microfissures et un délaminage dans les composites. [14]



***Figure II.1 : Exemples d'impact de projectiles sur des structures dans le domaine des transports***

### II.3. Energie cinétique

Il existe une grande variété de type de chocs possibles qui dépendent de l'énergie cinétique liée à la masse du projectile et à sa vitesse. L'énergie d'impact d'un projectile correspond à son énergie cinétique, donnée par la relation :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots\dots\dots (II.1)$$

Il est donc évident que les deux paramètres principaux régissant l'intensité d'un impact sont la masse et la vitesse du projectile. On remarque que la vitesse du projectile est le paramètre le plus important : lorsqu'on double la vitesse d'un projectile, son énergie cinétique  $E_c$  est multipliée par quatre. Cela conduit à distinguer deux types d'impacts suivants la vitesse du projectile : [15]

- les impacts à faible vitesse (de l'ordre de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- les impacts à forte vitesse (de l'ordre de  $100 \text{ m.s}^{-1}$ ).

### II.4. Catégories d'impact

On peut définir quatre grandes catégories d'impact correspondant à des applications et contextes bien distincts. Tout d'abord, les impacts à basse vitesse. Les vitesses d'impact du projectile sont inférieures à  $10 \text{ m/s}$ .

Ensuite, les impacts à très haute vitesse sont étudiés dans le cadre de protections de satellites ou lanceurs contre des débris spatiaux de très faible masse mais pouvant atteindre des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde.

Il existe également des impacts à haute vitesse et des impacts balistiques qui se situent dans les mêmes domaines de vitesse. [16]

Catégorie	Vitesse [m\s]	Masse [g]	Energie d'impact [J]	Domaine d'application
Basse vitesse	<50	50-30000	1-200	Transports
Vitesse modéré	50-200	1-200	1-4000	Transports
Haute vitesse	200-500	5-500	100-20000	Transports
Balistique	200-600	5-20	100-500	Protection militaire
Très haute vitesses	1000-5000	0.001	Env.100	Aérospatiale

**Tableau II.1 : Catégories d'impacte**

## II.5. Comportement à l'impact des matériaux métalliques

L'impact des structures et des systèmes de protection associés est un sujet de recherche important depuis des décennies. Des efforts considérables ont été déployés pour comprendre physiquement et décrire mathématiquement les phénomènes qui se produisent lors du perçage par impact balistique, mais la complexité de ces phénomènes a largement exclu l'utilisation d'équations analytiques simples. La perforation des panneaux par impact de projectile est un processus complexe, souvent entouré de déformations élastiques et plastiques, d'effets de vitesse de déformation, d'adoucissement thermique, de formation de fissures, de cisaillement adiabatique, de formation de bouchons et de pétales, voire d'étincelles. Plusieurs phénomènes sont impliqués, tels que la possibilité de renflement. Les paramètres les plus importants affectant les performances balistiques de la plaque cible sont le projectile (forme, densité et dureté), les propriétés intrinsèques de la plaque empalée (dureté/résistance, ductilité, microstructure et épaisseur) et vraisemblablement une condition. Tels que la vitesse d'impact, l'angle d'impact et le projectile/plaque en contact.

Avant de poursuivre avec le reste de cette section, il est important de définir la formule suivante : [17]

- **La pénétration :** Interaction projectile-cible conduisant à la formation de cratères non ouvrants
- **La perforation :** Une interaction projectile-cible qui se traduit par un cratère naissant sur la cible, qu'il éjecte ou non des éléments (bouchons) de la cible.
- **Limite balistique,  $V_B$  :** La limite balistique d'une cible est la moyenne de la vitesse maximale de l'impacter (projectile) que la cible peut supporter sans la pénétrer complètement et de la vitesse minimale que la cible peut complètement pénétrer.
- **Vitesse résiduelle,  $V_R$  :** La vitesse résiduelle est la vitesse après que le projectile a complètement pénétré la cible (pas de ricochets).

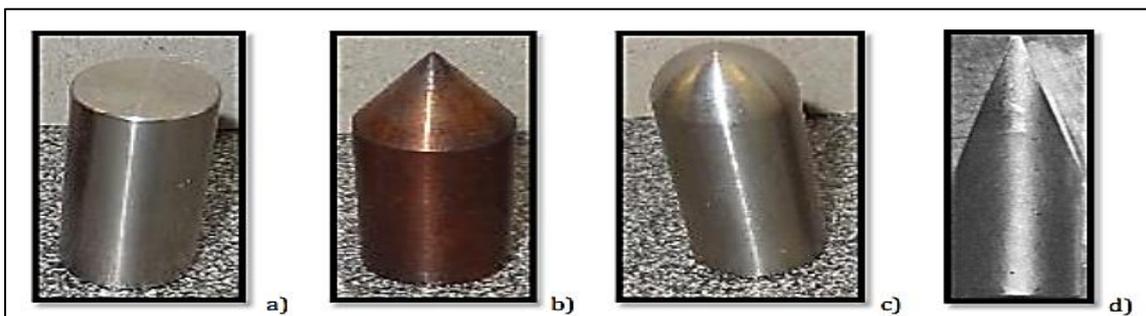
A noter que les notions de limite balistique et de vitesse résiduelle sont difficiles à mettre en œuvre avec précision à un niveau expérimental.

## II.6. Études expérimentales et numériques d'impact sur matériaux métalliques

Les matériaux métalliques sont parmi les plus utilisés pour de la protection face aux impacts. La dominance de cet aspect dans la littérature permet de relever les comportements et les mécanismes d'endommagements, ce qui rend facile l'alimentation des modèles numériques. Concrètement, plusieurs catégories de paramètres peuvent affecter les performances à l'impact telles que la vitesse du projectile, la géométrie des modèles et le choix des matériaux.

### II.6.1. Caractéristiques du projectile et son influence

La forme du projectile, notamment la forme de la queue d'impact, a une grande influence sur les modes de rupture et les limites balistiques de la plaque percée. En 1978, Wilkins [I.21] a présenté plusieurs types d'échec de cible (Lamb). Dépend de la forme du nez du projectile. La majorité des projectiles étudiés dans la littérature sont de forme cylindrique et diffèrent par la forme de la pointe d'impact. Les plus courantes sont les pointes hémisphériques, coniques, aplaties et elliptiques, parfois avec une combinaison de deux de ces formes. Tous ces projectiles ont un axe de symétrie longitudinal, ce qui facilite leur utilisation dans les expériences balistiques. Le diamètre de la partie cylindrique de ces projectiles est variable. Elle est déterminée en fonction des moyens techniques disponibles dans les différents laboratoires traitant des objets d'impact balistique et de l'épaisseur de la plaque à percer. Les matériaux les plus couramment utilisés pour l'usinage de ces instruments de frappe sont très souvent des métaux à base de fer nombreux, dont la dureté va de l'acier doux à 64 HRC ( $R_m \approx 2500$  MPa), jusqu'aux aciers alliés aux géométries les plus complexes. D'autres matériaux tels que l'aluminium (forme pure ou alliée), le magnésium, le cuivre, le laiton, le titane, le tantale, le tungstène, le carbure de tungstène, voire l'uranium appauvri sont également utilisés à des fins balistiques, tout comme divers plastiques et céramiques. Comme le polyéthylène et le verre. [18]



**Figure II.2 : Différentes géométries de projectile à queue cylindrique. a- Projectile plat; b- Projectile conique; c- Projectile hémisphérique; d- Projectile ogive.**

### II.6.2. Effet de la forme du projectile sur les performances à l'impact

Une comparaison des tendances rapportées dans la littérature pour la forme des projectiles similaire lors de l'examen de l'impact sur la tôle. Cependant, il y a quelques écarts observation: D'une part, les projectiles aplatis ont conduit à la formation de bandes de force de cisaillement sous le projectile déclenche en fait l'éclatement. Enfin, ce sont les plus prisés mortels.

D'un autre côté, les projectiles coniques arrondis, en revanche, peuvent être considérés comme légèrement moins critique, il est important car il provoque la formation de zones d'étirement et la formation d'ouvertures sous forme de pétales. Enfin, les projectiles hémisphériques engendrent une déformation des plaques, puis un amincissement en dessous du projectile. Il en résulte la formation et le détachement d'une partie circulaire, accompagnée de la formation de pétales. Les projectiles hémisphériques, de ce fait, sont considérés comme étant les plus favorables. [19]

### II.6.3. Épaisseur de la plaque à utiliser

L'épaisseur de la plaque a également un effet significatif sur la résistance face à des Projectiles d'une forme spécifique. En ce sens, des plaques épaisses (2 à 3mm) utilisant des projectiles ronds (arrondi) offre une meilleure résistance aux chocs, tandis que les Plaque mince (< 1,5 mm) mieux contre les projectiles plats.

### II.6.4. Influence des propriétés de la plaque

Toutes sortes de substances naturelles (pierre, bois, bambou, etc.) ou de produits manufacturés peuvent être concernées. Cependant, les cibles utilisées dans les études discutées plus loin concernent presque tous les types d'acier et d'aluminium. Les plaques métalliques sont considérées comme macroscopiquement homogènes et isotropes.

Il existe plusieurs mécanismes par lesquels les cibles peuvent se briser, et ceux-ci peuvent se produire seuls ou en combinaison. Zukas [20] énumère cinq types possibles d'endommagement des plaques métalliques.

A. **Rupture ductile** : Une partie de l'énergie de l'impacter est absorbée par la plaque par déformation.

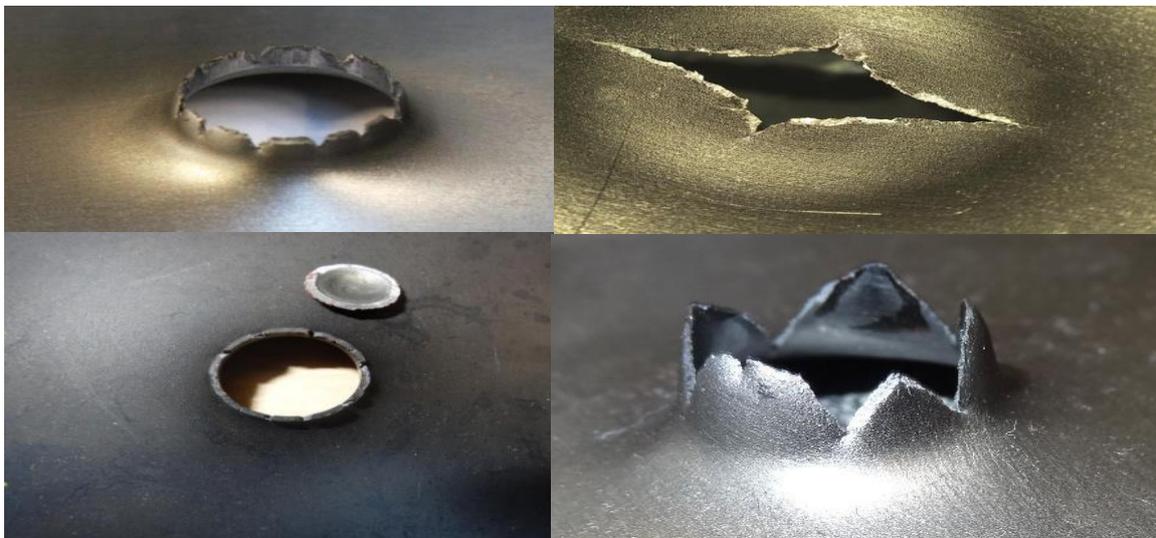
B. **Fissures** : Une partie de la plaque fragile se brise en plusieurs petits morceaux. Cela est particulièrement vrai pour les plaques dures et la céramique.

C. **Le cisaillement adiabatique localisé** : De ce fait, le bouchon est éjecté, la déformation est très localisée dans la zone d'impact, et la plaque absorbe peu d'énergie par rapport à la rupture ductile.

D. **Écaillage** : La réflexion des ondes de choc à l'arrière du panneau. Cette onde de choc se transforme alors en onde de traction. L'amplitude peut être supérieure à la résistance à la traction de la plaque métallique. Ce phénomène conduit à la formation d'un "disque de rupture" au dos de la plaque (surtout pour les plaques très épaisses).

E. **Erosion** : De matière sous l'impact d'un projectile explosif en forme.

Tous ces mécanismes d'endommagement dépendent de divers paramètres, dont les propriétés des matériaux.



*Figure II.3: Différents modes de rupture*

## II.7. Simulation numérique de la perforation

Un ensemble de modèles de rupture et de comportement couramment appliqués aux matériaux métalliques. De plus, la calibration de ces modèles et leurs adaptations à des impacts à grande vitesse et balistiques seront également discutées :

Les lois élémentaires de comportement plastique de matériaux ont été développées depuis les années 1900, Elles sont rarement utilisées aujourd'hui car elles ne sont pas validées sur une large gamme de vitesse de déformation et sont donc devenues des composantes d'autres lois de comportement. Des termes de dépendance à la vitesse de déformation ou à

l'adoucissement lié à la température leur sont habituellement additionnés ou multipliés. Ces lois sont utilisées pour des vitesses de déformation jusqu'à  $1000 \text{ s}^{-1}$ . [21]

Pour ce qui a trait aux matériaux métalliques ductiles, tels que l'acier et les aluminiums, il est généralement reporté que la contrainte d'écoulement peut évoluer selon plusieurs paramètres.

Par exemple, la vitesse de déformation, la température et l'écroutissage quasi-statique. Le modèle de Johnson et Cook (1985) est l'un des modèles de comportements les plus couramment utilisés, étant donné sa simplicité de calibrage. En effet, plusieurs études, telles que celles effectuées par Gupta et al. (2007), Xiaoqing Teng et al. (2007) et Iqbal et Gupta (2008) intègrent Johnson et Cook (1985) dans leurs modèles d'impact sur plaques métalliques.

## II.8. Etude du comportement mécanique des matériaux

Les matériaux peuvent réagir de différentes manières lors d'un stress. Ceux-ci incluent le chauffage thermique, la déformation élastique, la déformation plastique, la formation et la croissance de microcavités ou de microfissures. Le modèle comportemental est la relation liant la contrainte appliquée à la température, à la déformation et à la vitesse de déformation. Les modèles d'endommagement, d'autre part, sont des relations qui décrivent l'état de dégradation du matériau depuis le début de la fissure jusqu'à l'initiation macroscopique. Les modèles de mouvement et d'endommagement concernent la mécanique des milieux continus. La mécanique de la rupture permet de formuler l'évolution de la fissure et les phénomènes de rupture ultérieurs. [22]

## II.9. Loi de l'écoulement (Modèle de Johnson Cook)

La relation entre la contrainte et la déformation dans les matériaux métalliques peut être décrite par le modèle **Johnson-Cook**, dans des conditions de grande déformation, de vitesse de déformation élevée et de températures élevées. Étant sous une forme simple et comme il nécessite moins d'efforts pour estimer les constantes des matériaux, il a été largement utilisé par des constructeurs automobile et chercheurs pour prédire le comportement des matériaux en simulation ; dans le cas d'étude de choc (grande déformation). Le modèle de contrainte (JC) est exprimé comme suit :

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)) (1 - T^* \wedge m) \quad \dots\dots\dots \text{(II.1)}$$

Où  $\sigma$  est la contrainte équivalente et  $\varepsilon$  la déformation plastique équivalente. Les constantes matérielles sont  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  et  $m$ .  $A$  est la limite élastique du matériau dans les conditions de référence,  $B$  est la constante d'écrouissage,  $n$  est le coefficient d'écrouissage,  $C$  est le coefficient de renforcement de la vitesse de déformation et  $m$  est le coefficient d'adoucissement thermique.

Les trois composantes entre parenthèses de l'équation représentent, de gauche à droite, **l'effet de durcissement par déformation**, l'effet de **renforcement de la vitesse de déformation** et **l'effet de la température, qui influencent** les valeurs de contrainte. Dans le modèle de contrainte d'écoulement,  $\dot{\varepsilon}^*$  et  $T^*$  sont :

$$\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_{ref}}, \dots\dots\dots(II.2)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \dots\dots\dots(II.3)$$

## II.10. Domaines d'applications de l'impact

### II.10.1. Automobiles

#### a). Conditions d'impact

Le comportement des véhicules lors d'un crash est un sujet d'étude actuel dont le but est de minimiser l'impact du crash sur les passagers. Pour cela, on cherche à maximiser la dissipation de l'énergie du crash par déformation des composants matériels entourant les passagers. [23]

Dans l'automobile, on distingue typiquement trois vitesses de chocs représentatives des conditions d'utilisation :

✓ **Chocs à 5 km/h** : essai réalisé conformément à la directive européenne ECE 42. Le choc doit être entièrement repris par le bouclier avant avec absence complète de défauts visible ou cachés.

✓ **Chocs à 15 km/h** : essai propre aux compagnies d'assurance, destiné à apprécier les coûts de réparation et donc le niveau des primes d'assurance. L'essai consiste à provoquer l'impact du véhicule contre un mur rigide. Le choc est repris par un système d'absorbants sous forme de cônes en composites BMC (*Bulk Molding Compound*) qui, grâce à la ruine

progressive du matériau, permettent une absorption d'énergie suffisante sur les premiers 100 mm d'écrasement.

✓ **Chocs à 50 km/h** : essai consistant à projeter frontalement le véhicule contre un mur conformément à la directive ECE 12. Pour être conforme, il faut que l'habitacle conserve son intégrité, que le déplacement du tablier soit inférieur à 150 mm et celui du volant inférieur à 127 mm. Les portes doivent rester fermées et pouvoir s'ouvrir après le choc.

Afin de respecter ces critères, le principe retenu est celui de l'absorption de l'énergie cinétique par le bloc avant et le début du plancher grâce à la capacité des composites à absorber l'énergie sous forme d'une destruction progressive du matériau. [24]

## II.10.2. Aéronautiques

### a). Conditions d'impacts

Contrairement aux applications automobiles, le coût élevé des composites à base de Kevlar ou de Carbone n'est pas rédhibitoire dans le domaine de l'aéronautique. Les composites époxy/Kevlar ou époxy/Carbone sont donc très utilisés dans la construction aéronautique pour leurs performances mécaniques supérieures et l'allègement qu'ils entraînent. La tendance actuelle veut que la part de composite dans les avions se substitue de plus en plus à celle de l'aluminium.

Les deux impacts typiquement rencontrés dans l'aéronautique civile ou militaire sont :

- les crashes survivables (moins de  $11 \text{ m.s}^{-1}$ ),
- les chocs à l'oiseau (de  $100$  à  $600 \text{ m.s}^{-1}$ ).

### b). Crash survivable

Le concept de crash survivable est très précisément défini puisqu'il est l'objet d'une norme militaire Américaine : Mil STD 1290. Cette norme fixe notamment la vitesse verticale maximale à  $10,5 \text{ m.s}^{-1}$  en dessous de laquelle un crash est dit survivable. Plus explicitement, cela signifie qu'en dessous d'une vitesse de chute de  $10,5 \text{ m.s}^{-1}$  la déformation des composants de l'appareil doit suffisamment absorber l'énergie d'impact pour permettre la survie du personnel naviguant.

L'exemple le plus évident de l'utilisation des matériaux composites dans une telle application est celui de l'hélicoptère Européen Tigre. Celui-ci est sensé survivre à 85 % des crashes survivables grâce à l'absorption du choc par son train d'atterrissage, son fuselage et ses

sièges. Le fuselage du Tigre est composé d'une matrice époxy à renfort mixte de fibres de Carbone et de Kevlar.

### **C). Choc à l'oiseau**

Depuis les débuts de l'aviation motorisée, la collision des avions avec des oiseaux, couramment appelée "Choc à l'oiseau", a toujours représenté un danger majeur. Ce problème s'est aggravé avec l'augmentation de la puissance des avions et la densification du trafic aérien. Les chocs à l'oiseau sont des impacts de type « petite masse/grande vitesse » puisque la masse moyenne des oiseaux percutés est d'environ 600 g pour une vitesse comprise entre 100 et 600 m.s<sup>-1</sup> [15]. Les tests expérimentaux utilisent généralement un canon à air comprimé permettant de projeter des carcasses de poulets morts (d'où le nom de canon à poulets). Cependant suite à certains problèmes d'hygiène, des projectiles de substituts ayant les mêmes propriétés d'impact ont été développés. On peut, par exemple, utiliser des mélanges d'eau et de gélatine bovine moulés selon des formes particulières. [25]

## **II.10.3. Militaires**

### **a). Impacts de balles**

Les impacts causés par les balles des armes à feu sont des impacts de type « faible masse/très haute vitesse ». Les balles pèsent de 2,6 g (22.LRHV) à 15,55 g (Magnum 44) et sont propulsés à des vitesses de 200 à 900 m.s<sup>-1</sup>.

Les impacts de balles sont aussi caractérisés par une très faible surface d'impact et une grande dureté du projectile vis à vis de la surface impactée. La combinaison de ces deux aspects provoque généralement des dommages de type perforation. Le comportement des composites soumis à des impacts balistiques est bien connu. [26]

### **b). Gillet pare-balle**

Les gilets pare-balle sont les armures des temps modernes. Conçus pour résister à certaines armes à feu, les gilets pare-balle sont constitués de matériaux capables de résister à la perforation des balles. Il est à noter cependant que les gilets pare-balle n'emmagent pas totalement l'énergie de l'impact d'une balle et les utilisateurs portent souvent des bleus (contusions) aux endroits même des impacts.

### **c). Casque militaire**

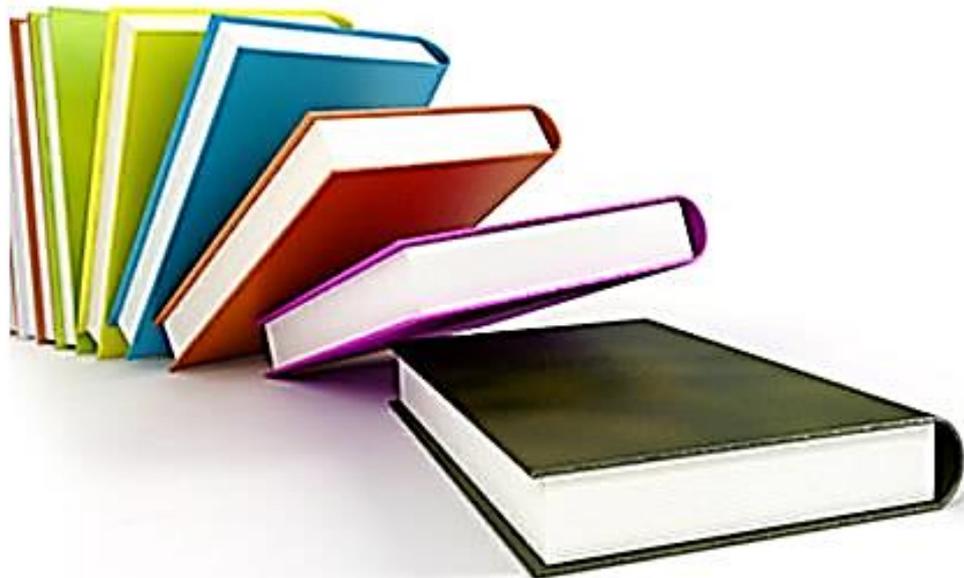
Le casque de combat est un des équipements militaires les plus anciens de par l'importance vitale de la zone qu'il est censé protéger. Les statistiques des combats modernes sont explicites : la tête reçoit environ 20% des blessures pour une surface représentant environ

9% de la surface du corps exposée en combat.

Pendant longtemps les casques militaires étaient uniquement composés de métal. Jusqu'à la seconde guerre mondiale le casque de combat était composé d'une coque en acier dur pour un poids de 0,5 à 1,8 kg. Ce n'est qu'à partir des années 80 que les casques en *Aramide* ont fait leurs premières apparitions dans certaines unités d'élites (Forces Spéciales, au début des années 1970, l'*US Army* a développé un nouveau type de casque plus léger et protecteur : le PASGT (*Personal Armor System Ground Troops*). Ce casque utilise une structure multicouche de fibres Aramides de Kevlar en substitut de l'acier.

# *CHAPITRE 3*

## **Etude du comportement à l'impact des plaques en Aluminium**



### III.1. Introduction

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. 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 [27].

Les codes de calculs par éléments finis constituent un moyen précieux de prédire le comportement au choc, même s'ils présentent certaines limites, telles que la finesse du maillage nécessaire, le temps de calcul ou la prise en compte de non linéarités matériaux (comportement élasto-visco-plastique des matériaux). Dans notre cas, les simulations sont réalisées avec le code de calcul numérique explicite ABAQUS.

### III.2. Définition du modèle

Ce n'est pas toujours facile de maîtriser les mécanismes de l'absorption d'énergie et ceux de rupture pour des chargements de type impact et perforation, 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 [28].

Cette étude rentre dans ce contexte et a pour objectif l'analyse de l'effet d'impact d'un projectile sur le comportement des plaques métalliques au choc mécanique modérée (résistance à l'impact). Cette analyse permet donc la prédiction du comportement de ces plaques aux chocs mécanique. Pour ce faire, des plaques en Aluminium, H116-5080 et T6-6061 de formes carrée et de dimensions  $130 \times 130 \times 1 \text{ mm}^3$  ont été analysées suivant différentes, formes de projectiles, différentes vitesses d'impacts et différents angles de projection. Les (figure III.1) et (figure III.2) représentent la forme de plaques et de projectiles utilisés.

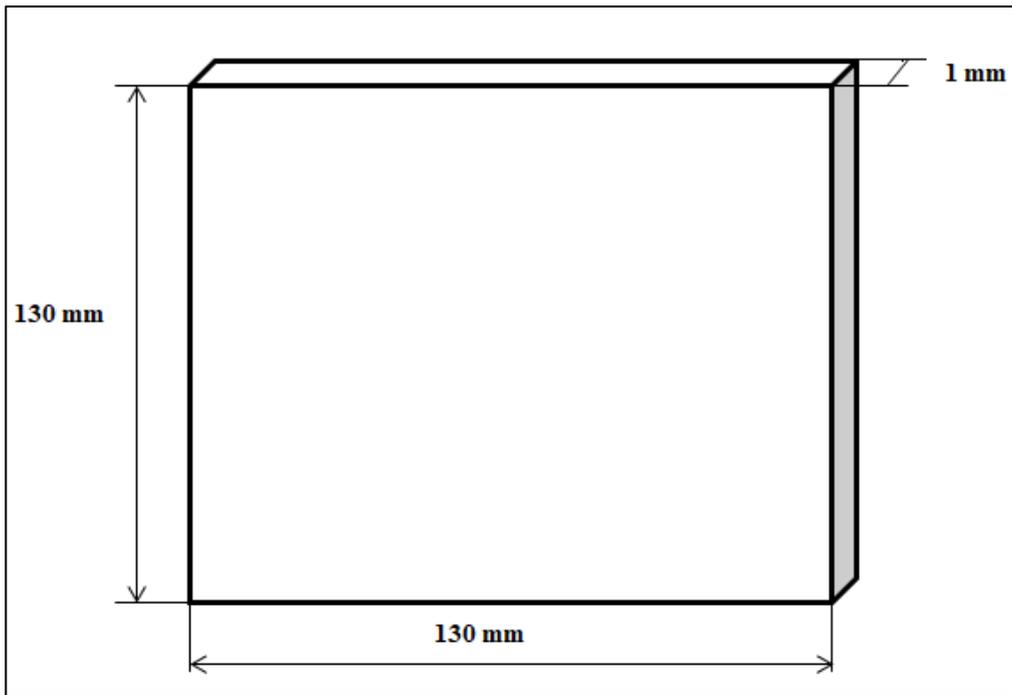


Figure III.1 : Représentation schématique des plaques utilisées

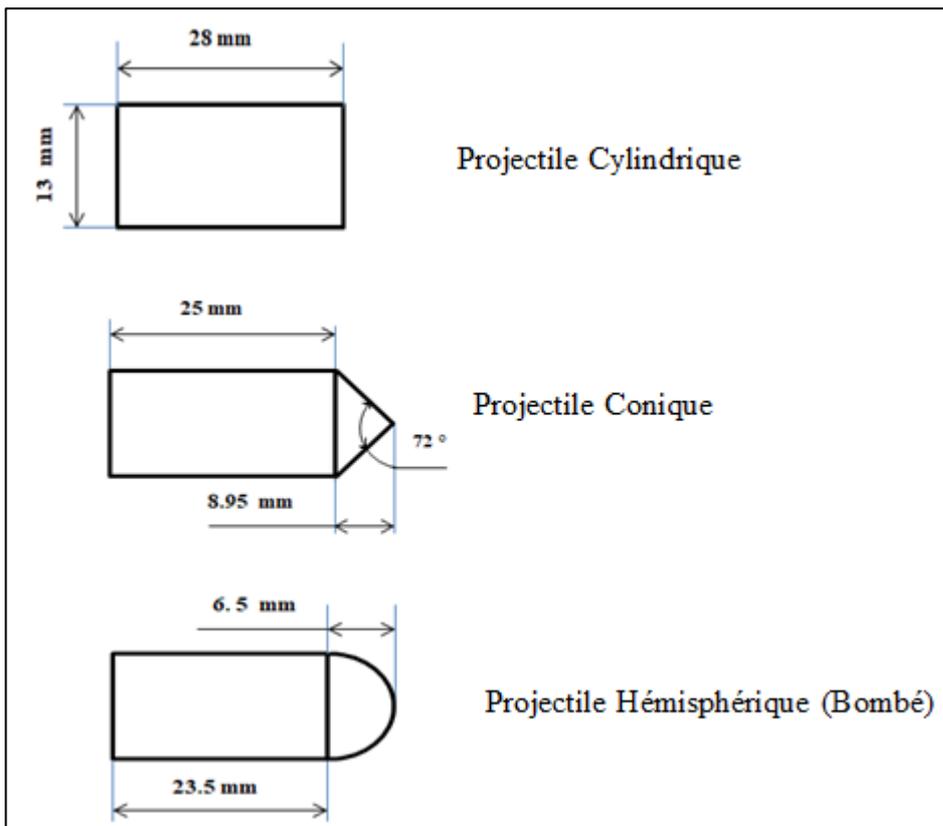
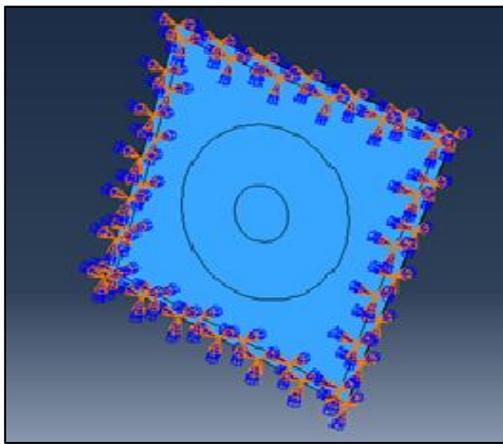
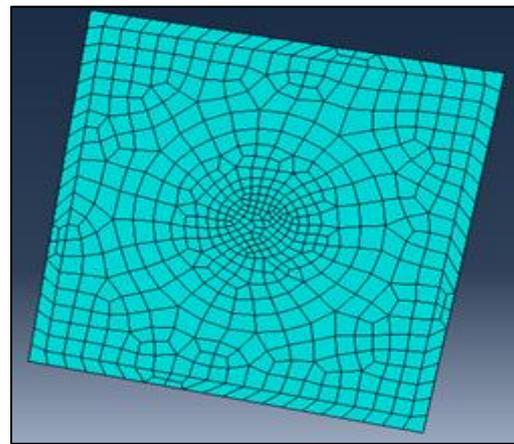


Figure III.2 : Représentation schématique des projectiles utilisés.

La déformation globale de la plaque n'étant pas forcément symétrique, nous avons donc choisi de modéliser le problème entier. Le projectile a été modélisé comme un corps rigide tridimensionnel non déformable avec un point de référence pour affecter la masse, la vitesse et le moment d'inertie. La plaque quant à elle est considérée comme un corps 3D déformable, pour la fiabilité et la reproductibilité des résultats le maillage utilisé sur la zone ciblée (centre de la plaque) a été particulièrement raffiné. Les conditions aux limites des plaques analysées sont indiquées sur la (figure.III.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.



**Figure III.3 :** Conditions aux limites des plaques



**Figure III.4 :** Maillage de la plaque



**Figure III.5 :** Modélisation des projectiles utilisés

Suivant les informations et les paramètres disponibles dans la littérature, on a amené à choisir deux types d'aluminium pour élargir l'étude d'influence de la vitesse d'impact, la forme et la masse du projectile ainsi que l'angle de projection sur le comportement à l'impact des alliages d'aluminium. Les propriétés des matériaux utilisés sont indiquées dans les tableaux (III.1) (III.2) et (III.3).

Type d'aluminium	Module d'élasticité E (GPa)	Coefficient de poisson ( $\mu$ )	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
5080-H116	70	0.33	2660
6061-T6	69	0.33	2700

**Tableau III.1 : propriétés des alliages d'Aluminium utilisés**

Paramètre	A [MPa]	B [MPa]	n	m	C
5080-H116	167	596	0.551	0.859	0.001
6061-T6	324	114	0.42	1.34	0.002

**Tableau III.2 : paramètre de Johnson-Cook des deux alliages**

Paramètre	D1	D2	D3	D4	D5
5080-H116	0.0261	0.263	-0.349	0.147	16.8
6061-T6	-0.77	1.45	-0.47	0.00	1.6

**Tableau III.3 : paramètre d'endommagement Johnson-Cook des alliages**

**[Damage paramètres]**

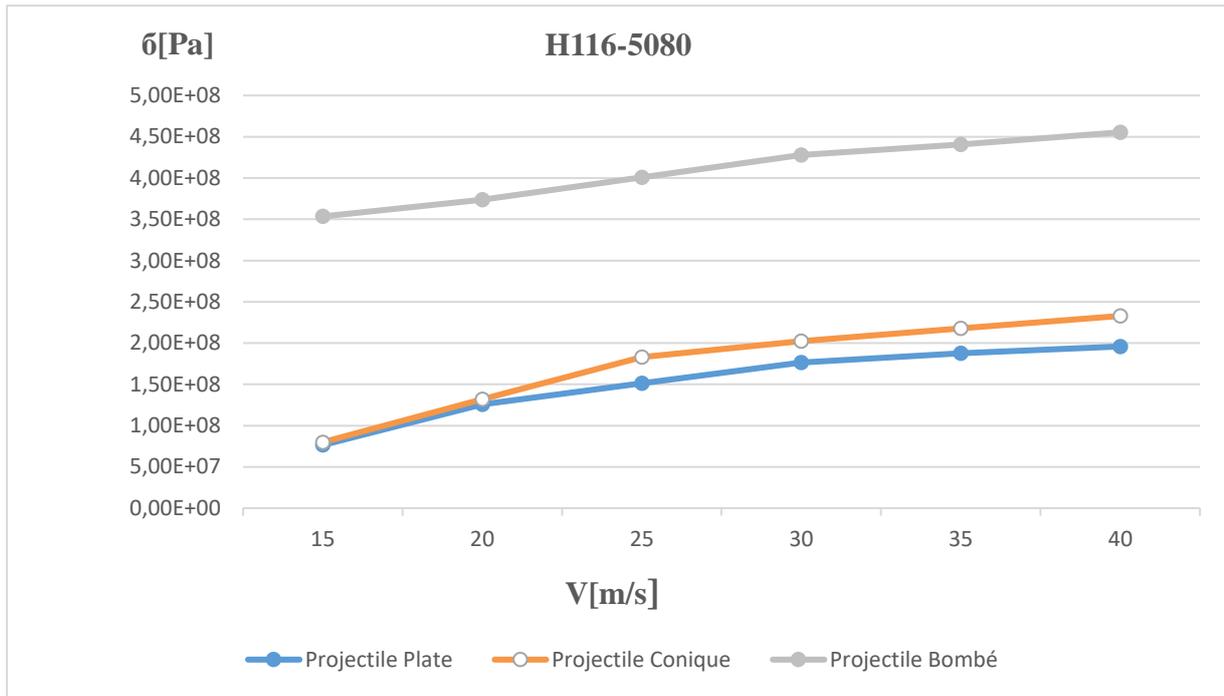
### III.3. Analyse des résultats

#### III.3.1. Effet de la vitesse d'impact et la formes de projectile

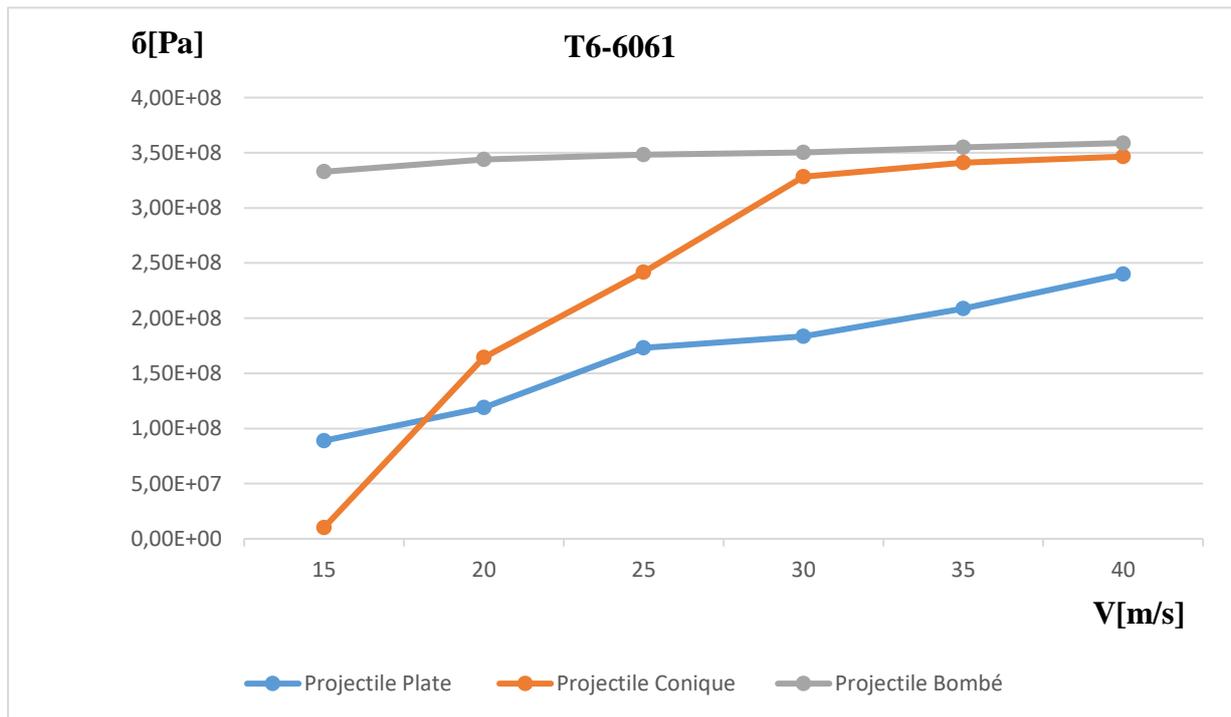
Dans ce cas un projectile de forme variable de masse 30 g est projeté perpendiculairement sur une plaque en Aluminium H116-5080 et T6-6061. La vitesse de projection est de 15 à 40 m/s avec un intervalle de 5 m/s. Trois formes de projectiles ont été utilisées, Cylindrique à bout plat, cylindrique à bout sphérique (bombé) et cylindrique à bout conique comme le montre la figure III.5.

##### III.3.1.1. Influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur les contraintes

Dans cette partie, comme le montre les courbes III.1 et III.2, on a remarqué que pour tous les types de projectiles, l'intensité de contraintes croît progressivement avec la croissance de la vitesse de projection. Cette remarque a été confirmée pour les deux types d'Aluminium utilisés.



**Figure III.6 : L'effet de la vitesse de projection sur l'intensité de contraintes cas de l'Aluminium H116-5080**



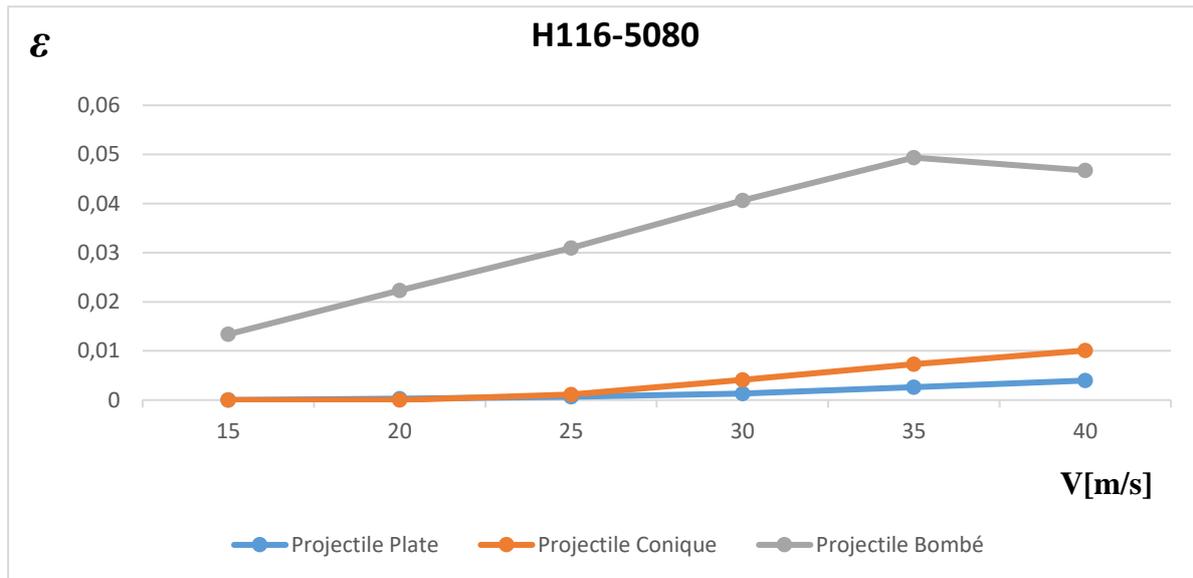
**Figure III.7 : L'effet de la vitesse de projection sur l'intensité de contraintes cas de l'Aluminium T6-6061**

A partir des deux figures, nous avons remarqué aussi que le projectile à bout bombé a causé, sur les deux matériaux, les contraintes les plus élevées par rapport aux autres impacteurs. Cela est peut être due à la surface de contact entre le bout impactant et la plaque.

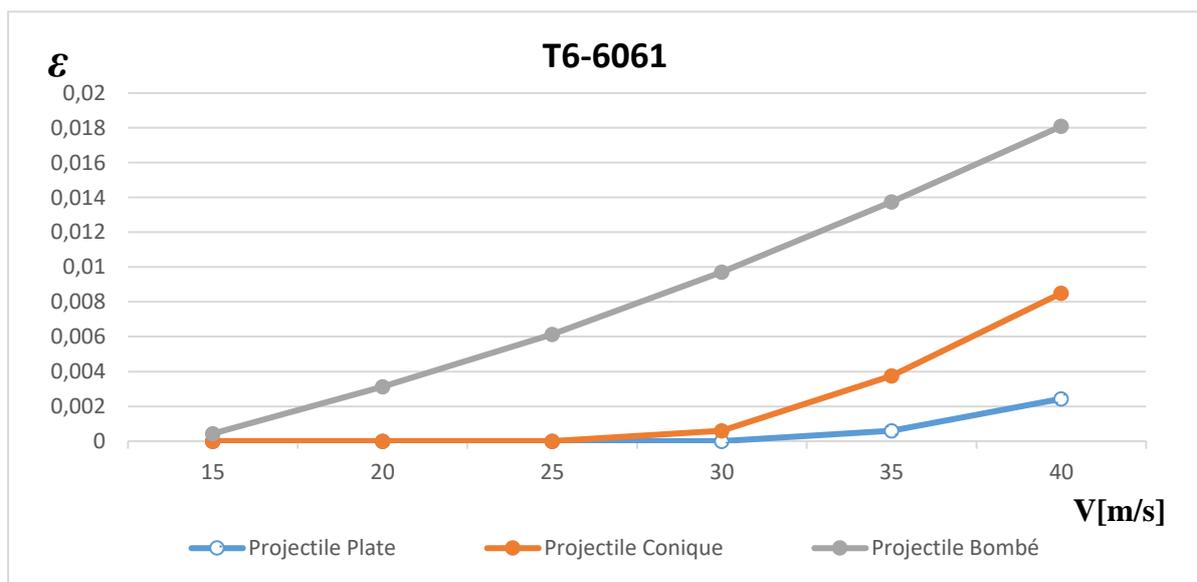
La forme du bout bombé a causé un écrasement de la matière lors du contact avec la plaque, cela sera plus visible et plus grave à des vitesses de contact plus élevées.

### III.3.1.2. Influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur les déformations

Dans ce cas, pour les deux matériaux, nous avons remarqué la même allure pour les trois types de projectiles, des courbes croissantes avec la croissance de la vitesse de projection comme le montre la figure III.8 et III.9.



**Figure III.8 : L'effet de la vitesse de projection sur les déformations cas de l'Aluminium H116-5080**



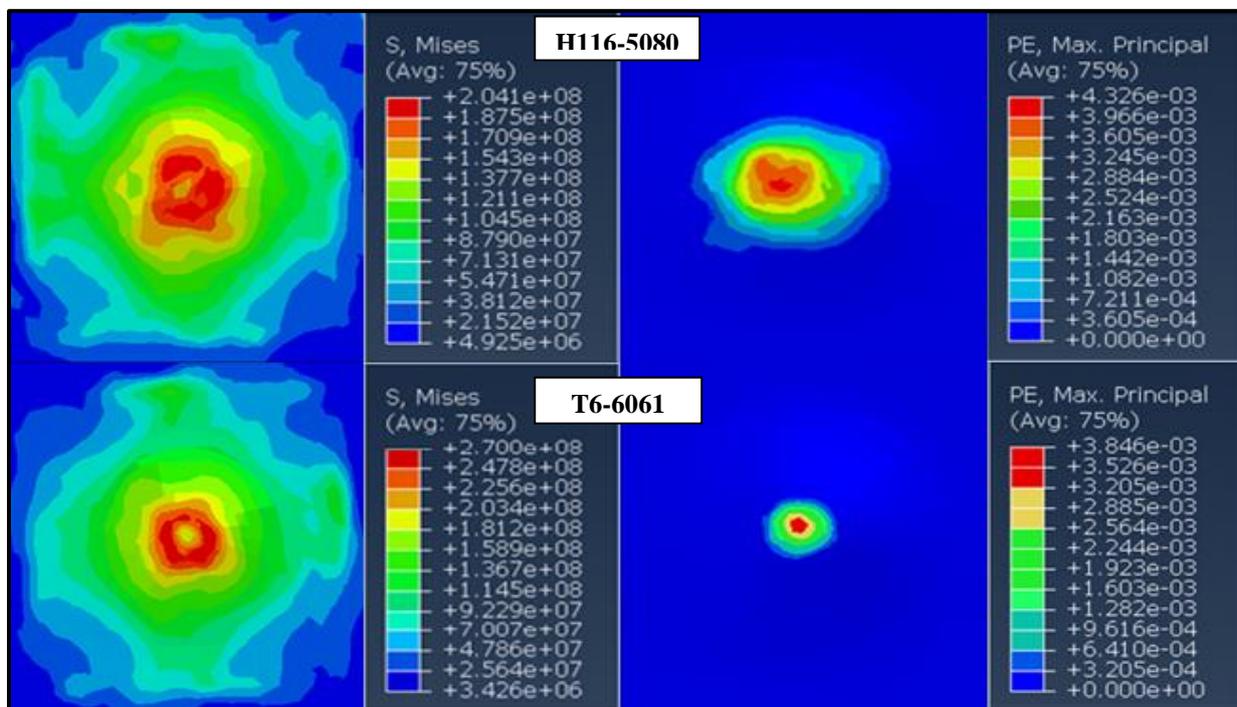
**Figure III.9 : L'effet de la vitesse de projection sur les déformations cas de l'Aluminium T6-6061**

Nous avons remarquer aussi que le projectile à bout sphérique (bombé) a causé les déformations les plus graves par rapport aux autres formes, ce dernier a pu déformer la plaque avec une vitesse minimale de 15 m/s par contre les deux autres impacteur commence à causés des déformations au-delà de 25 m/s. Au moment du contact, le bout sphérique applique un écrasement agressif de la matière en essayant de perforé la plaque, ce type de déformation est plus visible avec des vitesses d'impact plus importantes.

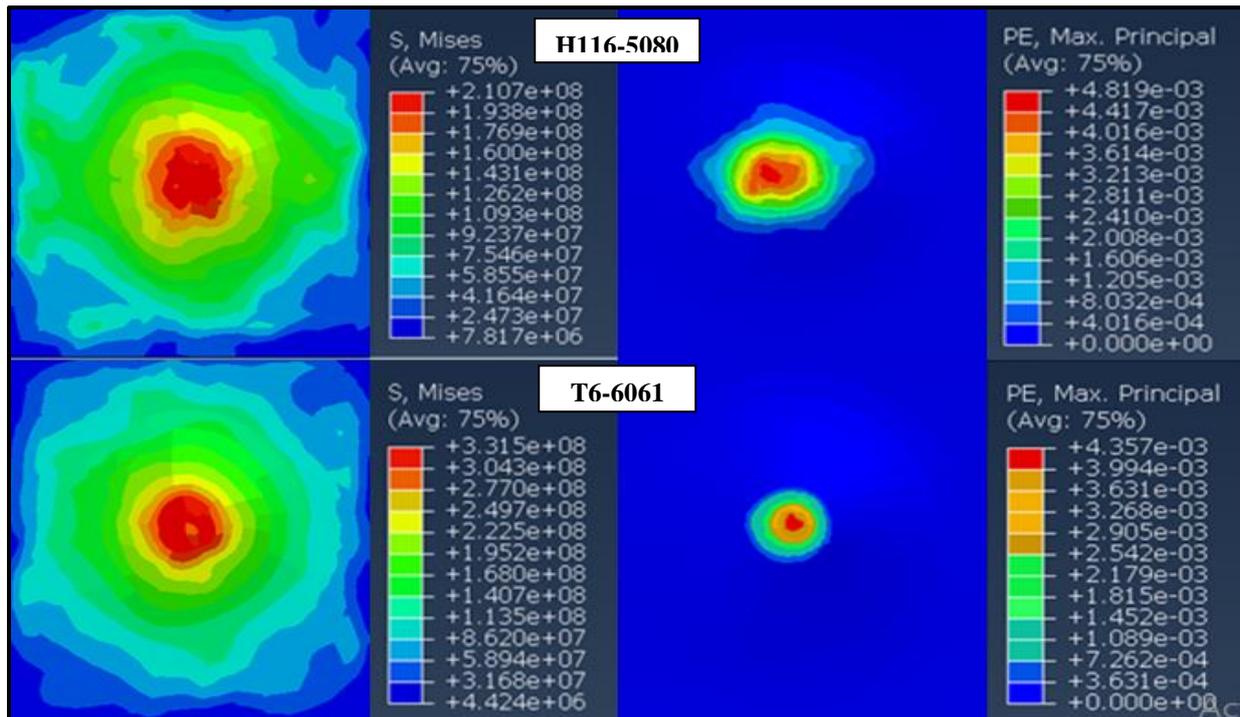
Ce type de projectile a marqué aussi les déformations les plus intenses dans les deux matériaux utilisés, une déformation maximale de 0.05 pour l'Aluminium H116-5080 et de 0.018 pour l'Aluminium T6-6061. Ces deux valeurs nous montrent que l'aluminium T6-6061 est plus résistant que l'Aluminium H116-5080.

### III.3.2. Effet du diamètre de projectile sur les contraintes et les déformations

Dans cette partie d'étude l'effet du diamètre de projectile sur la répartition et l'intensité des contraintes et déformations a été traité. Pour ce faire, un projectile cylindrique à bout plat de diamètre variable, 16, 19 et 22 mm, est éjecté perpendiculairement avec une vitesse de 50 m/s sur des plaques en Aluminium H116-5080 et T6-6061. Les figures III.10 et III.11 regroupent les résultats trouvés pour le diamètre 16 et 19 mm



***Figure III.10 : L'effet du diamètre de projectile sur les contraintes et déformations cas du D=16 mm***



***Figure III.11 : L'effet du diamètre de projectile sur les contraintes et déformations cas du  $D=19$  mm***

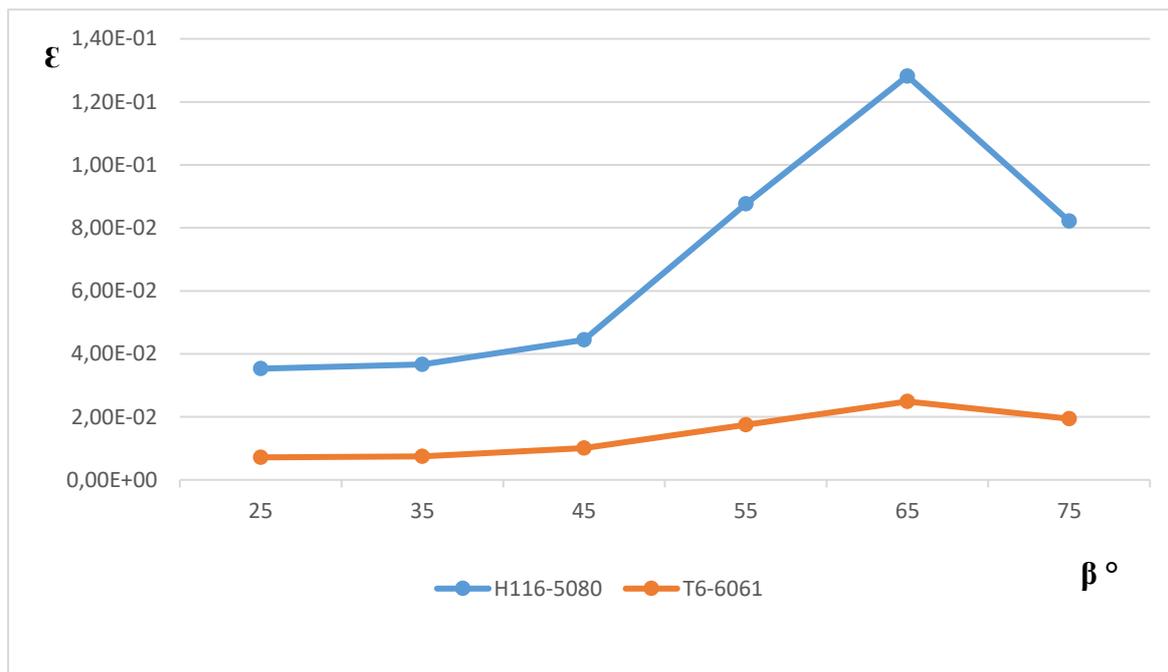
A partir des deux figures nous avons remarqué une croissance de l'intensité de contraintes avec l'augmentation de la valeur du diamètre du bout impactant, les contraintes marquées lors du diamètre 16 mm sont 0.2 et 0.27 GPa pour l'Aluminium H116-5080 et T6-6061 successivement, par contre dans le cas du diamètre  $D=19$  mm nous avons observé une augmentation des contraintes pour les deux types d'Aluminium testés, les contraintes arrivent à des valeurs de 0.21 et 0.33 GPa.

Les mêmes remarques ont été observées pour les déformations, les valeurs marquées avec un projectile de diamètre 19 mm sont plus importantes que celles du diamètre 16 mm. Par exemple pour le cas de l'Aluminium T6-6061 nous avons marqué  $3.84 \cdot 10^{-3}$  avec  $D=16$  mm et  $4.35 \cdot 10^{-3}$  un diamètre de 19 mm, une différence remarquable qui justifie l'effet du diamètre d'impacteur sur les déformations des plaques à testées.

Une autre remarque qui est très importante dans cette partie d'étude, c'est la valeur de déformations atteinte pour les deux types d'Aluminium par rapport aux contraintes appliquées. Nous avons trouvé des valeurs de déformations inférieures pour l'Aluminium T6-6061 avec des contraintes maximales, par contre l'Aluminium H116-5080 a marqué les déformations les plus hautes à des contraintes moins intenses comparativement premier type, cela explique la résistance aux chocs mécaniques du T6-6061 par rapport au H116-5080.

### III.3.3. Effet de l'angle d'impact sur les déformations des plaques

Cette partie traite l'étude de la résistance à l'impact des plaques en Aluminium H116-5080 et T6-6061 sous l'effet de l'angle d'impact  $\beta$ . Les angles balayés sont : 25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75° dont l'angle 0° est celui qui coïncide avec le plan de la plaque. Nous avons projeté un projectile cylindrique à bout sphérique avec une vitesse de 40 m/s suivant les angles d'impacts cités précédemment. Les résultats trouvés sont représentés dans la figure III.12.

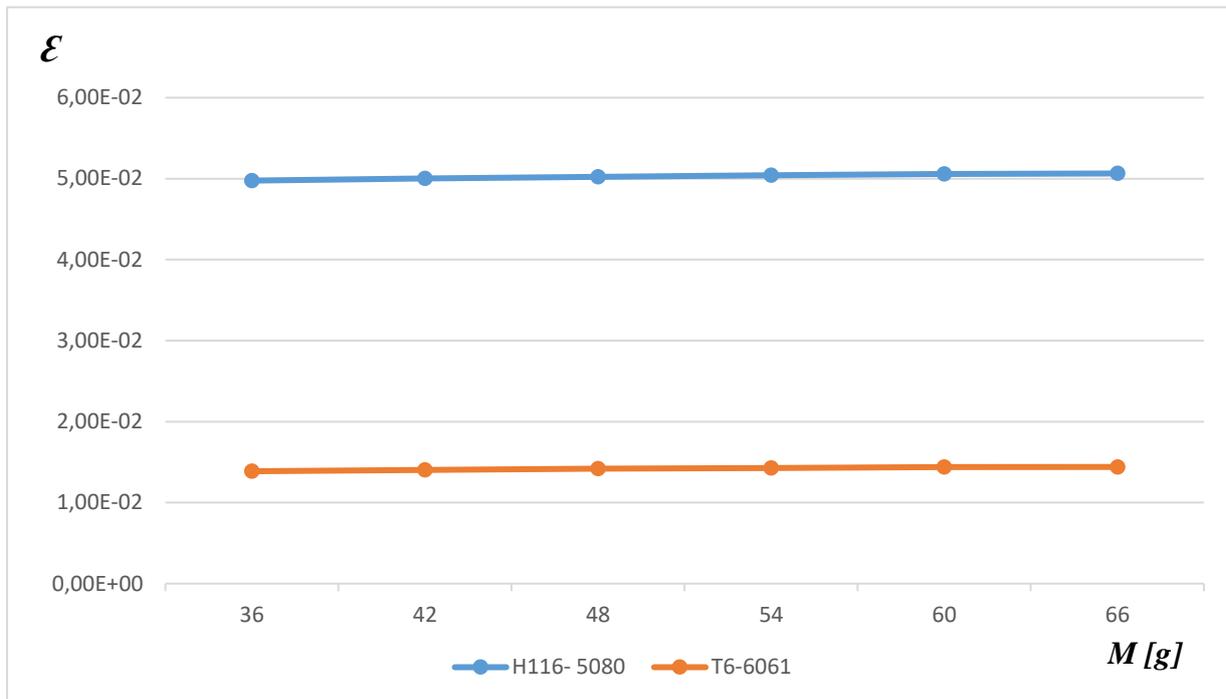


***Figure III.12 : L'évolution des déformations en fonction de l'angle d'impact***

D'après la figure, nous observons une stabilité des valeurs de déformations pour les deux types d'Aluminium jusqu'à l'angle de 45°, dans cette partie l'impacteur frotte la plaque avec une partie du bout impactant qui vient presque parallèlement au plan de la plaque et qui rend le contacte entre les deux moins agressive ce qui justifie les valeurs minimales de déformations. Par contre, au-delà de 45°, la surface de contact entre la plaque et le bout impactant devient plus élevée et le choc devient plus sévère ce qui conduit à des déformations plus agressifs et atteint des valeurs maximales avec un angle de 65°.

### III.3.4. Effet de la masse de projectile sur les déformations

Dans cette dernière partie on a essayé d'étudier l'effet de la masse du projectile sur les déformations, pour ce faire, un projectile cylindrique à bout sphérique de masse variable, 36 à 66g avec un intervalle de six (6) grammes, est éjecté perpendiculairement à la plaque avec une vitesse de 40 m/s, le même travail a été effectué avec deux types d'Aluminium H116-5080 et T6-6061. La figure III.13 représente les résultats trouvés.



***Figure III.13 : L'effet de la masse de projectile sur les déformations***

Dans ce cas, nous avons trouvé des valeurs très proches presque dans tous les cas malgré les différences des masses utilisées, ces résultats ont été confirmés avec les deux types d'Aluminium. Cela est peut-être due à la vitesse de projection utilisée, 40m/s est une vitesse faible dans le domaine d'impact, car la vitesse d'impact est le paramètre le plus influant dans les essais d'impact.

# **Conclusion générale**

## *Conclusion générale*

En raison de leurs propriétés mécaniques, leurs microstructures, compositions chimiques et les différents traitements thermiques que possède chaque pièce, l'étude des mécanismes de déformation des matériaux métalliques est complexe

Dans ce travail nous avons étudié quatre exemples différents de problème d'impact en utilisant un projectile rigide et des plaques alliages d'Aluminium. Le premier cas étudié est l'effet de la forme de projectile en fonction de la vitesse d'impact, trois formes différentes de projectile ont été utilisées (cylindrique à bout plat, cylindrique à bout conique et cylindrique à bout hémisphérique). Dans les cas suivants nous avons étudié le diamètre du projectile, l'angle d'impact et l'effet de la masse du projectile sur les déformations des plaques en Aluminium (H116-5080 et T6-6061).

A partir des résultats trouvés, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- ✓ La vitesse d'impact est le paramètre le plus influençant dans les essais de la résistance aux chocs mécaniques.
- ✓ Vu les vitesses faibles utilisées (inférieures à 50m/s), aucun projectile n'a arrivé à perforer les plaques. En parallèle, une vitesse de 25m/s a été suffisante de créer des déformations sur les plaques avec les trois formes de projectiles.
- ✓ La forme du projectile est un facteur géométrique essentiel et déterminant du comportement des plaques en Aluminium aux chocs mécaniques à faibles vitesses.
- ✓ Le projectile à bout bombé a causé, sur les deux matériaux, les contraintes et les déformations les plus élevées par rapport aux autres impacteur, la forme du bout bombé a causé un écrasement de la matière lors du contact avec la plaque ce qui résulte une zone de striction.
- ✓ Le diamètre du projectile est aussi un paramètre déterminant du comportement des plaques aux impacts à faibles vitesses, le niveau des contraintes et déformations est plus importants lorsque la cible est impactée avec un projectile de diamètre important.
- ✓ Au-delà de 45° jusqu'à 65° d'angle d'impact, la surface de contact devient plus élevée et le contact devient agressive et plus sévère. Plus le bout impactant devient moins aigüe ce qui conduit à minimiser les zones dangereuses.

- ✓ Vu les vitesses faibles utilisées, la masse du projectile n'a pas données des différences dans les résultats, mais elle reste toujours un paramètre qui doit être pris en compte dans le domaine d'impact et surtout à vitesses importantes. L'énergie cinétique varie proportionnellement à la masse du projectile, une énergie cinétique importante conduit à la détérioration de la plaque.
- ✓ L'Aluminium T6-6061 est plus résistant à l'impact par rapport au H116-5080 ce qui favorise l'utilisation de ce type dans le domaine d'impact.

# *Bibliographies*

[1] JM. DORLOT JP. BAILON J. MASOUNAVE. Des Matériaux. Montréal, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.

[2] Develay, R., Données numériques sur l'Aluminium non allié, Les Techniques de l'ingénieur. M443.

[3] [www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin](http://www.educreuse23.ac-limoges.fr/loewy/aa/voisin).

[4] Ben achour, M traitement thermique des alliages d'Aluminium de fonderie AL-SI (2014).

[5] Nour el dine houa. les alliages d'Aluminium de fonderie Al-Si-Cu (2016)

[6] I. Grinberg, L'Aluminium. Un si léger métal, Découvertes Gallimard, 2003.

[7] MICHAEL V. GLAZOFF VADIM S. ZOLOTOREVSKY, NIKOLAI A. BELOV :  
Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., Oxford, 1st édition, 2007.

[8] Document technique de l'ingénieur: "L'Aluminium non Allié" Par Roger DEVELAY  
Ingénieur de l'École Nationale Supérieure d'Électrochimie et d'Électrometallurgie de Grenoble

[9] MICHAEL V. GLAZOFF VADIM S. ZOLOTOREVSKY, NIKOLAI A. BELOV :  
Casting Aluminum Alloys. Elsevier Ltd., Oxford, 1st édition, 2007.

[10] <https://bricoleurpro.ouest-france.fr/dossier-723-Aluminium.html>

[11] « Propriétés de l'Aluminium et des alliages d'Aluminium corroyés. », Techniques de l'ingénieur, Trait Matériaux métalliques, M 440, (1992)

[12] <https://aluquebec.com/nos-actions/cycle-de-vie-et-economie-circulaire/>

[13] <https://bricoleurpro.ouest-france.fr/dossier-723-Aluminium.html>

[14] thèse doctorat d'état es sciences mathématiques mécanique « instabilités thermo-viscoplastiques aux grandes vitesses de déformation »

[15] thèse doctorat d'état es sciences mathématiques mécanique « instabilités thermo-viscoplastiques aux grandes vitesses de déformation ».

[16] Abdessamad BACHIRI 1 \*, Nouredine DJEBBAR 2, Benali BOUTABOUT1 Effet de l'impact du projectile sur le comportement mécanique des aéronefs\*\* (2021).

[17] THÈSE « Étude du comportement dynamique et modélisation thermo viscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique »

[18] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI «Comportement à l'impact des matériaux métallique » Master 2 MQM 2006-2007.

[19] Amélioration de la résistance d'impact d'un bord d'attaque d'un avion en alliage d'Aluminium par des matériaux composites et métallique

[20] J. A. Zukas, *High velocity impact mechanics*, ISBN-10: 0. Wiley Interscience, 1990

[21] THÈSE « Contribution à la caractérisation de la déformation et de la rupture dynamique de structures sous impact »

[22]<http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/derardjaakila/files/chap1cmmm.pptxenregistremenautomatique.pdf>

[23] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI «Comportement à l'impact des matériaux composites » Master 2 MQM 2006-2007.

[24] VALERSTEINAS P., *Projet Mosaïc : structure automobile en composites et Aluminium*, Techniques de l'Ingénieur, AM5605, 1998.

[25] Bathias C., *Matériaux composites*, l'Usine Nouvelle, Dunod, Paris, 2005.

[26] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI «Comportement à l'impact des matériaux composites » Master 2 MQM 2006-2007.

[27] Abdessamad BACHIRI 1 \*, Nouredine DJEBBAR 2, Benali BOUTABOUT1 Effet de l'impact du projectile sur le comportement mécanique des aéronefs\*\* (2021).

[28] Werner Goldsmith. *Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids*.Book (2018).