

	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
قسم الهندسة الميكانيكية		
	Department of Mechanical Engineering	

N° d'ordre: M2..... /GM/2024

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité: Construction Mécanique**

### Thème

**Comportement aux chocs des matériaux métalliques à  
différentes vitesses d'impact**

Présenté par

**1- BENZAIT RAWANE**

**2- SADJI MAROUA**

Soutenu le 25 /06/ 2024 devant le jury composé de:

Président(e):	Dr. BENDOUKHA. M	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem
Examineurs:	Dr. BENKABOUCHE S	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	Mr. BENAÏSSA M	Maître Assistant "A"	Université de Mostaganem

Année universitaire 2023 / 2024

## *Dédicaces*

Je souhaite offrir ce travail à tous ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur :

*À ma mère* : qui a toujours été là, qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, merci pour chaque sacrifice, chaque sourire et chaque encouragement. Que dieu la garde. Tu es bien plus qu'une mère.

*À mon père* : étoile éteinte dans le ciel, Ton souvenir brille toujours, éternel.

*À mes précieuses sœurs* : votre présence est un cadeau précieux que je chérirai toujours. Que notre lien continue de grandir en force et en beauté, je suis entouré d'amour et de soutien inconditionnels. Avec tout mon amour et ma gratitude éternelle.

*À mes frères* : Merci d'être là, Votre présence dans ma vie est un cadeau précieux que je n'échangerais pour rien au monde.

*À mes copines* : pour leur soutien inconditionnel et leur amitié précieuse. Leurs rires, leurs conseils et leur présence font de chaque jour une aventure inoubliable.

Mes sincères remerciements à mes sœurs avant d'être amies : ASMAE, BAYA, MANEL, LINA, RIHAME, KHEIRA, KHADIDJA, IKRAM, HAFSA.

*À mes amis* : MILOUD ET ISMAIL.

*À mon binôme* : RAWANE complice de chaque instant et partenaire de confiance, merci pour notre collaboration sans faille et notre amitié indéfectible. Ensemble, nous sommes une équipe imbattable.

Je suis reconnaissant envers tous ceux qui m'ont soutenu, leur encouragement m'a inspiré et motivé à atteindre mes objectifs avec confiance. Mes sincères remerciements pour leur soutien précieux tout au long de mon parcours.

**MAROUA SADJI**

## *Dédicaces*

Tout d'abord je tiens à remercier le dieu de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail

*A mon père* : dans l'ombre de ton absence chaque succès est teinté de tristesse, car tu n'es pas là pour le partager, mais ce projet qui marque mes études et un hommage à toi mon guide silencieux tu puisses ressentir toute la fierté et l'amour que je garde pour toi

*A ma chère mère* : qui a toujours cru en moi et m'a encouragé à poursuivre mes rêves, même lorsque les obstacles semblaient insurmontables, sans toi je n'aurais pas acquis la force et la résilience nécessaires pour aboutir à ce stade, ta lumière et ton amour continueront d'éclairer mon chemin

*À mes frères* : (MOHAMMED ; BILAL ; ABD EL NOUR) dont le soutien et l'amour inconditionnel m'ont donné la force de réussir. Merci d'être toujours là pour moi.

*À mes chères sœurs* : (GWLADYS ; KHOULOU) vous êtes mes piliers, mes étoiles, mes guides. Votre amour et votre soutien inconditionnels sont les fondations sur lesquelles je construis ma vie. Dans les moments de doute et de peine, c'est votre force et votre bienveillance qui m'ont porté. Merci d'être toujours là, de partager les rires et les larmes, de marcher à mes côtés dans cette aventure qu'est la vie. Vous êtes mes trésors les plus précieux

*À mes chères amies* : (AMINA, ALIA, ASMAE, FATIMA) merci d'avoir été à mes côtés, de m'avoir soutenu dans les moments difficiles et m'avoir aidé à préserver jusqu'à ce que ce rêve devenu réalité

*À mon binôme* : MAROUA, pour sa collaboration inestimable et son soutien constant. Merci d'avoir rendu ce projet possible et agréable.

*À mon merveilleux neveu* (WASSIM ALI) et *à ma charmante nièce* (LÉNINA MERIEME) que votre vie soit remplie de bonheur, de réussite et de moments inoubliables. Vous êtes une source infinie de joie et d'inspiration. Je vous aime de tout mon cœur."

Et finalement je remercie tous les gens qui me connaissent et surtout les familles (BENZAÏT ; DRIA ; BOUSSAÏD).

**RAWANE BENZAÏT**

## *Remerciement*

Nous tenons à remercier tout d'abord notre dieu tout puissant ALLAH de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer un remerciement tout spécial à nos parents, de nous avoir soutenu et encouragé tout au long de nos études.

Nos remerciements s'adressent spécialement à notre encadrant Monsieur **BENAISSA Mohamed** qui s'est donné corps et âme pour la réussite de notre travail, pour cela nous lui disons un grand merci et lui souhaitons que le tout puissant lui accord plus de bénédiction et de chance dans sa vie.

Un grand merci à nos précieux enseignants, car sans vous, nous n'aurions jamais pu atteindre ce résultat.

Nous tenons également à remercier tous les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de notre mémoire.

Nous n'oserions oublier de remercier tout le corps professoral du département de Génie Mécanique pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : classification-périodique.....	4
<b>Figure II .1</b> : Exemples d'impact de projectiles sur des structures dans le domaine des transports .....	14
<b>Figure II .2</b> : Illustration de l'effet de structure : impact basse vitesse (a) ; impact haute vitesse (b).....	17
<b>Figure II .3</b> : Géométrie d'impacteur : hémisphérique(a), ogivale(b) et conique(C).....	18
<b>Figure II .4</b> : Micrographies de coupes de plaques impactées avec un impacteur de forme hémisphérique (a), ogivale (b) et conique (c).....	18
<b>Figure III.1</b> : Représentation schématique du modèle utilisées.....	25
<b>Figure III.2</b> : Conditions aux limites et maillage des plaques .....	25
<b>Figure III.3</b> : Représentation des essais réalisés sur l'effet de l'épaisseur de plaque... ..	28
<b>Figure III.4</b> : L'effet de l'épaisseur de plaque sur la propagation des contraintes et la déformation des plaques.....	28
<b>Figure III.5</b> : Représentation de la perforation directe du projectile sur les plaques en Aluminium.....	29
<b>Figure III.6</b> : Concentration des contraintes et des déformations cas de l'Acier et SiC ( $V = 35$ m/s) .....	30
<b>Figure III.7</b> : Concentration des contraintes et des déformations cas de l'Acier et SiC ( $V = 150$ m/s) .....	30
<b>Figure III.8</b> : Concentration des contraintes et des déformations cas de l'Acier et SCI ( $V = 300$ m/s) .....	31
<b>Figure III.9</b> : Schématisation des essais réalisés sur l'effet de l'angle de contact.....	32
<b>Figure III.10</b> : Représentation des essais réalisés sur l'effet de l'angle de contact... ..	32
<b>Figure III.11</b> : Représentation des essais réalisés sur l'effet de l'angle de contact... ..	33

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Propriétés physiques .....	4
<b>Tableau I.2:</b> Classification des métaux non ferreux .....	10
<b>Tableau II .1:</b> catégories d'impact... ..	15
<b>Tableau III.1:</b> propriétés des matériaux utilisés .....	24
<b>Tableau III.2:</b> paramétré de Johnson-Cook des matériaux utilisés .....	24
<b>Tableau III.3:</b> paramétré d'endommagement Johnson-Cook [Damage paramètres] .....	24
<b>Tableau III .4:</b> L'effet de la vitesse d'impact et la masse de projectile sur les contraintes et déformations de la plaque... ..	25
<b>Tableau III .5:</b> L'effet de l'angle de contact... ..	30

## *Nomenclature*

**$\sigma_e$** : 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.

**D1**: Défaillance de contrainte initiale.

**D2**: Facteur d'exponentielle.

**D3**: Facteur de triaxialité.

**D4**: Facteur de vitesse de déformation.

**D5**: Facteur de température.

## Résumé

Le comportement des matériaux métalliques sous choc varie considérablement en fonction de la vitesse d'impact à laquelle ils sont soumis. Cette variation peut engendrer des réponses mécaniques et des modes de déformation différents, influençant ainsi la performance et la durabilité des structures métalliques dans diverses applications industrielles. À des vitesses d'impact faibles à modérées, les matériaux métalliques ont tendance à subir une déformation plastique progressive, où la matière se déforme sans se rompre de manière significative. Ce comportement est souvent associé à une augmentation de la résistance et de la ductilité du matériau, ce qui peut permettre à la structure de mieux absorber l'énergie de l'impact. En revanche, à des vitesses d'impact élevées, les matériaux métalliques peuvent présenter des réponses plus complexes, telles que la fracture ductile ou fragile, la déformation localisée et même la vaporisation de la matière sous l'effet de l'énergie cinétique importante générée par l'impact. Ces phénomènes peuvent entraîner une diminution de la résistance du matériau et une augmentation du risque de défaillance catastrophique de la structure.

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.

Ce travail a pour objectif l'analyse de l'effet d'impact d'un projectile rigide sur le comportement des plaques métalliques au choc à vitesses moyennes. Plusieurs facteurs ont été traités comme la masse de l'impacteur, le matériau et l'épaisseur des plaques ainsi que l'angle de frappe entre plaque et le projectile. Pour ce faire, des échantillons de forme circulaire en Acier AISI1045, AISI4340 en Aluminium 6061-T6 et en Carbure de Silicium SiC ont été analysés selon différentes facteurs d'impact.

**Mots clés:** Acier, Alliages d'Aluminium, comportement aux chocs, déformations, moyennes vitesses, élément finis.

## Summary

The behavior of metallic materials under shock varies considerably depending on the impact velocity to which they are subjected. This variation can lead to different mechanical responses and deformation modes, influencing the performance and durability of metallic structures in various industrial applications. At low to moderate impact velocities, metallic materials tend to undergo progressive plastic deformation, where the material deforms without significant fracture. This behavior is often associated with increased strength and ductility of the material, allowing the structure to better absorb impact energy.

Conversely, at high impact velocities, metallic materials may exhibit more complex responses such as ductile or brittle fracture, localized deformation, and even material vaporization due to the significant kinetic energy generated by the impact. These phenomena can lead to a decrease in material strength and an increased risk of catastrophic failure of the structure.

To reduce the cost of mechanical testing, numerical simulation using the finite element method is employed. It is in this context that this thesis is prepared. Based on numerical modeling, the Abaqus calculation code was used.

This work aims to analyze the impact effect of a rigid projectile on the behavior of metallic plates under shock at medium velocities. Several factors were considered, such as the mass of the projectile, the material and thickness of the plates, and the angle of impact between the plate and the projectile. Circular samples made of AISI1045 steel, AISI4340 alloy, Aluminum 6061-T6, and Silicon Carbide (SiC) were analyzed under different impact conditions.

**Keywords:** Steel, Aluminum Alloys, shock behavior, deformations, medium velocities, finite element method

## ملخص:

يختلف سلوك المواد المعدنية تحت الصدمة بشكل كبير اعتمادًا على سرعة التأثير التي تتعرض لها. يمكن أن يؤدي هذا الاختلاف إلى استجابات ميكانيكية مختلفة وأنماط تشوه، مما يؤثر على أداء ومتانة الهياكل المعدنية في التطبيقات الصناعية المختلفة. عند سرعات التصادم المنخفضة إلى المتوسطة، تميل المواد المعدنية إلى الخضوع لتشوه لدن تدريجي، حيث تنشوه المادة دون حدوث كسر كبير. غالبًا ما يرتبط هذا السلوك بزيادة قوة ومرونة المادة، مما يسمح للهيكل بامتصاص طاقة التأثير بشكل أفضل.

على العكس من ذلك، عند سرعات التصادم العالية، قد تظهر المواد المعدنية استجابات أكثر تعقيدًا مثل الكسر المرن أو الهش، والتشوه الموضعي، وحتى تبخر المواد بسبب الطاقة الحركية الكبيرة الناتجة عن التأثير. يمكن أن تؤدي هذه الظواهر إلى انخفاض في قوة المواد وزيادة خطر حدوث فشل ذريع في الهيكل.

لتقليل تكلفة الاختبار الميكانيكي، تم استخدام المحاكاة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة. وفي هذا السياق تم إعداد هذه الأطروحة. وبالاعتماد على النمذجة العددية تم استخدام كود حساب أباكوس.

يهدف هذا العمل إلى تحليل تأثير تأثير مقذوف جامد على سلوك الصفائح المعدنية تحت الصدمة بسرعات متوسطة. تم أخذ عدة عوامل في الاعتبار، مثل كتلة المقذوف، والمادة وسمك الصفائح، وزاوية التأثير بين اللوحة والمقذوف. تم تحليل العينات الدائرية المصنوعة من الفولاذ AISI1045، وسبائك AISI4340، والألومنيوم T66061، وكربيد السيليكون (SiC) في ظل ظروف تأثير مختلفة.

الكلمات الرئيسية :

الفولاذ، سبائك الألومنيوم، سلوك التأثير، التشوهات، السرعات المتوسطة، العنصر المحدود.

# Sommaire

## Table des matières

<b>Dédicace</b>	<b>i</b>
<b>Remerciement</b>	<b>ii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iv</b>
<b>Summary</b>	<b>v</b>
<b>ملخص</b>	<b>vi</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xii</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>

### **CHAPITRE I: Généralités sur les matériaux métalliques**

<b>I.1 : Introduction:</b>	<b>2</b>
<b>I.2 : Propriétés caractéristiques des métaux</b>	<b>2</b>
I.2.1. Propriétés physiques :	4
I.2.2. Propriétés mécaniques	5
I.2.3. Propriétés technologiques:	6
<b>I .3. Métaux ferreux (aciers et fonte):</b>	<b>6</b>
I.3.1 Définition d'un acier	6
I.3.1.1. Classification des aciers:	6
A. Aciers non alliés et aciers alliés	6
➤ Aciers de qualité	7
* Aciers de qualité non alliés	7
* Aciers de qualité alliés:	7
Aciers spéciaux :	7
* Aciers spéciaux non alliés	7
* Aciers spéciaux alliés	8
Aciers inoxydables	8

<b>B. Les aciers au carbone</b>	<b>8</b>
Les aciers à faible teneur de carbone (% C < 0.25%)	9
Les aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C):	9
Les aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C)	9
<b>I.3.2. Fontes</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2.1 Types de fontes</b>	<b>9</b>
A. Fontes à Graphite Lamellaire	10
B. Fontes malléables à Graphite Sphéroïdale	10
<b>I .4. Métaux non ferreux:</b>	<b>10</b>
<b>I .4.1. Alliage d'aluminium:</b>	<b>11</b>
I .4.2. Alliages corroyés :	12
I .4.3. Alliage pour la fonderie	12
I.4.4. Alliage de cuivre	12
 <b>CHAPITRE II: Comportement à l'impact des matériaux métalliques</b>	
<b>II.1. Introduction:</b>	<b>13</b>
<b>II.2. Définition d'un choc:</b>	<b>13</b>
<b>II.3. Energie cinétique:</b>	<b>14</b>
<b>II.4. Définition d'un impact:</b>	<b>14</b>
<b>II.5. Comportement à l'impact des matériaux métalliques:</b>	<b>15</b>
<b>II.6. Catégories d'impact:</b>	<b>15</b>
<b>II.7. Essai d'impact:</b>	<b>16</b>
<b>II.8. Classification de l'impact:</b>	<b>16</b>
<b>II.9. Influence des caractéristiques de l'impact:</b>	<b>17</b>
II.9.1. Vitesse d'impact	17
II.9.2. Masse de l'impacteur:	17
II.9.3. Forme de l'impacteur	17

<b>II.10. Simulation numérique de la perforation:</b>	<b>18</b>
<b>II.11. Etude du comportement mécanique des matériaux:</b>	<b>19</b>
<b>II.12. Loi de l'écoulement (Modèle de Johnson Cook)</b>	<b>19</b>
<b>II.13. Domaines d'applications de l'impact</b>	<b>20</b>
<b>II.13.1. Automobiles</b>	<b>20</b>
a). Conditions d'impacts	20
✓ Chocs à 5 km/h:	20
✓ Chocs à 15 km/h	20
✓ Chocs à 50 km/h	20
<b>II.13.2. Aéronautiques</b>	<b>21</b>
a). Conditions d'impacts	21
b). Crash survivable	21
c). Choc à l'oiseau	21
<b>II.13.3. Militaires</b>	<b>22</b>
a). Impacts de balles	22
b). Gillet pare-balle	22
c). Casque militaire	22

## **CHAPITRE III: Etude numérique et analyse des résultats**

<b>III.1. Introduction</b>	<b>23</b>
<b>III.2. Définition du modèle</b>	<b>24</b>
<b>III.3. Analyse des résultats</b>	<b>27</b>
<b>III.3.1. Effet de la vitesse d'impact et la masse de projectile</b>	<b>27</b>
<b>III.3.2. Effet de l'épaisseur de la plaque</b>	<b>27</b>
<b>III.3.3. Effet du type de matériaux utilisé pour la plaque</b>	<b>29</b>
<b>III.3.4. L'effet de l'angle de contact</b>	<b>32</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>34</b>

## **Bibliographies**

# Introduction Générale

## Introduction générale

Bien que de nouveaux matériaux tels que les composites à base de fibres et les structures sandwich aient émergé, les matériaux métalliques demeurent prépondérants dans l'industrie. Actuellement, leur utilisation est répandue dans divers secteurs comme le transport, la construction, l'outillage, la médecine, les ustensiles de cuisine, l'électricité, l'électronique, et bien d'autres encore.

L'un des défis majeurs dans l'évaluation de la sécurité des installations est de caractériser le comportement des structures lorsqu'elles subissent des impacts. Généralement, cela implique de s'assurer que les déformations globales restent dans des limites acceptables ou de démontrer que même endommagées, les structures permettent d'arrêter l'installation en toute sécurité.

Ce mémoire est divisé en deux sections principales : une première partie dédiée à la théorie et à la revue bibliographique, suivie d'une seconde partie focalisée sur l'analyse numérique.

- ✓ Les deux premiers chapitres de la première partie traiteront d'abord des notions générales concernant les matériaux métalliques, en couvrant les diverses catégories de métaux, leur composition et leurs applications spécifiques.
- ✓ Le deuxième chapitre abordera les aspects généraux de l'impact, notamment les différentes catégories d'impacts, les modèles numériques applicables aux matériaux métalliques et la loi d'écoulement.
- ✓ Le dernier chapitre est consacré pour la modélisation et l'analyse numérique du comportement des plaques en Acier AISI1045, AISI4340, Aluminium 6061-T6 et en Carbure de Silicium SiC, impactées à différentes vitesses en utilisant un projectile cylindrique à bout plat. De plus, une étude sur l'influence de la masse du projectile, l'angle de projection et l'épaisseur de plaques sur les contraintes et les déformations a été menée.

# CHAPITRE I

Généralités sur les matériaux métalliques

## I.1. Introduction

Les matériaux solides sont définis comme des solides utilisés à grande échelle industrielle pour la conception d'objets caractérisés par leurs fonctions et leurs propriétés physiques. Le choix d'un matériau pour une large utilisation industrielle dépend de plusieurs caractéristiques telles que :

- Caractéristiques mécaniques : limite élastique, dureté, résilience ...
- Caractéristiques physico-chimiques : comportement à la corrosion, vieillissement
- Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilité, soudabilité, trempabilité ...
- Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle ...

Il ne faut pas confondre le matériel qui est un objet façonné ou fabriqué par l'homme et les matériaux (matériau) qui servent à fabriquer cet objet.

Les matériaux métalliques sont des matériaux présentant à la fois une bonne résistance mécanique et une facilité de mise en forme. Ils sont de fait très utilisés à grande échelle industrielle. Cependant, les métaux purs sont des matériaux présentant à la fois des caractéristiques mécaniques relativement faibles et plus ou moins de facilité de mise en forme à chaud ou à froid, d'où la nécessité d'ajouter d'autres éléments leur permettant d'améliorer leurs caractéristiques. L'addition volontaire à un métal pur de base d'un ou plusieurs éléments d'alliages peut modifier profondément les propriétés des métaux de base [1].

## I.2. Propriétés caractéristiques des métaux

Parmi les 106 éléments du tableau périodique 76 sont des métaux. Les métaux se distinguent des autres éléments par plusieurs caractéristiques. Conductibilité thermique et électrique élevée due aux électrons libres qui se déplacent dans le champ potentiel du réseau, coefficient de température de résistivité positif, cela signifie que la résistivité de métaux purs s'accroît avec l'élévation de la température ; à très basse température un grand nombre de métaux passent à l'état supraconducteur à l'approche du zéro absolu, la résistivité de ces métaux tombe par sauts jusqu'à une valeur très faible. Émission thermoélectrique c.-à-d. l'aptitude d'émettre des électrons sous l'effet de la température. Bonne aptitude à la réflexion ; les métaux sont opaques et ont un éclat métallique particulier. Capacité élevée à la déformation plastique, due à la périodicité de leur structure atomique, lorsque certains volumes du métal se déplacent par rapport à d'autres volumes, la liaison entre les atomes ne se rompt pas.

Tous les métaux et alliages métalliques ont la structure cristalline, l'arrangement de leurs atomes (ions) est régulier et périodique à la différence des corps amorphes dont les atomes sont

disposés d'une manière chaotique. Donc toutes ces propriétés caractérisant l'état métallique, qui est caractérisé par l'énergie élevée de la liaison entre les atomes, la mesure de cette liaison est donnée par l'intensité de la chaleur de sublimation, thermique qui traduit l'énergie totale nécessaire pour passer d'un système condensé, C.-à-d. d'un métal solide, à l'état de vapeur, lorsque les atomes isolés ne sont plus liés entre eux par l'énergie d'ionisation dans ce dernier cas les atomes étant électriquement neutres.

À l'état structural ordinaire, les métaux purs ont une résistance faible et, dans de nombreux cas, n'assurent pas les propriétés physico-chimiques et technologiques requises, c'est ce qui définit leur utilisation relativement rare et la grande extension des alliages élaborés par fusion ou frittage de deux ou plus de métaux avec des métalloïdes. Leurs propriétés caractéristiques sont celles de l'état métallique.

Pour étudier la structure, les transformations et les propriétés des métaux et alliages ont introduit la notion de phase et de structure largement appliqués dans la métallographie. L'ensemble des phases à l'état d'équilibre s'appelle système. On appelle phase les parties homogènes d'un système ayant la même composition, le même état d'agrégation et qui sont délimitées par rapport aux autres parties par les surfaces de séparation ou interfaces. Ainsi un métal pur homogène ou un alliage est un système à phase unique. L'existence simultanée d'un alliage liquide (métal) et des cristaux constitue un système de deux phases. Par le terme de structure on entend la forme, les dimensions et la disposition des phases. On appelle composants structuraux d'un alliage ses parties isolées qui ont la même structure caractérisée par les propriétés qui leur sont propres. [2]

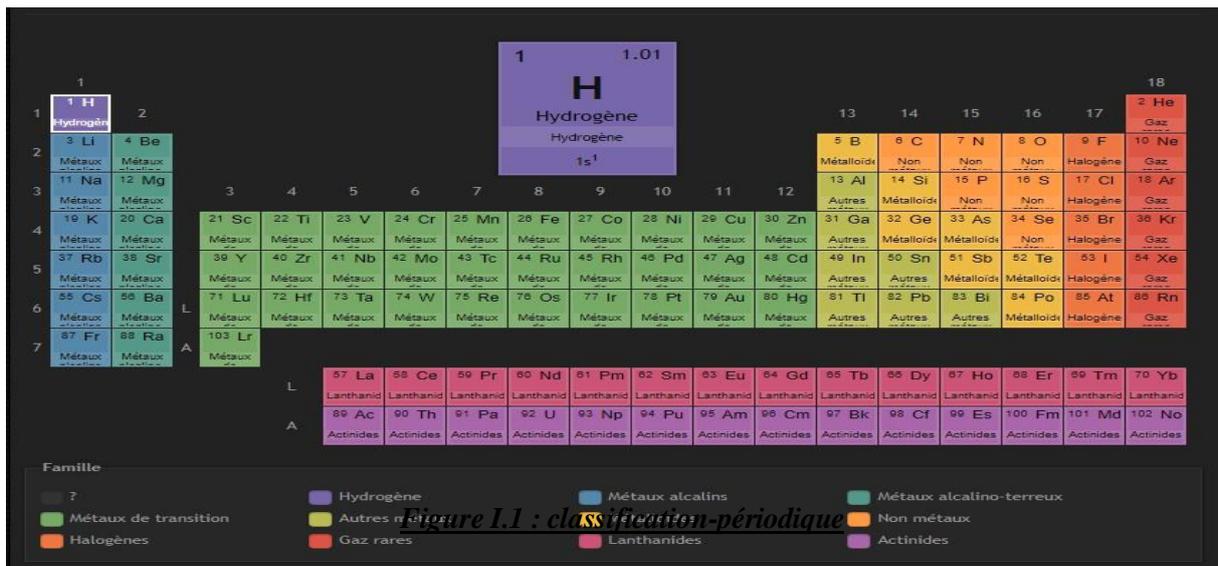


Figure I.1: classification-périodique

### I.2.1. Propriétés physiques

La densité de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m<sup>3</sup>, celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m<sup>3</sup>. Il est important de connaître le point de fusion des métaux pour pouvoir les traiter à chaud afin d'obtenir des éléments coulés [3].

La dilatation produite par l'échauffement est caractérisée par le coefficient de dilatation linéaire ou volumique, ces coefficients sont pris en compte lors de toute étude de construction métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température [3].

**Tableau I.1 : Propriétés physiques**

Propriétés	Platine	Or	Mercure (liquide)	Plomb	Argent	Cuivre	Fer	Etain	Zinc	Aluminium
Densité	21,5	19,4	13,59	11,37	10,4	8,79	7,79	7,23	6,86	2,56
Température de fusion (°C)	1775°	1050°	40°	335°	954°	1100°	1500°	223°	410°	650°
Conductibilité électrique (% par rapport à l'argent)	-	-	-	-	100	91,4	12,23	13,7	24,1	-
Conductibilité calorifique (% par rapport à l'argent)	-	-	-	-	100	73,6	11,9	14,5	19,3	-
Malléabilité	-	Très élevée	-	-	Très élevée	-	-	-	-	Très élevée
Ductilité	-	Très élevée	-	-	Très élevée	-	-	-	-	-
Ténacité (kg pour rompre un fil de 2mm de diamètre)	124,7	68	-	9,6	85	137,4	250	15,8	49,8	-

### I.2.2. Propriétés mécaniques

Parmi les résistances mécaniques, on peut citer: la résistance, la dureté, la résilience, la fatigue et le fluage.

- La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs, suivant la nature de ces efforts on distingue: la résistance à la traction, à la compression, à la flexion, et à la torsion qui est caractérisées par les charges limites par lesquelles le métal se rompt.
- La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône. La résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs.
- La fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique).
- Le fluage caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité. [3]

### I.2.3. Propriétés technologiques

Sont caractérisées par la possibilité d'usinage des métaux, ce qui est conditionnée par leur plasticité. [3]

## I.3. Métaux ferreux (Aciers et Fontes)

Le Fer, métal tenace et malléable, utilisé pour les grilles de jardin, portails, clôtures. La Fonte, alliage de fer et de carbone, qui utilisée pour les radiateurs, les Garde-corps et certaines canalisations. L'Acier doux, mélange de fer et de carbone, utilisé dans la construction sous forme de poutrelles ou de tôles, que l'on retrouve dans des grilles, portes, volets... Tous ces matériaux doivent protégés de l'oxygène et de l'humidité. [4]

### I.3.1. Définition d'un acier

Selon le dictionnaire ROBERT, un acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5%) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ». Selon la norme NF EN 10020 (qui en juin 1989 a remplacé la norme NF A 02-025), « acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ».

À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à

préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages. La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite. [5]

### **I.3.1.1. Classification des aciers**

Parmi les aciers utilisés au niveau de l'industrie, on peut citer les suivants :

#### **A. Aciers non alliés et Aciers alliés**

Pour définir ces 2 classes d'aciers, on prend en compte :

- Pour un élément d'alliage autre que Mn, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée ;
- Pour le manganèse, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée (la limite prévue est alors portée à 1,80 %).

#### **• Aciers de qualité**

Les Aciers de qualité sont des Aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

✓ *Aciers de qualité non alliés : Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des Aciers spéciaux. [5]*

✓ *Aciers de qualité alliés : Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :*

- Des Aciers à grains fins soudables de construction métallique ;
- Des Aciers pour tôles magnétiques ;
- Des Aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine ;
- Des Aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et /ou Zr ;
- Des Aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu ;
- Des Aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite). [5]

#### **• Aciers spéciaux**

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement. [5]

✓ *Aciers spéciaux non alliés*

Font partie de cette catégorie :

- Des Aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu ;
- Des Aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques ;
- Des Aciers à teneur faible en inclusions ;
- Des Aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit ;
- Des Aciers dont la résilience KV en long à  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  est supérieure à 27J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers ;
- Des Aciers pour réacteurs nucléaires avec  $\text{Cu} \leq 0,10\%$ ,  $\text{Co} \leq 0,05\%$  et  $\text{V} \leq 0,05\%$  ;
- Des Aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 % ;
- Des Aciers pour armature de précontrainte du béton. [5]

✓ *Aciers spéciaux alliés*

Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie :

- les aciers de construction mécanique ;
- certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression ;
- certains aciers résistant au fluage ;
- les aciers pour roulement ;
- les aciers à outils et les aciers à coupe rapide ;
- des aciers à propriétés physiques spéciales. [5]

• **Aciers inoxydables :**

Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. On distingue les aciers inoxydables qui contiennent moins de 2,5 % de nickel de ceux qui contiennent au moins 2,5 % de nickel. Font partie de cette catégorie :

- les aciers résistant à la corrosion ;
- les aciers résistant à l'oxydation à chaud ;
- certains aciers résistant au fluage. [5]

**B. Les aciers au carbone**

Les Aciers au carbone ne contiennent aucun élément d'alliage autre que le carbone. L'addition de carbone augmente la résistance à la traction, à la dureté et à la corrosion, mais diminue la ductilité et la malléabilité. Même en très petites quantités, le carbone modifie grandement la résistance du fer. Les Aciers au carbone se divisent en trois sous-familles : les Aciers doux, les Aciers à moyenne teneur en carbone et les Aciers à forte teneur en carbone. Du point de vue pratique, la teneur en

carbone de l'Acier peut varier entre 0.05% et 1.35%, donnant ainsi diverses nuances. Outre le carbone, il existe dans l'Acier, en proportions infimes, d'autres éléments tels le Manganèse, Mg, le Phosphore, P, le Soufre, S, et le Silicium, Si. La dureté d'un Acier est fonction de sa teneur en Carbone. [6]

- **Les Aciers à faible teneur de Carbone (%C<0.25%) :**

Ces Aciers sont produits en grande quantité et à moindre coût et se caractérisent par une grande ductilité et une grande ténacité mais une faible résistance.

Ils sont généralement renforcés par écrouissage (amélioration de la résistance et de la dureté par déformation plastique). Leur résistance à la traction se situe entre 415 et 550 MPa et leur allongement à la rupture peut atteindre 25%. Par ailleurs, ils peuvent être facilement usinés et soudés. On les trouve dans diverses applications (éléments de construction tels que les poutres, les profilés, les cornières, carrosserie de voitures, boîtes de conserve). [6]

- **Les Aciers à moyenne teneur de Carbone (0.25% à 0.6% de C) :**

Ces Aciers offrent de meilleures combinaisons résistance-ductilité lorsqu'ils sont traités thermiquement (austénisation, trempe, revenu et recuit). L'apport d'éléments d'addition tels que le Chrome, le Nickel et le Molybdène facilitent ces traitements. Ces Aciers sont utilisés dans la fabrication de vilebrequins, d'engrenages, de roues et voies ferrés et autre pièce de structures qui nécessitent de grandes résistances et ductilité. L'austénisation consiste à chauffer au cours de l'élaboration l'alliage à une température comprise entre 750 et 900°C pour obtenir la structure austénite c.f.c (ou fer gamma). [6]

- **Les Aciers à forte teneur de Carbone (0.6% à 1.4% de C)**

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité. Étant résistant à l'usure, ils sont, utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices. On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le Chrome, le Vanadium et le Tungstène afin d'obtenir des composés de Carbures pour améliorer leur dureté. [7]

### **I.3.2. Fontes**

Les alliages de Fer et de Carbone dont la teneur en Carbone est supérieure à 2% s'appellent Fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S, dans le cas des Fontes non alliées et de plus du Chrome, du Molybdène, de l'Aluminium, etc., dans le cas des Fontes alliées. Elles ont une excellente coulabilité. Elles permettent donc d'obtenir des pièces de fonderie (pièces moulées) aux formes complexes. Elles sont assez fragiles (cassantes), difficilement soudables et ont une bonne usinabilité. [5]

### I.3.2.1 Types de fontes

D'après la forme du graphite et les conditions de sa formation, les fontes sont classées de la façon suivante :

#### A. Fontes à Graphite Lamellaire

Les fontes à graphite lamellaire, appelées « fontes grises » sont très utilisées car elles sont économiques, amortissent bien les vibrations, ont une bonne coulabilité et usinabilité, sont peu oxydables, ont une bonne résistance à l'usure par frottement et résistant bien aux sollicitations de compression. Elles sont utilisées pour la fabrication des carters, bâtis, blocs moteur et pièces aux formes complexes....

*Désignation* : après le préfixe « EN », les fontes sont désignées par le symbole « GJL » suivi de la valeur en MPa (méga Pascals) de la résistance minimale à la rupture par extension. [4]

*Exemple* : EN-GJL-300 (fonte à graphite lamellaire de résistance  $Re\ mini = 300\text{Mpa}$ ).

#### B. Fontes malléables à Graphite Sphéroïdale

Les Fontes à graphite sphéroïdale sont obtenues par adjonction d'une faible quantité de Magnésium avant moulage. Elles sont plus légères et ont une meilleure résistance mécanique que les Fontes grises. Elles sont utilisées pour étriers de freins, vilebrequins, tuyauteries soumises à hautes pressions.

*Désignation* : après le préfixe EN, les fontes sont désignées par le symbole (GJMW, GJMB, GJS) suivi de la valeur en méga Pascals de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de l'allongement après rupture. [5]

*Exemple* : EN-GJS-400-18 (fonte à graphite sphéroïdale,  $Re\ mini = 400\text{MPa}$  et d'allongement  $A\% = 18$ ).

### I.4. Métaux non ferreux

Les principales familles, avec leurs alliages sont : l'Aluminium, le Cuivre, le Magnésium, le Zinc, le Titane et le Nickel. La plupart de ces matériaux sont commercialisés sous plusieurs formes ou dans des états métallurgiques différents (brut, recuit, écroui, durci), l'utilisateur choisissant l'état de livraison qui lui convient. [6]

**Tableau I.2:** Classification des métaux non ferreux [5]

élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Facteur multiplicateur
Aluminium	AL	A	10
Azote	N	N	10 <sup>2</sup>
Bore	B	B	10 <sup>3</sup>
Chrome	CR	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	10 <sup>2</sup>
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	10 <sup>2</sup>
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
vanadium	V	V	10

#### I.4.1. Alliage d'Aluminium

Fabriqués industriellement depuis 1886 à partir des bauxites et de la cryolithe, ces métaux sont les utilisés juste après les fontes et les aciers. Ils sont caractérisés par:

- Bas point de fusion (658°C); ductilité élevée (A% 40%) ; assez léger (densité = 2700 Kg/m<sup>3</sup>) ; bonne conductivité thermique 1,5 fois celui des aciers, propriétés réfléchissantes.
- Bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports, comme l'aéronautique, par exemple.
- Résistance à la corrosion élevée. Le métal se couvre, au contact de l'air, d'une couche d'oxyde protectrice, les éléments d'addition affectent plus ou moins cette résistance.
- Résistance mécanique : elle peut être modifiée par écrouissage ou par recuit (adoucissement).

#### **Inconvénients :**

Faibles résistances à l'usure et à la fatigue. Ces alliages sont assez faciles en mise en œuvre par un grand nombre de procédés : laminage, forgeage, formage, étirage, extrusion, métallurgie des

poudres. L'élasticité élevée peut gêner certains usinages. Le coefficient de dilatation important et la grande conductivité thermique imposent, à cause des dilatations, certaines précautions en soudage et en usinage. [1]

#### I.4.2. Alliages corroyés

Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant (barres, profilés, tôles...).

*Désignation* : Elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AW- comme préfixe (A pour l'aluminium, W pour corroyer), éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets.

*Exemples* :  $\left. \begin{array}{l} \text{EN AW-5086 [AlMg4]} : \text{alliage d'Aluminium avec 4 \% de Magnésium.} \\ \text{EN AW-1050A [Al99, 5]} : \text{un Aluminium pur à 99,5 \% .} \end{array} \right\} [7]$

#### I.4.3. Alliage pour la fonderie

La plupart des nuances sont faciles à mouler (moule métallique permanent ou moulage en sable) en moyenne ou en grande série et en pièce unitaire.

##### Inconvénients :

Grand retrait au moulage (3,5 à 8,5% en volume) qui peut être minimisé par un bon tracé de la pièce.

*Désignation* : Elle est effectuée par un nombre à quatre chiffres, avec EN AB (C ou M) - comme préfixe, éventuellement suivi par le symbole chimique de l'alliage placé entre crochets [7].

*Exemple* : EN AC-45400 ou EN AC-AlSi5Cu3 : Alliage avec 5% de silicium et 3% de cuivre

#### I.4.4. Alliage de cuivre

Il existe plus de 200 alliages de cuivre, les principales familles sont : les Laitons (Cu+Zn), les Bronzes (Cu+Sn), les Cupronickels (Cu+Ni), les Cupro-aluminiums (Cu+Al) et les Maillechorts (Cu+Ni+Zn). [7]

*Exemple* : Cu Zn 27 Ni 18 : Maillechort avec 27% de zinc et 18% de nickel

#### I.4.5. Laitons

C'est la famille la plus utilisée, l'addition de Zinc (jusqu'à 42%) diminue le prix de base, augmente Rr et A%, ce qui favorise l'emboutissage (A% = 60 % avec 31% de Zn), et diminue la température de fusion, ce qui facilite le moulage. Une addition supplémentaire de Plomb, de 2 à 3 %, augmente l'usinabilité. Les Laitons ainsi obtenus (Laitons de décolletage) servent de référence pour évaluer l'usinabilité des autres matériaux. [7]

# CHAPITRE II

Comportement à l'impact des matériaux métalliques

## II.1. Introduction

La connaissance du comportement mécanique d'un matériau soumis à de fortes sollicitations dynamiques s'avère indispensable afin d'optimiser la conception de structures appelées à subir des conditions extrêmes de chargement. Dans ce but, de nombreux modèles rhéologiques visant à restituer les phénomènes observés en reliant les différents paramètres mécaniques (déformation, contrainte, vitesse de déformation, température...) ont été élaborés ces dernières années. Ces modèles rhéologiques appelés lois de comportement trouvent une application majeure dans les codes de calcul pour leur rôle de prédiction du comportement thermomécanique des matériaux. Ce qui permet de simuler numériquement la réponse mécanique des structures sous chargements extrêmes comme l'impact et la perforation. L'objet de ce chapitre consiste à dresser l'état de l'art du comportement des matériaux métalliques soumis à un impact balistique. Différents paramètres influencent ce comportement : la vitesse d'impact, la géométrie et les propriétés mécanique du projectile, l'angle de pénétration, le comportement thermomécanique de la cible. Pour cela, nous analyserons tour à tour l'influence des différents paramètres précités sur le processus de perforation des plaques métalliques. Nous décrirons par la suite les différentes méthodes numériques permettant de simuler l'essai de perforation. Un bilan des principales lois constitutives susceptibles de prédire le comportement mécanique des matériaux solides cristallins soumis à de fortes sollicitations dynamiques sera réalisé. Nous analyserons en détails deux de ces lois de comportement qui seront implémentés dans le code de calculs EF pour simuler l'impact et la perforation. Une attention sera portée au critère de rupture à implémenter dans le code de calcul pour prédire numériquement la rupture du matériau. [8]

## 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 piquûres. Cependant, les effets à faible énergie ne doivent pas être négligés car ils provoquent des microfissures et un délaminage dans le cas des composites. [9]



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:

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

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 [10]

- Les impacts à faible vitesse (de l'ordre de 1 m.s<sup>-1</sup>) ;
- Les impacts à forte vitesse (de l'ordre de 100 m.s<sup>-1</sup>).

**II.4. Définition d'un impact**

En mécanique, un impact se réfère généralement à la collision entre deux objets physiques. C'est un événement où deux corps entrent en contact de manière brusque et produisent des forces importantes pendant une période très courte. Les impacts peuvent être étudiés en termes de conservation de la quantité de mouvement, de conservation de l'énergie cinétique, et d'autres principes de la dynamique. Ils sont souvent analysés pour comprendre les effets des collisions sur les objets impliqués, tels que les déformations, les changements de vitesse et les dommages matériels. Les impacts peuvent être classés en fonction de leur nature, tels que les impacts élastiques où l'énergie cinétique est conservée, et les impacts inélastiques

où une partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur, de déformation ou d'autres formes d'énergie.

### III.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:

- **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).

À noter que les notions de limite balistique et de vitesse résiduelle sont difficiles à mettre en œuvre avec précision à un niveau expérimental. [11]

## II.6. 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 ou les vitesses d'impact du projectile sont inférieures à 10 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. [12]

## II.7. Classification de l'impact

- Un impact à basse vitesse est défini comme un impact pour lequel la période de contact du projectile avec la cible est supérieure à la période du mode de vibration le plus bas. À basse vitesse d'impact, les conditions aux limites sont cruciales car l'onde de choc générée au niveau du point d'impact a le temps de se propager jusqu'aux bords de la structure, causant une réponse pleinement vibratoire .
- Un impact à haute vitesse est défini comme un impact pour lequel le temps de contact de l'impacter avec la cible est inférieur à la période du plus petit mode de vibration de la structure. La réponse de la cible est généralement indépendante des conditions aux limites et est essentiellement gouvernée par le comportement local du matériau au voisinage de la zone impactée.
- Lors d'un impact hyper véloc, la vitesse du projectile est tellement élevée que la contrainte induite lors de l'impact dépasse largement la résistance du matériau cible. Ce dernier est liquéfié localement.

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

Catégorie	Vitesse [m/s]	Masse [g]	Energie d'impact [J]	Domaine d'application
<b>Basse vitesse</b>	<10	50-30000	1-200	Transports
<b>Vitesse modéré</b>	50-200	1-200	1-4000	Transports
<b>Haute vitesse</b>	200-500	5-500	100-20000	Transports
<b>Balistique</b>	200-600	5-20	100-500	Protection militaire
<b>Très haute vitesses</b>	1000-5000	0.001	Env.100	Aérospatiale

## II.8. Influence des caractéristiques de l'impact

### II.8.1. Vitesse d'impact

Comme cela est schématisé sur la figure lors d'un impact à basse vitesse, la plaque est préférentiellement sollicitée en flexion. Ainsi, la structure a la possibilité d'emmagasiner une partie de l'énergie incidente de manière élastique. Sa rupture est ensuite initiée par des ruptures de matrice et de fibres sur la face opposée à l'impact. À haute vitesse, il n'y a plus d'effets de structure. Le temps de contact entre le projectile et la cible est trop court et les ondes n'ont pas le temps d'aller chercher les conditions aux limites. Par conséquent, les modes de rupture dominants sont entraînés par une réponse locale du matériau.

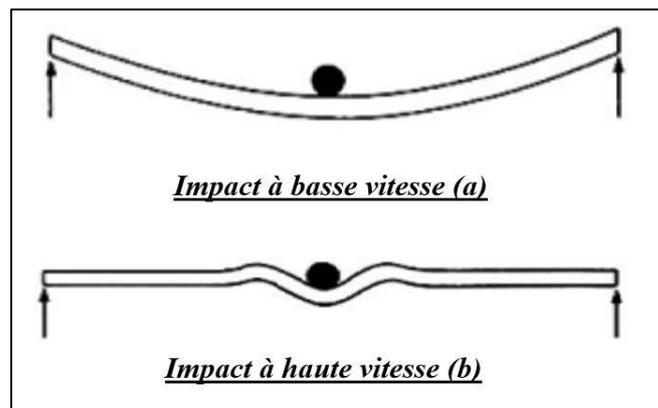


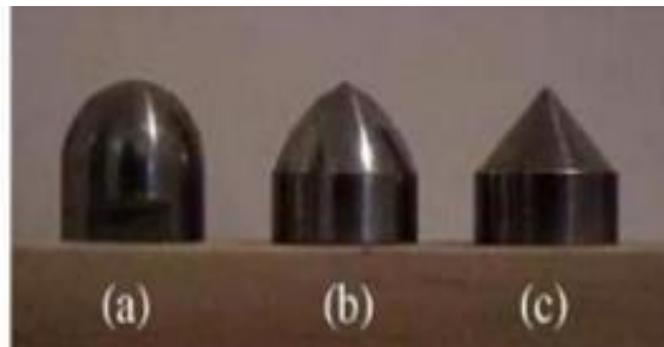
Figure II .2 : Illustration de l'effet de structure : impact basse vitesse (a) ; impact haute vitesse (b)

### II.8.2. Masse de l'impacteur

La masse de l'impacteur a une influence significative sur le comportement à l'impact d'une structure donnée. En effet, pour un niveau d'énergie et une géométrie donnée, une variation de la masse du projectile modifie le seuil d'initiation du premier dommage, la surface endommagée et l'énergie de perforation. L'énergie nécessaire pour initier le premier dommage augmente avec la masse du projectile. La surface endommagée est plus grande pour une masse de projectile plus faible. Enfin, l'énergie de perforation diminue avec la masse du projectile.

### II.8.3. Forme de l'impacteur

Mitrevski et al ont réalisé une série d'essais de type poids tombant pour étudier l'effet de la forme du projectile sur l'endommagement sous impact d'une structure composite. Trois géométries d'impacteur ont été utilisées : hémisphérique, ogivale et conique (figure II.3).



**Figure II. 3:** Géométrie d'impacteur : hémisphérique(a), ogivale(b) et conique(c) [13]

### **II.9. 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 ont 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. Ces lois sont utilisées pour des vitesses de déformation jusqu'à  $1000\text{ s}^{-1}$ . [14] 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'écrouissage 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.10. 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. [15]

**II.11. 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:

$$\sigma = (A + B \epsilon^n) (1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)) (1 - T^{*m}) \dots \dots \dots (II.2)$$

Où  $\sigma$  est la contrainte équivalente et  $\epsilon$  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 composants 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,  $\dot{\epsilon}^*$  et  $T^*$  sont:

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_{ref}}, \quad T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \dots \dots \dots (II.3) ; (II.4)$$

**II.12. Domaines d'applications de l'impact**

**II.12.1. Automobiles**

**a). Conditions d'impacts**

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. [16]

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'absorbeurs 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. [17]

## **II.12.2. 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 m.s-1).
- Les chocs à l'oiseau (de 100 à 600 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  $\text{m.s}^{-1}$  [11]. 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. [18]

## **II.12.3. 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  $\text{m.s}^{-1}$ .

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. [19]

### **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'emmagasinent 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 III

Etude numérique et analyse des résultats

### III.1. Introduction

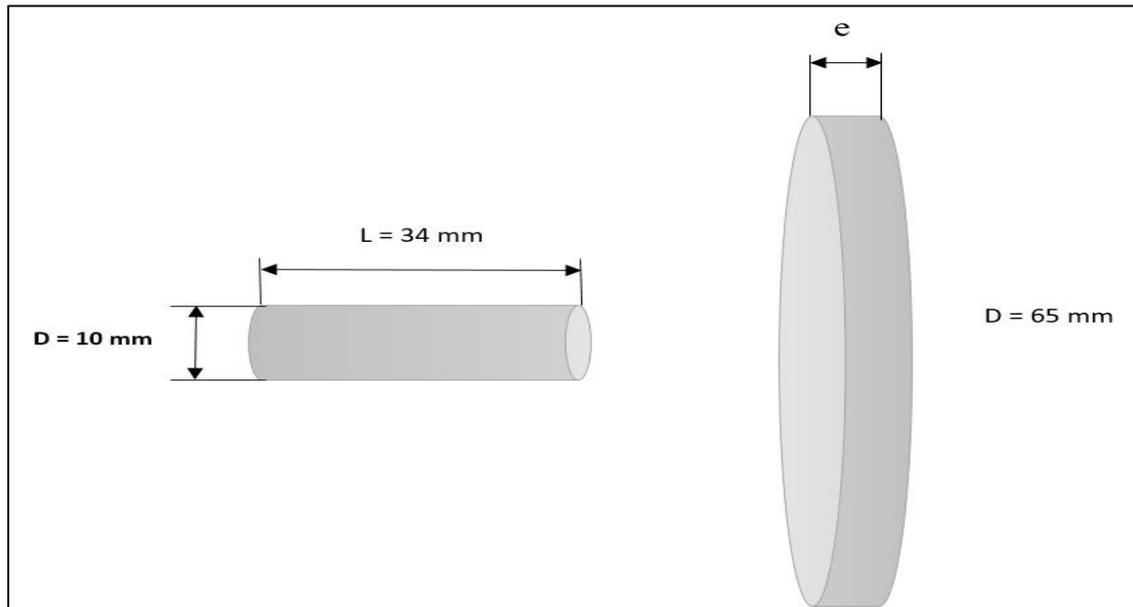
La connaissance du comportement mécanique d'un matériau soumis à des sollicitations dynamiques s'avère indispensable afin d'optimiser la conception de structures appelées à subir des conditions extrêmes de chargement. Dans ce but, de nombreux modèles rhéologiques visant à restituer les phénomènes observés en reliant les différents paramètres mécaniques (déformation, contrainte, vitesse de déformation, température...) ont été élaborés ces dernières années. Ces modèles rhéologiques appelés lois de comportement trouvent une application majeure dans les codes de calcul pour leur rôle de prédiction du comportement thermomécanique des matériaux. Ce qui permet de simuler numériquement la réponse mécanique des structures sous chargements extrêmes comme l'impact et la perforation. [10]

De plus, le comportement aux chocs reste difficile à prédire, ceci amène les industriels à faire des essais souvent coûteux afin de déterminer la réponse aux impacts de structures complexes, et de comprendre les phénomènes d'endommagement mis en jeu. La diminution du nombre d'essais passe forcément par une compréhension fine de ces phénomènes physiques ainsi que par le développement de modèles éléments finis de l'endommagement. Cependant, la modélisation des endommagements des structures complexes reste à l'heure actuelle difficile à réaliser

Dans ce travail on traite l'effet des paramètres géométriques et autres sur le comportement aux chocs des plaques métalliques à des vitesses moyennes.

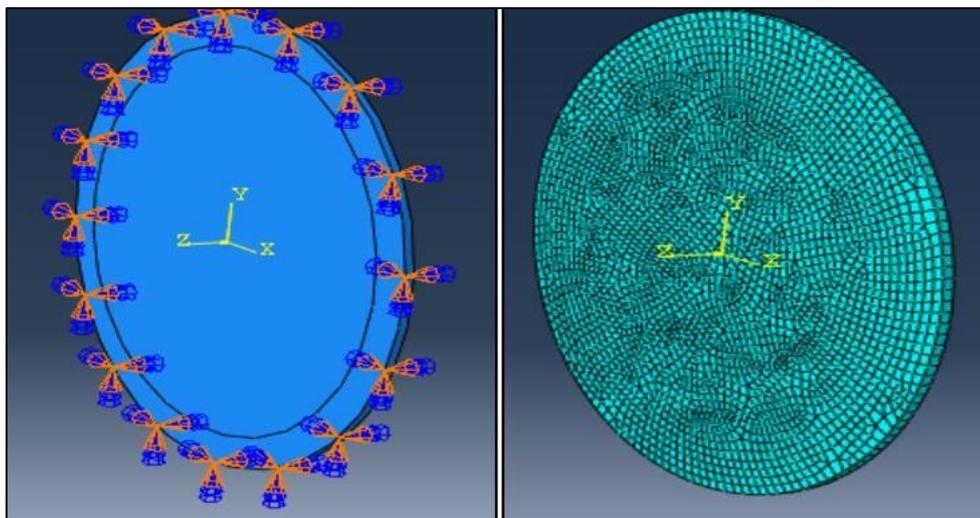
### III.2. Définition du modèle

Ce travail a pour objectif l'analyse de l'effet d'impact d'un projectile rigide sur le comportement des plaques métalliques au choc à vitesses moyennes. Plusieurs facteurs ont été traités comme la masse de l'impacteur, le matériau et l'épaisseur des plaques ainsi que l'angle de frappe entre plaque et le projectile. Pour ce faire, des plaques en Acier AISI1045, AISI4340 en Aluminium 6061-T6 et en Carbure de Silicium SiC, de formes circulaires et de diamètre  $D=65$  mm ont été analysées selon différentes facteurs d'impact. Les (figure III.1) représente la forme de plaques et de projectiles utilisés dans ce travail.



**Figure III.1 :** Représentation schématique du modèle utilisés

Dans notre cas on s'intéresse juste de la réponse des plaques au phénomène d'impact c'est pour cette raison que le projectile a été modélisé comme un corps rigide tridimensionnel non déformable. Pour affecter la masse et la vitesse, un point de référence a été créer à l'extrémité de l'impacteur. La plaque est considérée comme un corps 3D déformable, la plaque a été maillée en utilisant des éléments hexaédriques C3D8I (éléments linéaires à 8 nœuds à mode incompatible) disponibles dans la librairie d'Abaqus. Les conditions aux limites des plaques analysées sont indiquées sur la (figure.III.2). 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.2 :** Conditions aux limites et maillage des plaques

Selon les travaux réalisés précédemment dans ce domaine et suivant les informations et les paramètres disponibles dans la littérature, nous avons choisi trois différents types de métaux pour élargir l'étude de l'influence de la masse de projectile, l'épaisseur de la plaque, la vitesse d'impact ainsi que l'angle de frappe sur la réponse à l'impact des matériaux métalliques. Les propriétés des matériaux utilisés sont indiquées dans les tableaux (III.1) (III.2) et (III.3).

**Tableau III.1** : propriétés des matériaux utilisés

<i>Type de matériau</i>	<b>Module d'élasticité E (GPa)</b>	<b>Coefficient de poisson (<math>\mu</math>)</b>	<b>Masse volumique Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>6061-T6</b>	69	0.33	2700
<b>AISI4340</b>	210	0.3	7850
<b>SiC</b>	220	0.4	3215
<b>AISI 1045</b>	200	0.3	7870

**Tableau III.2** : paramétré de Johnson-Cook des matériaux utilisés

<b>Paramètre</b>	<b>A [MPa]</b>	<b>B [MPa]</b>	<b>n</b>	<b>m</b>	<b>C</b>
<b>6061-T6</b>	324	114	0.42	1.34	0.002
<b>AISI(4340)</b>	792	510	0.26	1.03	0.014
<b>SiC</b>	1506	177	0.12	1	0.016
<b>AISI(1045)</b>	551.1	600.8	0.234	1	0.0134

**Tableau III.3** : paramétré d'endommagement Johnson-Cook [Damage]

<b>Paramètre</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>
<b>6061-T6</b>	-0.77	1.45	-0.47	0.00	1.6
<b>AISI-4340</b>	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61
<b>SiC</b>	0	0.33	-1.5	0	1.6
<b>AISI-1045</b>	0.1	0.76	-1.57	0.005	-0.84

### III.3. Analyse des résultats

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

Dans cette partie, un projectile de forme cylindrique est éjecté perpendiculairement sur une plaque en Acier AISI1045 de diamètre  $D=65$ [mm] et une épaisseur  $e=1$ [mm]. Afin de traiter l'influence de la masse et la vitesse nous avons varié la masse du projectile en utilisant une masse de 0.25 ,0.5 et 1 kg; ces calculs sont effectués avec trois vitesses différentes 100,150 et 200[m/s]. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau (III.4).

**Tableau III .4 :** L'effet de la vitesse d'impact et la masse de projectile sur les contraintes et déformations de la plaque

		$\delta$ [Pa] (la contrainte)			$\epsilon$ (déformation)		
MASSE [KG]	V [m/s]	0.25	0.5	1	0.25	0.5	1
		100	$9.95e^8$	$9.952e^8$	$9.941e^8$	$4.195e^{-2}$	$4.143e^{-2}$
150	$1.123e^9$	$1.121e^9$	$1.130e^9$	$1.582e^{-1}$	$1.574e^{-1}$	$1.542e^{-1}$	
200	$1.238e^9$	$1.241e^9$	$1.244e^9$	$3.568e^{-1}$	$3.635e^{-1}$	$3.788e^{-1}$	

Les résultats obtenus dans ce cas montrent une stabilité de l'intensité de contraintes et des déformations malgré le changement de la masse de projectile, par exemple pour une vitesse de 100 m/s les contraintes sont aux alentours de **0.9 GPa** et les déformations se stabilisent à une valeur de **0.04** pour les trois masses utilisées. La même remarque pour la vitesse de 150 200 m/s. Par contre nous avons remarquer que la valeur de la contrainte et de déformation, pour une même masse de projectile, augmente avec l'augmentation de la vitesse d'impact. Cela signifie que la vitesse d'impact est un facteur influençant, par rapport à la masse de l'impacteur, dans le domaine de l'impact mécanique.

#### III.3.2. Effet de l'épaisseur de la plaque

Dans ce cas, on a étudié la résistance à l'impact d'une plaque en **Acier AISI 1045** à différentes épaisseurs. On fait varier l'épaisseur de la plaque ( **$e = 1, 2$  et  $3$  mm**) en gardant les mêmes paramètres du projectile, cylindrique avec une masse de 1 Kg. La vitesse de contact entre la plaque et l'impacteur est de 100 m/s.

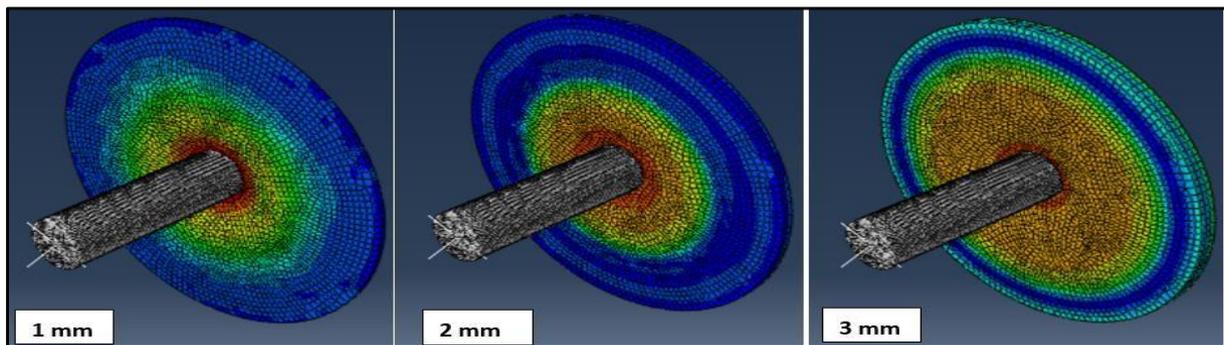


Figure III.3 : Représentation des essais réalisés sur l'effet de l'épaisseur de plaque

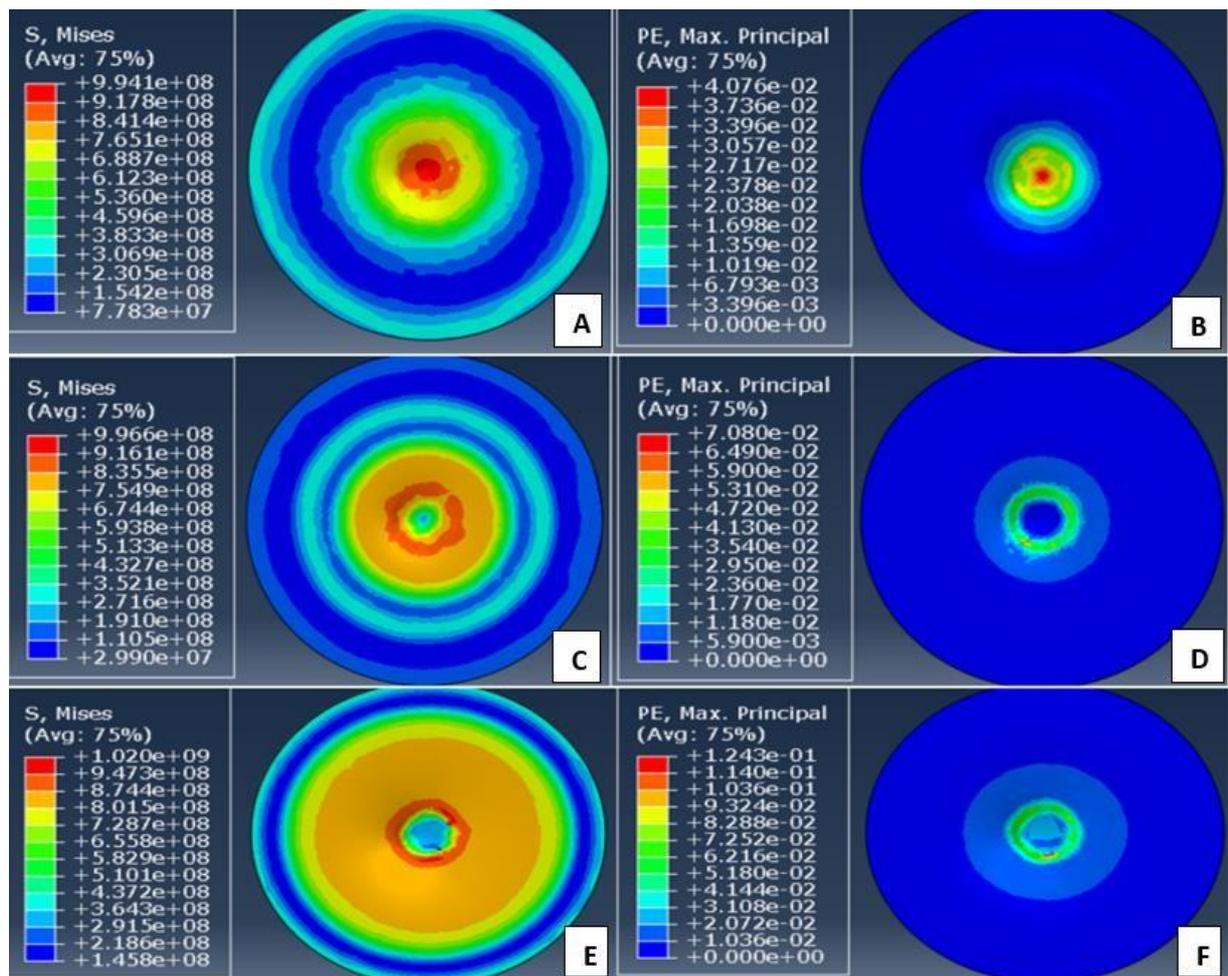


Figure III.4 : L'effet de l'épaisseur de plaque sur la propagation des contraintes et la déformation des plaques

D'après la figure III.4 nous observons que l'intensité de contraintes les plus élevés se localisent au centre de la plaque pour l'essai de  $e=1\text{ mm}$ , contrairement aux épaisseurs restantes ou les contraintes sont localisées au tour du périmètre de projectile. Nous observons aussi que l'intensité de contraintes augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de plaques, par exemple la contrainte la plus faible est marquée pour l'épaisseur de 1 mm (figure III.4.B), mais en

parallèle, les zones dangereuses sont plus importantes dans ce cas comparativement aux épaisseurs de 2 et 3 mm (figues III.4.B.D.F). Autrement dit, pour une même intensité de contraintes et une même valeur de déformation, le projectile provoque des dégâts énormes et dangereuses sur les plaques ou les structures ayant l'épaisseur le plus faibles.

### III.3.3. Effet du type de matériaux utilisé pour la plaque

Dans cette partie de travail nous avons fait une comparaison entre trois types de matériaux pour la plaque, l'Aluminium 6061-T6, l'Acier AISI-4340 et le Carbure de Silicium (SiC). Un projectile de type cylindrique à bout plat et de masse de 1 Kg est lancer perpendiculairement vers une plaque de 1mm d'épaisseur. Pour que les résultats soient plus fiables les essais ont été effectués avec trois vitesses différentes (faible vitesse 35[m/s], moyenne 150 [m/s]et grande vitesse 300 [m/s]). Les résultats obtenus sont illustrés dans les figures III.5, III.6.

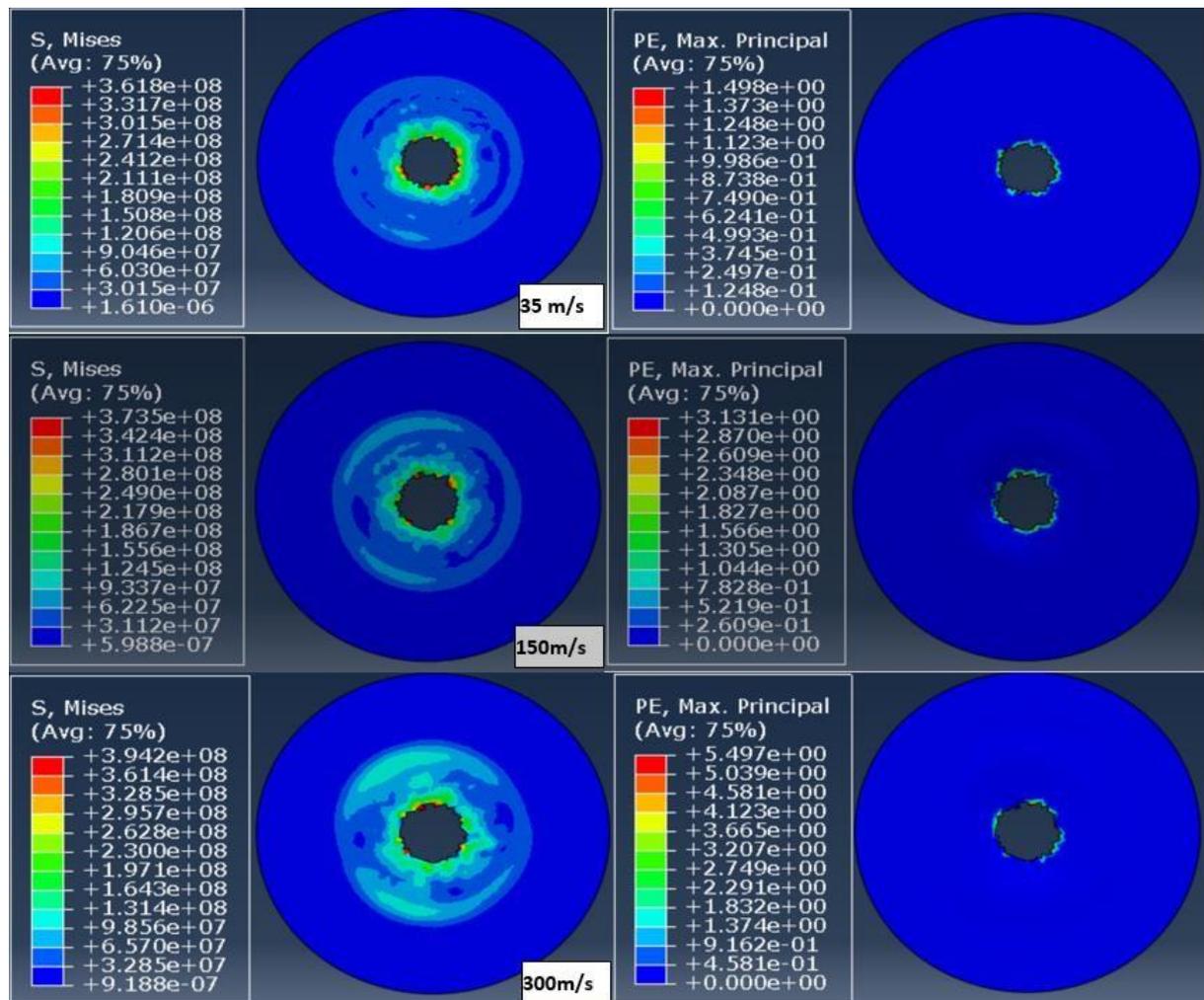


Figure III.5: Représentation de la perforation directe du projectile sur les plaques en Aluminium

Dans le cas de l'Aluminium, figure III.5, il y'avait une perforation directe de la plaque pour toutes les vitesses, dès le premier contact, nous observons une détérioration de la plaque, le projectile avance en arrachant de la matière suivant son périmètre. Nous observons aussi dans le cas des vitesses de 150 et 300 m/s pour les trois types de matériaux qu'il y a des ondes de déformations qui se propagent du centre de la plaque vers la zone encastree.

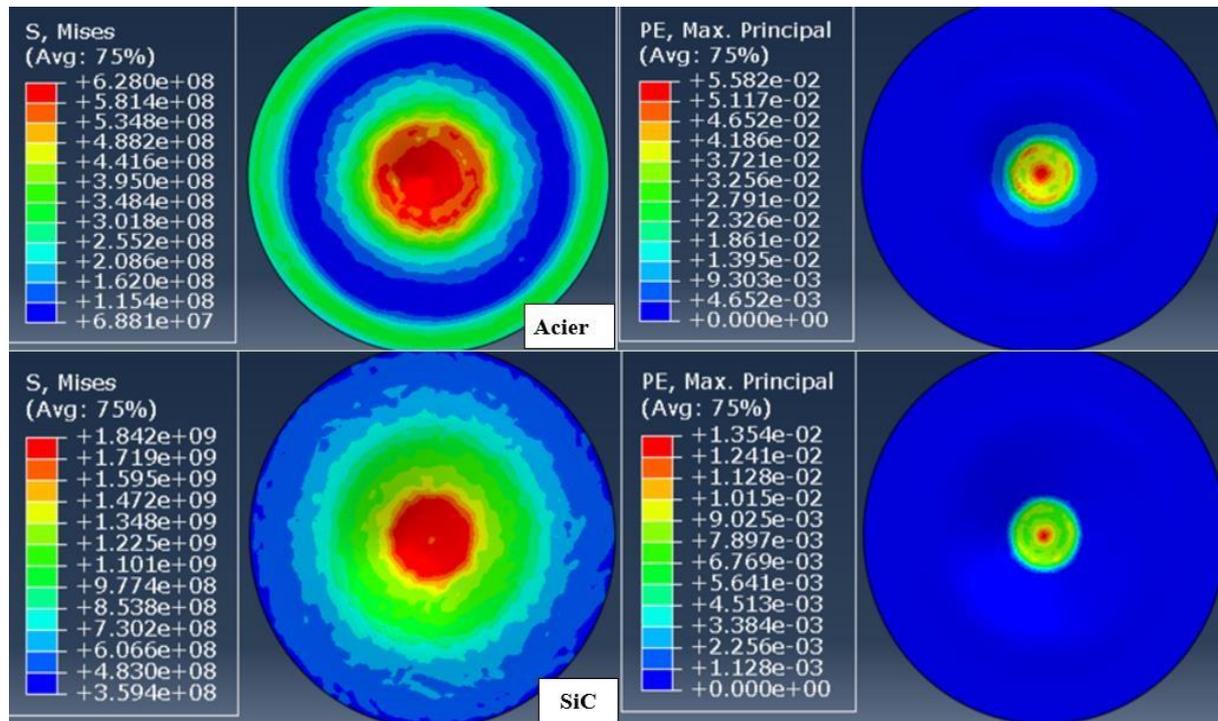


Figure III.6 : Concentration des contraintes et des déformations cas de l'Acier et SiC (V =35 m/s)

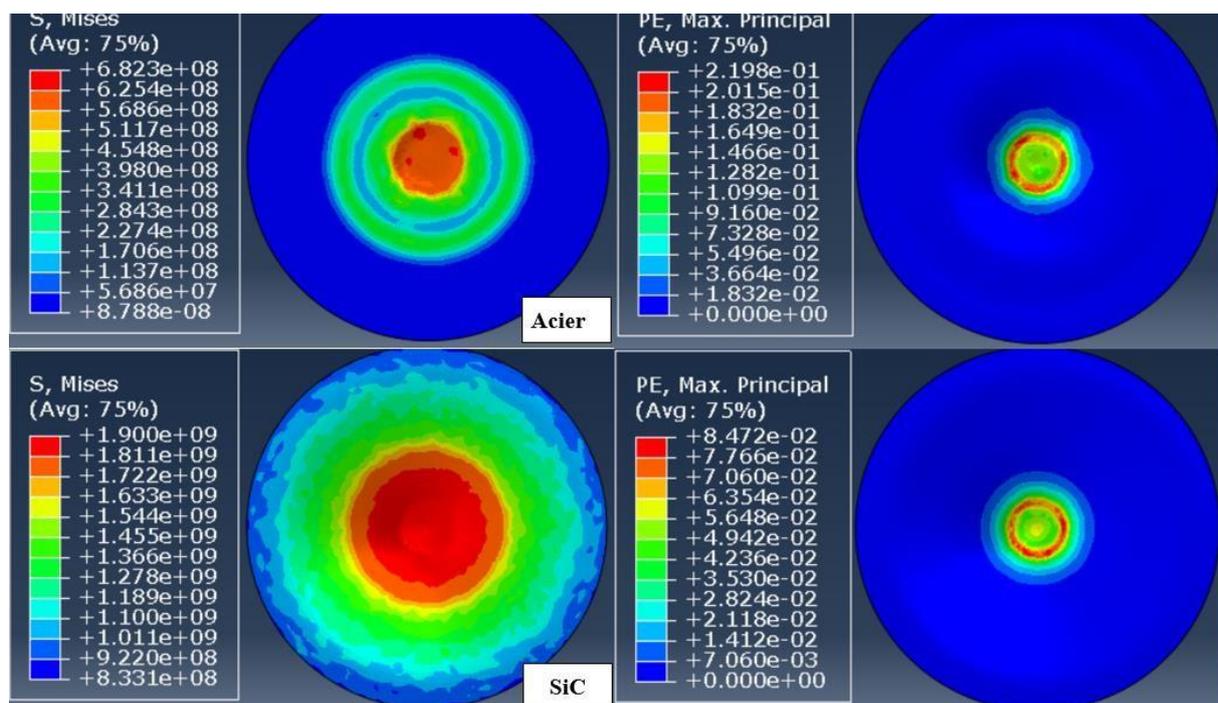
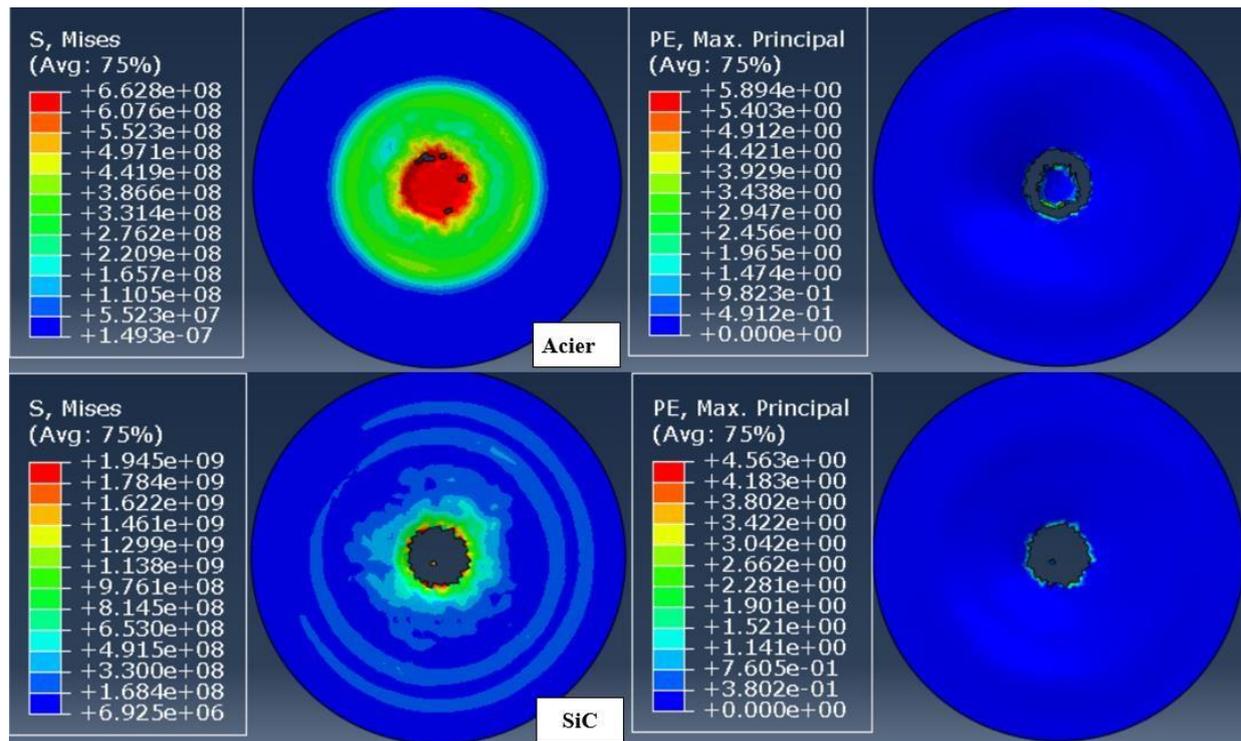


Figure III.7 : Concentration des contraintes et des déformations cas de l'Acier et SiC (V =150 m/s)

Les figures III.6 et III.7 montrent la concentration des contraintes et des déformations de l'Acier AISI 4340 et du SiC pour des vitesses de 35 et 150 m/s. Nous observons que les zones dangereuses se localisent au centre des plaques et suivant la surface de contact entre plaque-projectile. L'intensité de contraintes la plus élevée est marquée sur les essais de SiC (1.9 GPa), à ce niveau de contrainte la déformation est de 0.084, par contre, une contrainte de 0.682 GPa a marqué des déformations de 0.21, cela signifie que le SiC est plus résistant aux chocs mécaniques par rapport à l'Acier 4340.



**Figure III.8** : Concentration des contraintes et des déformations cas de l'Acier et SCI ( $V = 300\text{m/s}$ )

La figure III.8 montre la concentration des contraintes et les déformations de l'Acier et de SiC à une vitesse de 300 m/s. A ce niveau de vitesse nous sommes dans le cas de l'impact à grandes vitesses. Comme le montre la figure et pour les deux matériaux, le projectile a pu pénétrer dans les plaques selon deux différents modes de déformation, cisaillement dynamique avec éjection de bouchant pour le cas de l'Acier et déformation par fragmentation pour le cas de SiC, cela est dû à la nature des deux matériaux, l'Acier est un matériaux plus ductile.

D'après ces essais, nous constatons que l'Acier 4340 et le SiC peut résistés à l'impact à faibles et moyennes vitesses, mais pour le cas de l'impact à vitesses élevées ça nécessite d'autres améliorations que doit subir les échantillons à testés comme l'épaisseur de la plaque par exemple.

III.3.4. L'effet de l'angle de contact

Dans ce cas nous traitons l'effet de l'angle de contact entre la plaque et le projectile à moyenne vitesses (vitesse modérée). En utilisant les mêmes dimensions de la plaque et du projectile nous variant juste l'angle d'impact ( $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$  et  $\alpha = 15^\circ$ ). Le matériau utilisé est l'Acier AISI 1045, le projectile est de 1 Kg de masse lancer à une vitesse  $v = 100$  [m/s].

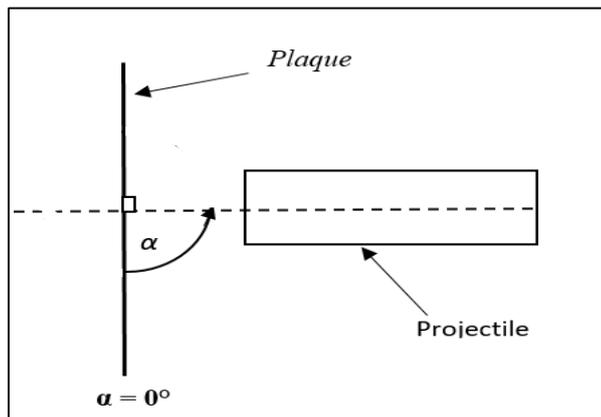


Figure III.9 : Schématisation des essais réalisés sur l'effet de l'angle de contact

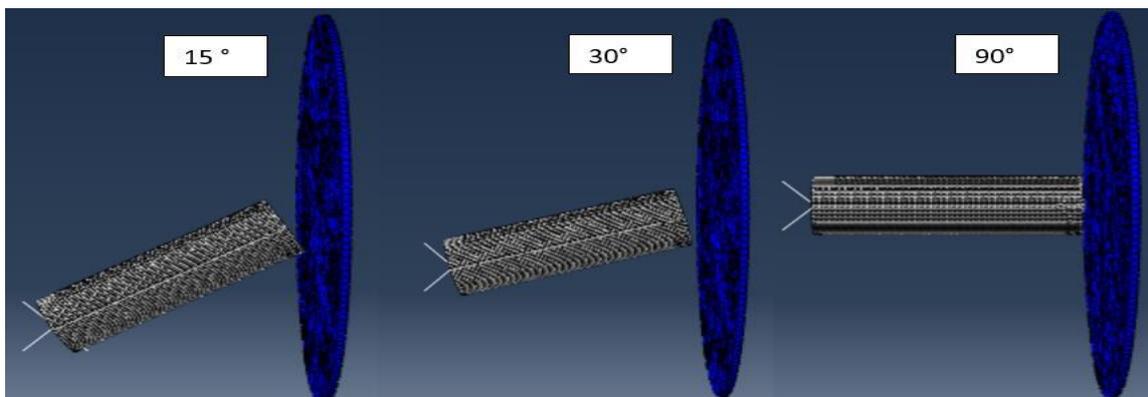


Figure III.10 : Représentation des essais réalisés sur l'effet de l'angle de contact

Tableau III .5 : L'effet de l'angle de contact

	$\delta$ [GPa] (la contrainte)	$\epsilon$ (déformation)
<b>90 °</b>	0.9	0.04
<b>30 °</b>	1.01	0.06
<b>15 °</b>	1.11	0.17

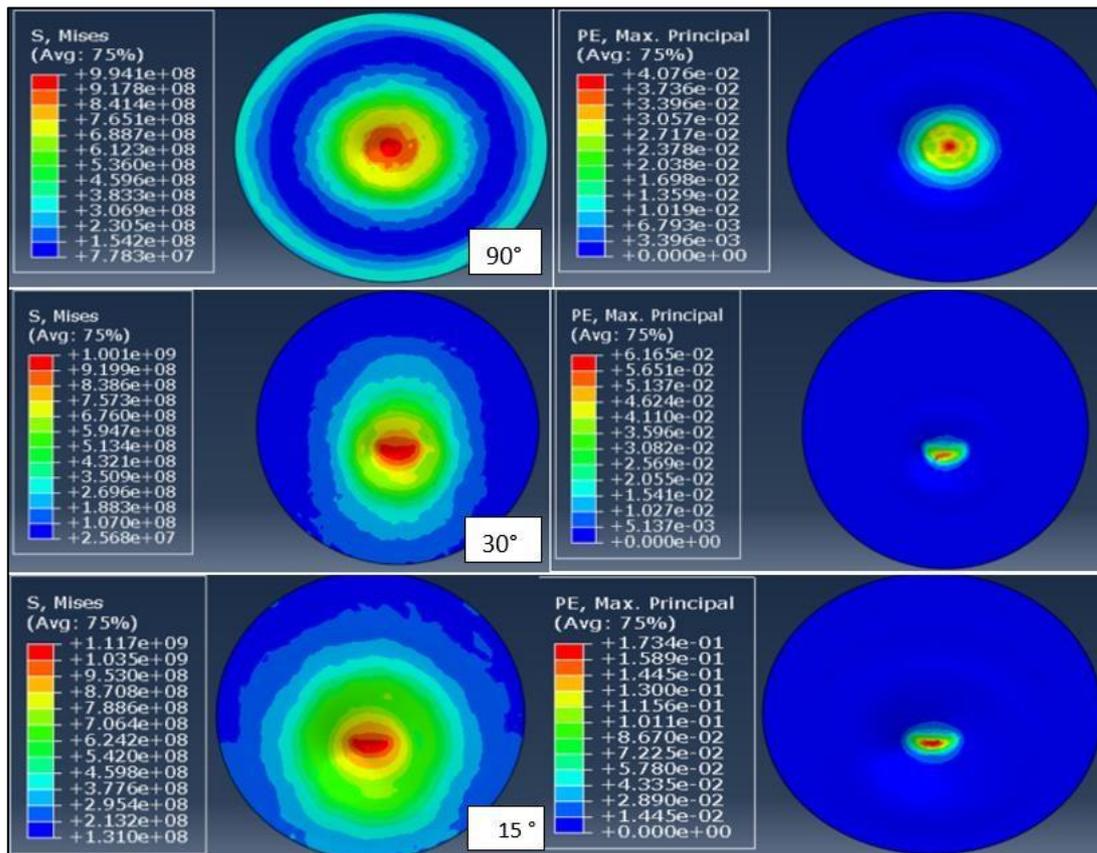


Figure III.11 : Représentation des essais réalisés sur l’effet de l’angle de contact

Dans ce cas nous observons que l’intensité de contraintes est plus élevée pour les angles les plus faibles, la figure III.11 montre aussi que les contraintes se localisent et devient plus dangereuses à chaque fois le bout impactant devient aigu. Les résultats obtenus montrent aussi une croissance de la déformation avec l’inclinaison du projectile, par exemple la déformation marquée à 90 ° est de 0.04 plus faible que la valeur obtenue à 15° qui est égal à 0.17, cela est due à la surface de contact qui devient plus faible et que le projectile frappe la plaque avec l’arrêt tranchante à des angles plus faibles.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale

L'étude des mécanismes de déformation des matériaux métalliques est complexe en raison de la diversité de leurs propriétés mécaniques, de leurs microstructures, de leurs compositions chimiques, ainsi que des différents traitements thermiques appliqués à chaque pièce.

Dans ce travail nous avons étudié quatre exemples différents de problème d'impact en utilisant un projectile rigide et des plaques en Acier AISI1045, AISI4340 en Aluminium 6061-T6 et en Carbure de Silicium SiC, de formes circulaires.

Le premier cas étudié est l'effet de la vitesse d'impact et la masse de projectile. Dans les cas suivants nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la plaque, type de matériaux utilisé pour la plaque et l'angle de contact.

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

- ✓ La vitesse d'impact est le principal facteur influençant les tests de résistance aux chocs mécaniques.
- ✓ Les contraintes augmentent avec l'épaisseur des plaques, mais les dommages causés par le projectile sont plus considérables sur les plaques plus minces malgré des intensités de contraintes et des valeurs de déformation identiques.
- ✓ Les résultats indiquent que l'Acier AISI 4340 et le SiC peuvent résister aux impacts à faibles et moyennes vitesses. Cependant, à des vitesses élevées, des améliorations telles que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque peuvent être nécessaires pour assurer une résistance adéquate.
- ✓ Lorsque l'angle d'impact du projectile est plus faible, la surface de contact effective entre le projectile et la plaque diminue, ce qui signifie que la force de l'impact est concentrée sur une zone plus petite. En conséquence, la pression exercée sur la plaque est plus élevée, ce qui entraîne une déformation plus importante du matériau.
- ✓ Les déformations les plus importantes ont été observées à des angles d'impact plus faibles, où le projectile frappe la plaque de manière plus tranchante, concentrant la force sur une zone plus restreinte.

## *Références bibliographiques*

- [1] « MATÉRIAUX MÉTALLIQUES » Michel Colombie.
- [2] ÉLABORATION DES MÉTAUX FERREUX (FONTES ET ACIERS), L'AUTEUR:  
S. BENZAADA
- [3] « SCIENCE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION » GHOMARI Fouad  
UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID. Tlemcen
- [4] HIDOURI, A., 2016. COURS DE MATÉRIAUX MÉTALLIQUES. Institut Supérieur des  
Études Technologiques de Gafsa, Tunisie.
- [5] G. Murry, « Aide-mémoire Métallurgie 2e édition Métaux • Alliages • Propriétés,  
Dunod », Paris, 2004, 2010.
- [6] : « ÉTUDE ET CONCEPTION D'UN MOULE D'INJECTION ALUMINIUM POUR LA  
PRODUCTION D'UNE PATTE DE CARCASSE TYPE 163 » Présenté par: Melle  
HADDADI Hanane et Mr GANA Ahmed » Université Mouloud Mammeri de Tizi-  
Ouzou.2022
- [7] : K. SAADI; « L'étude de l'effet thermique sur une soudure d'un pipeline »; mémoire de  
master ; unive de biskra ;2012.
- [8] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, and Y. Bai, "Calibration and evaluation of seven fracture  
models," International Journal of Mechanical Sciences, vol. 47, pp. 719–743, Apr. 2005.
- [9] Thèse doctorat d'état en sciences mathématiques mécanique « instabilités thermo-  
viscoplastiques aux grandes vitesses de déformation »
- [10] Thèse « Étude du comportement dynamique et modélisation thermo-viscoplastique de  
nuances d'acier soumises à un impact balistique » Présentée par: Kokouvi Mawuli  
KPENYIGBA thèse de doctorat Université de LORRAINE .23 octobre 2013
- [11] Abdessamad BACHIRI 1 \*, Nouredine DJEBBAR 2, Benali BOUTABOUT1 Effet de  
l'impact du projectile sur le comportement mécanique des avions\*\* (2021)
- [12] Escalé-Laurent Élaboration d'un matériau composite multifonctionnel, thèse de doctorat  
Université de Toulouse, 17 décembre 2013

- [13] Thèse « Contribution à la caractérisation de la déformation et de la rupture dynamique de structures sous impact »
- [14] [http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/derardjaakila/files/chap1cmmm.pptxenregistreme\\_n\\_automatique.pdf](http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/derardjaakila/files/chap1cmmm.pptxenregistreme_n_automatique.pdf)
- [15] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI « Comportement à l'impact des matériaux composites » Master 2 MQM 2006-2007.
- [16] Thèse doctorat d'état es sciences mathématiques mécanique « instabilités thermo-viscoplastiques aux grandes vitesses de déformation ».
- [17] VALERSTEINAS P., Projet Mosaic: structure automobile en composites et Aluminium, Techniques de l'Ingénieur, AM5605, 1998.
- [18] Bathias C., Matériaux composites, l'Usine Nouvelle, Dunod, Paris, 2005.
- [19] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI « Comportement à l'impact des matériaux composites » Master 2 MQM 2006-2007.