

Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**ETUDE NUMERIQUE DE LA DEFORMATION DES
PLAQUES EN ACIER SOUS IMPACTES A GRANDES
VITESSES**

Présenté par :

❖ *SI ALI Mohammed Ayman*

❖ *BELOUDDANE Zohra*

Soutenu le 13 /07 / 2022 devant le jury composé de :

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

Année Universitaire : 2021 / 202

Remerciements

Au terme de ce travail, j'adresse mes remerciements les plus sincères à mon encadreur **Mr: ben issa Mohamed**, pour m'avoir permis de bénéficier de son grand savoir dans la matière, pour sa disponibilité, sa pédagogie, ses compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet même pendant les moments les plus difficiles

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.

Que la paix d'Allah soit toujours avec vous !

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à :

À la mémoire de mon Père :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

À ma chère mère :

En hommage à tous les sacrifices que tu as consenti pour moi durant mes longues années d'études. Je te remercie d'avoir fait de moi ce que je suis maintenant et de m'avoir appris de vivre dans l'honneur et dans la dignité.

Chère épouse

J'aimerais bien que tu trouves dans ce travail l'expression de mes sentiments de reconnaissance les plus sincères car grâce à ton aide et ton soutien, tes encouragements pendant toute cette période de thèse et ta présence à mes côtés dans les moments de joie et de peine.

À la mémoire de mon beau père.

À ma belle-mère.

À tous les membres de ma famille.

Résumé

Les matériaux métalliques occupent actuellement une place considérable dans tous les secteurs industriels, leur comportement aux impacts à grandes vitesses soulève certaines inquiétudes tend à limiter leur champ d'application. Pour limiter le cout 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 préparée. Sur la base d'une modélisation numérique, le code de calcul Abaqus, a été utilisé durant cette étude. Pour simuler le comportement à l'impact ce travail traite au premier lieu l'influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur la répartition et l'intensité des contraintes et déformations sur des plaques en acier AISI 1045 et AISI 4340 qui nous permet à étudier les trois modes de ruptures causé par trois différentes formes d'impacteur.

Un deuxième paramètre étudié, c'est la masse de projectile, son influence sur les contraintes et déformations engendrées sur les plaques en acier AISI 4340, dans ce cas un projectile cylindrique à bout sphérique avec différentes masses a été utilisé.

A la fin de ce travail, l'angle d'orientation de l'impacteur a été étudié, un projectile cylindrique à bout plat est orienté à chaque fois d'un angle θ pour pouvoir analyser l'influence de la surface de contact, ainsi que les angles aigues du bout impactant, sur la création des zones dangereuses qui conduits à l'endommagement de la plaque.

Summary

Metallic materials currently occupy a considerable place in all industrial sectors, their behavior to impacts at high speeds raises certain concerns tends to limit their field of application. To limit the cost of mechanical tests, numerical simulation using the finite element method is used. It is in this dispute that this thesis is prepared. Based on numerical modeling, the Abaqus computer code was used during this study. To simulate the behavior on impact, this work first deals with the influence of the impact speed and the shape of the projectile on the distribution and intensity of the stresses and deformations on AISI 1045 and AISI 4340 steel plates which allows us to study the three failure modes caused by three different forms of impactor

A second parameter studied is the mass of the projectile, its influence on the stresses and deformations generated on the AISI 4340 steel plates, in this case, a cylindrical projectile with a spherical end with different masses was used.

At the end of this work, the angle of orientation of the impactor has been studied, a cylindrical projectile with a flat end is oriented each time by an angle θ to be able to analyze the influence of the contact surface, as well as as the sharp angles of the impacting end, on the creation of dangerous zones which lead to the damage of the plate.

ملخص

تحتل المواد المعدنية حاليًا مكانًا كبيرًا في جميع القطاعات الصناعية، ويثير سلوكها تجاه التأثيرات بسرعات عالية بعض المخاوف التي تميل إلى الحد من مجال تطبيقها. للحد من تكلفة الاختبارات الميكانيكية، يتم استخدام المحاكاة العددية باستخدام طريقة العناصر المحدودة. في هذا الخلاص تم إعداد هذه الأطروحة. على أساس النمذجة العددية، تم استخدام كود الكمبيوتر **Abaques** خلال هذه الدراسة. لمحاكاة السلوك عند التأثير، يتعامل هذا العمل أولاً مع تأثير سرعة التأثير وشكل المقنوف على توزيع وشدة الضغوط والتشوهات على ألواح الصلب **AISI 1045** و **AISI 4340** مما يسمح لنا بدراسة الفشل الثلاثة الأنماط التي تسببها ثلاثة أشكال مختلفة من المصادم.

المعلمة الثانية التي تمت دراستها هي كتلة القذيفة، وتأثيرها على الضغوط والتشوهات الناتجة عن ألواح الصلب **AISI 4340** ، وفي هذه الحالة تم استخدام مقنوف أسطواني بنهاية كروية مع كتل مختلفة.

في نهاية هذا العمل، تمت دراسة زاوية اتجاه المصادم، ويتم توجيه قذيفة أسطوانية بنهاية مسطحة في كل مرة بزاوية θ لتتمكن من تحليل تأثير سطح التلامس، وكذلك الزوايا الحادة للنهاية المؤثرة على تكوين مناطق خطرة تؤدي إلى إتلاف الصفيحة.

Sommaire

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Introduction générale	1

Chapitre I :

Généralité sur les aciers

I.1. Introduction	2
I.2. Définition d'un acier	2
I.3. Les différentes classes d'aciers	2
I.3.1. Aciers d'usage général	3
I.3.2. Aciers non alliés	4
I.3.3. Aciers Alliés.....	4
I.3.3.1 Aciers faiblement alliés	4
I.3.3.2 Aciers fortement alliés :	5
I.4. les aciers AISI Steele :	5
I.4.1. Acier AISI 1045 STELE :	5
I.4.2. Composition chimique de l'acier :	5
I.4.3. Propriétés mécanique et physique :	5
I.4.4. Domain d'utilisation :	6
I.5. Acier AISI 4340 Steele	6
I.5.1. Composition chimique	6
I.5.2. Propriété mécanique et physique	6
I.5.3. Domaine d'utilisation	7
I.6. AISI 1020 Steele	7
I.6.1. Composition chimique	7
I.6.2. Caractéristique mécanique et physique.....	8
I.6.3. Domaine d'utilisation	8
I.7. AISI 52100 Steele :	8
I.7.1. Composition chimique de l'acier à roulement 52100 et équivalents	8
I.7.2. Propriétés mécaniques et physique	9
I.7.3. Domain d'utilisation	9
I.8. AISI 304 Steele (Acier Inoxydable AISI 304)	9
I.8.1. Composition chimique	10
I.8.2. Propriété mécanique et physique	10
I.8.3. Domaine d'utilisation	10

Chapitre II :
Comportement à l'impact des
matériaux métalliques

II.1. Introduction	11
II.2. Généralités	12
II.2.1. Définition d'un impact	12
II.2.2. Energie cinétique	12
II.3. Applications	12
II.3.1. Automobiles.....	12
II.3.2. Aéronautiques	13
II.3.3. Militaires	14
II.4. Catégories d'impact :	15
II.5. Comportement à l'impact des matériaux métalliques	16
II.6. Études expérimentales et numériques d'impact sur matériaux métalliques	17
II.6.1. Caractéristiques du projectile utilisé	17
II.6.2. Effet de la forme du projectile sur les performances à l'impact.....	18
II.7. L'épaisseur des plaques utilisée	18
II.8. Modèles numériques pour les matériaux métalliques	18
II.9. Loi de l'écoulement (Modèle de Johnson Cook)	19
II.10. Méthode d'identification numérique de la loi de rupture des matériaux :	20

Chapitre III : Etude du
comportement à l'impact des
plaques en Acier

III.1. Introduction	21
III.2. Définition du modèle	21
III.3. Analyse des résultats	24
III.3.1. Effet de la vitesse d'impact et la formes de projectile	24
III.3.1.1. Influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur les contraintes	25
III.3.1.2. Influence de la vitesse d'impact et la forme de projectile sur les déformations ..	27
III.3.2. Effet de la masse de projectile sur les contraintes et les déformations	29
III.3.3. Effet de l'angle d'orientation sur les contraintes et déformations	30
Conclusion	
Bibliographie.....	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Minerai de fer	2
Figure I.2 : les goujons fabriqués en acier AISI 1045	6
Figure I.3 : vilebrequin fabriquée en AISI 4340	7
Figure I.4 : la microstructure d'un acier 52100 AISI	9
Figure I.5 : coud en acier AISI 304 inox	10

Chapitre II

Figure II.1 : Exemples d'impact de projectiles sur des structures dans le domaine des transports. A-Automobile criblé de balles réelles B-Impact d'oiseau sur un Boeing.....	11
FigureII.2 : Différentes géométries de projectile à queue cylindrique. a- Projectile plat ; b- Projectile conique ; c- Projectile hémisphérique ; d- Projectile ogive.	17
FiguerII.3 : éprouvette utilisée dans l'expérience	20

Chapitre III

Figure III.1 : Représentation schématique de plaques utilisées	22
Figure III.2 : Représentation schématique des projectiles utilisés.	22
Figure III.3 : Conditions aux limites des plaques	23
Figure III.4 : Maillage de la plaque	23
Figure III.5 : Modélisation des projectiles utilisés	23
Figure III.6 : Répartition des contraintes pour le cas de l'acier AISI 1045 à une vitesse de 200 m/s ..	25
Figure III.7 : Répartition des contraintes pour le cas de l'acier AISI 4340 à une vitesse de 200 m/s ..	26
Figure III.8 : Répartition des contraintes pour le cas de l'acier AISI 1045 à une vitesse de 300 m/s ..	27

Figure III.9 : L'influence du type de projectile sur les déformations.	28
Figure III.10 : L'évolution des déformations en fonction de la masse de projectile.	29
Figure III.11 : Taille de la déchirure en fonction de la masse de projectile.	30
Figure III.12 : Représentation de l'angle d'orientation de projectile.....	30
Figure III.13 : L'influence de de l'angle d'orientation du projectile sur la répartition des contraintes et les déformations.	31
Figure III.14 : L'influence de de l'angle d'orientation du projectile sur les déformations.	32

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.2 : Désignation à partir de l'emploi et des caractéristiques mécaniques et physiques	3
Tableau I.3 : Exemples des aciers selon les propriétés mécaniques. Re : Limite élastique en [MPa]	4

Chapitre II

Tableau II.1 : Catégories d'impact	16
Tableau II.2 : Lois de comportement de base	19

Chapitre III

Tableau III.1 : propriétés des aciers utilisés	24
Tableau III.2 : paramétré de Johnson-Cook des trois aciers	24
Tableau III.3 : paramétré d'endommagement Johnson-Cook des trois aciers [Damage-paramètres]	24

Nomenclature

σ_R : Contrainte de rupture.

σ_E : la limite élastique.

E : module de Young.

μ : Coefficient de poisson.

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

T^* : la température.

ϵ_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 tr- axialité.

$D4$: facteur de vitesse de déformation.

$D5$: Facteur de température.

Introduction générale

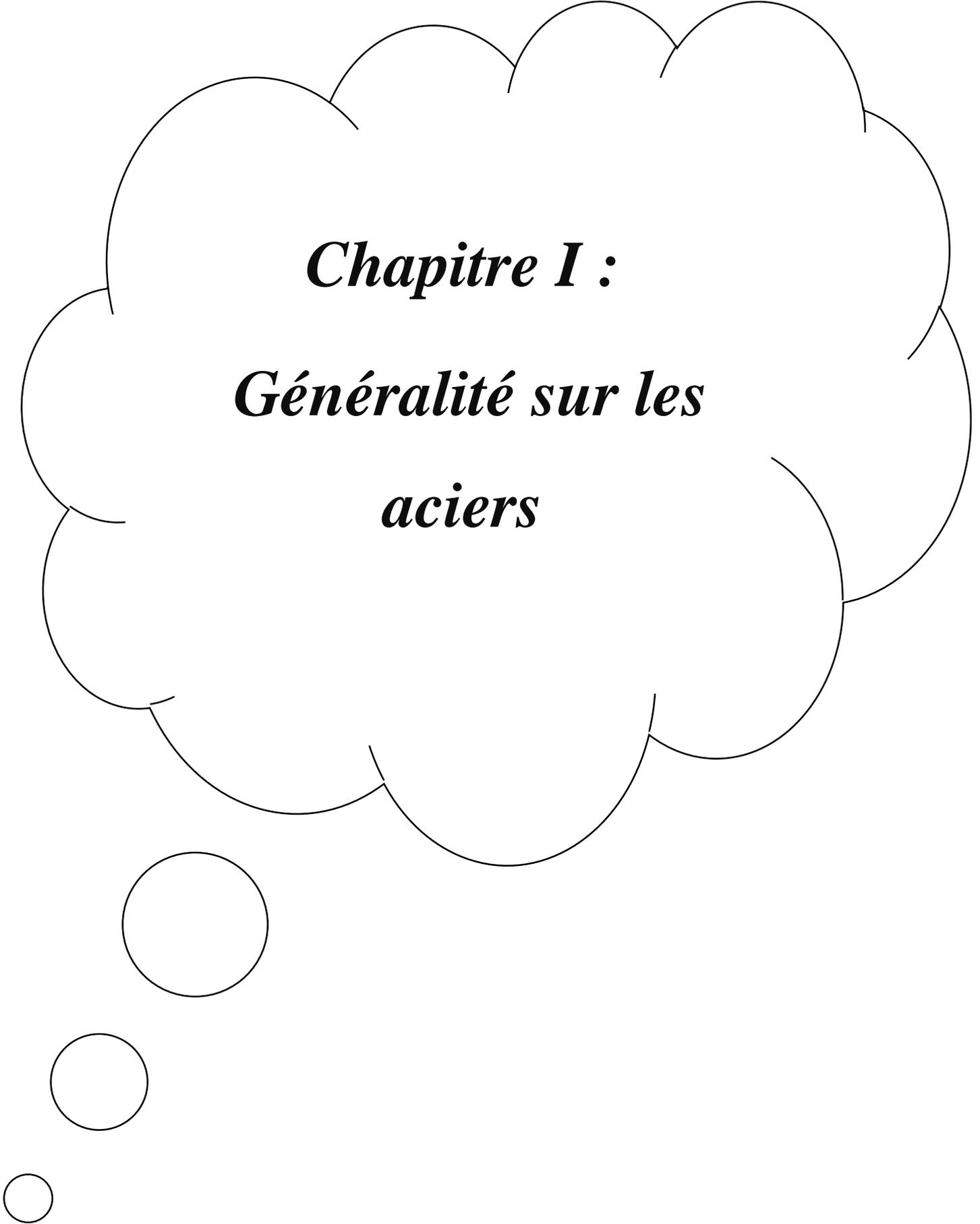
Introduction générale

De nombreux problèmes posés au cours du dimensionnement de certaines structures civiles, militaires ou spatiales sont liés au comportement des matériaux dans le domaine des grandes déformations aux grandes vitesses de déformation. Lors du fonctionnement nominal ou accidentel de ces objets, les matériaux constitutifs se trouvent souvent sollicités par des chocs initiaux d'intensité élevée [1]. Le chargement mécanique complexe qui en résulte soumet le matériau à une succession de sollicitations extrêmes en termes de pressions, de grandes déformations et de hautes températures. Le domaine des essais dynamiques couvre un très large éventail de situations et intéressent les ingénieurs de différentes disciplines. Par exemple, les ingénieurs de production cherchent à comprendre les problèmes qui subviennent lors de l'usinage et la mise en forme de matériaux à grande vitesse de déformation, les problèmes d'impact sur structure/carrosserie dans le domaine des transports, les situations d'impact de micrométéorites sur structures spatiales ou satellites..., dans le but d'améliorer la performance et la sécurité de leurs produits. Les scientifiques qui travaillent sur les thématiques militaires ont également besoin de comprendre le comportement des matériaux pour des situations similaires afin de concevoir des structures qui sont plus efficaces pour résister à l'impact d'un projectile ou afin de concevoir des missiles balistiques performants [2].

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

Notre travail se décomposera en deux grandes parties, une partie bibliographique et une deuxième analytique (numérique).

- ✓ La première partie constituée de deux chapitres théoriques, le premier présentera les aciers et leur différentes classes, les aciers AISI Steele ou les aciers spéciaux. Dans le deuxième, on a parlé de l'impact, les catégories d'impact, les modèles numériques pour les matériaux métalliques et leur comportement à l'impact ainsi que les lois de l'écoulement et de rupture des matériaux.
- ✓ Dans la partie calculs, une modélisation numérique du comportement des plaques en acier Steele (1045, et 4340) traite l'effet de la forme, la masse et l'orientation du projectile sur la répartition et l'intensité des contraintes et des déformations.



Chapitre I :
Généralité sur les
aciers

I.1. Introduction

Le fer, la fonte et l'acier sont souvent confondus, il est donc important de d'abord les définir. Le fer est un élément chimique entrant dans la composition des deux autres. La fonte et l'acier sont fabriqués essentiellement à partir du minerai de fer mais contiennent également d'autres composants et sont différenciés par leur teneur en carbone : la fonte en contient de 2,1 à 6,67 % et l'acier de 0,03 % à 2,14 %. [3]



Figure I.1 : Minerai de fer

I.2. Définition d'un acier

Selon la norme **NF EN 10020** « 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 ». [4]

I.3. Les différentes classes d'aciers

Une classification en aciers non alliés, aciers alliés et aciers inoxydables d'après leur composition chimique.

Une classification des aciers non alliés et des aciers alliés en aciers de qualité ou aciers spéciaux, et des aciers inoxydables en fonction des principales classes de qualité définies selon les principales caractéristiques de propriétés ou d'application.

I.3.1. Aciers d'usage général [5]

Les aciers d'usage général sont utilisés par la plupart des industries. Ils se caractérisent par leur état structural qui est d'être prêts à l'emploi sans traitement thermique chez l'utilisateur.

Aussi, leur choix se fait uniquement par leur forme et leurs propriétés et non par leur composition chimique

Existe : des tôles fortes aux tôles minces, aux fils, aux barres, aux rails, aux produits pour béton etc...

Exemple :

- **A60**

A : Acier d'usage général de classe **A**

60 : Contrainte de rupture

$$\sigma_R = 60 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

- **E 38**

E : Acier d'usage général de classe **E**

38 : Contrainte de limite élastique

$$\sigma_E = 38 \text{ [daN/mm}^2\text{]}$$

E : acier de construction mécanique
S : acier de construction y compris les aciers à grains fins
H : acier a haute résistance laminé à froid pour emboutissage à froid
P : acier pour appareil a pression
D : acier pour formage à froid

Tableau I.2 : Désignation à partir de l'emploi et des caractéristiques mécaniques et physiques

Nuance		R min	Re max
S185	(A33)	290	185
S235	(E24)	340	235
S275	(E28)	410	275
S355	(E36)	490	355
E295	(A50)	470	295

Tableau I.3 : Exemples des aciers selon les propriétés mécaniques.

Re : Limite élastique en [MPa]

I.3.2. Aciers non alliés

Acier dont les teneurs en éléments d'alliage, à l'exception du carbone, sont inférieures à 1.65% pour le manganèse, à 0.50% pour le silicium, et à des valeurs plus faibles, toutes inférieures à 0.40% pour les autres éléments (norme NF. EN 10.020). [6]

Exemple :

- **XC30**

C : Acier au carbone non allié.

X : acier fin.

30 : (% x 100 teneur en carbone)
0,30% de carbone.

I.3.3. Aciers Alliés

I.3.3.1 Aciers faiblement alliés

Ils contiennent les éléments d'addition dont la teneur inférieure est déterminé individuellement pour chaque élément par une norme technique. Les teneurs supérieures sont toujours inférieures à 5% (d'après AFNOR). Il s'agit des aciers de construction au manganèse, au manganèse chrome molybdène, au chrome manganèse, au chrome vanadium, etc... Ils sont élaborés pour l'obtention des caractéristiques mécaniques ou technologiques spéciales. Leur appellation est dérivée de la teneur de l'élément d'addition préférentiel.

Exemple :

- **35 N C D 16 12 10 35**

- ✓ 0,35 % de carbone
- ✓ 16 : 4% de Nickel (N)
- ✓ 12 : 3% de Chrome (C)
- ✓ 10 : 1% de Molybdène (D).

I.3.3.2 Aciers fortement alliés :

Ils contiennent au moins un élément d'addition qui atteint la teneur **de 5% (d'après AFNOR)**. Il s'agit d'une part des aciers de construction, d'autre part des aciers à outils. Ils sont élaborés pour l'obtention des caractéristiques mécaniques ou technologiques spéciales.

Exemple :

- **X 28 C N 18 – 4**

- ✓ X : Symbole acier fortement allié
- ✓ 28 : 0,28 % de carbone
- ✓ 18 : 18 % de chrome (C)
- ✓ 4 : 4 % de Nickel (N). [7]

I.4. les aciers AISI Steele :

I.4.1. Acier AISI 1045 STELE :

L'acier 1045 est défini comme un acier au carbone moyen qui a du carbone 0.43%-0.5%. Il offre une bonne soudabilité, une bonne usinabilité, des propriétés de résistance et d'impact élevées, mais une faible trempabilité en raison du manque d'éléments d'alliage appropriés.

L'acier 1045 est généralement fourni à l'état noir forgé à chaud ou normalisé, et a une résistance à la traction de 570 à 700 MPA avec une dureté de surface de 170 à 210 HB.

I.4.2. Composition chimique de l'acier :

Classe	C	Si	Mn	S	Phosphore
1045	0.43-0.50	0.15-0.35	0.60-0.90	≤ 0,050	≤ 0,040

I.4.3. Propriétés mécanique et physique :

- Module de Young : 200-206 GPA
- Coefficient de poisson : 0.29-0.30
- La masse volumique [g/cm³] : **7.87**
- Point de fusion ° C : **1495**

I.4.4. Domain d'utilisation :

L'acier AISI 1045 bar ou plaque est Adapté pour la fabrication de pièces telles que les engrenages, boulons, les essieux à usage général et les arbres, et les goujons. [8]



Figure I.2 : les goujons fabriqués en acier AISI 1045

I.5. Acier AISI 4340 Steele

L'acier AISI 4340 est défini comme un acier traité thermiquement et faiblement allié qui a 0.38-0.43 % de carbone, il a une résistance et une ténacité plus élevées, ainsi qu'une très bonne résistance à la fatigue, résistance à l'usure et résistance à la corrosion atmosphérique.

I.5.1. Composition chimique

Classe	C	si	Mn	S	Phosphore	Cr	Ni	Mo
4340	0.38-0.43	0.15-0.35	0.60-0.80	≤ 0,035	≤ 0,04	0.7-0.9	1.65-2.0	0.2-0.3

I.5.2. Propriété mécanique et physique

- Module d'élasticité : **210 GPA**
- Coefficient de Poisson : **0.27-0.30**
- La masse volumique [g/cm³] : **7.85**
- Point de fusion ° C : **1427**
- Capacité thermique spécifique [J/(kg.K)] **460**
- Coefficient de dilatation thermique [μm/m°] C : **12.5**

I.5.3. Domaine d'utilisation

L'acier 4340 peut être utilisé pour les exigences de bonne ténacité, de haute résistance, ainsi que de grande taille de pièces trempées importantes, telles que l'arbre de charge élevée de machinerie lourde, l'arbre de turbine de diamètre supérieur à 250 mm, l'arbre de rotor d'hélicoptère, l'arbre de turbine de turboréacteur, pièces de transmission à charge élevée, fixations de vilebrequin. Engrenages, etc.

✚ Peut également être utilisé pour une température de fonctionnement de plus de 400 °C. [9]

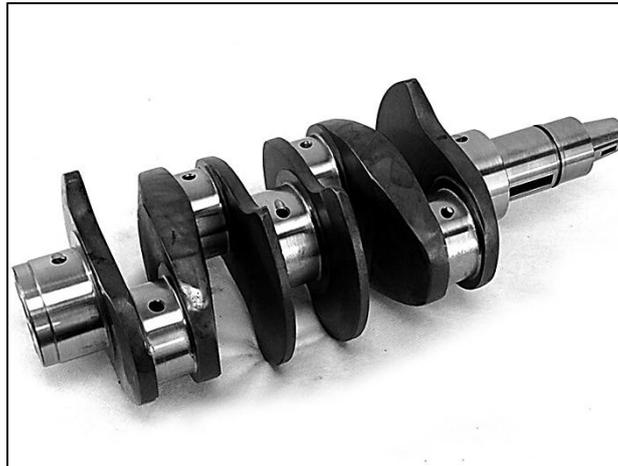


Figure I.3 : vilebrequin fabriquée en AISI 4340

I.6. AISI 1020 Steele

C'est un acier au carbone à faible trempabilité et à faible résistance à la traction qui a une valeur nominale de 0,22%C et 0,55%Mn. Il a une excellente soudabilité, une bonne usinabilité et une ductilité élevée avec une dureté Brinell de 119 à 235 et une résistance à la traction de 410 à 790 MPA. [10]

I.6.1. Composition chimique

Classe	C	si	Mn	S	Phosphore
1020	0.17-0.23	≤ 0,4	0.30-0.60	≤ 0,04	≤ 0,05

I.6.2. Caractéristique mécanique et physique

- Module d'élasticité : **210 GPA**
- La masse volumique [g / cm ³] : **7,70**
- Conductivité thermique [W / m K] : **51,9**
- Capacité thermique spécifique [J / g K] : **0,46**

I.6.3. Domaine d'utilisation

L'acier AISI 1020 peut être largement utilisé dans tous les secteurs industriels afin d'améliorer les propriétés de soudabilité ou d'usinabilité. Il est utilisé dans une variété d'applications en raison de sa propriété de finition étirée à froid ou tournée et polie.

L'acier AISI 1020 est également utilisé à l'état cémenté, et il est utilisé dans les composants suivants :

1. Essieux
2. Pièces et composants d'ingénierie générale
3. Pièces de machines
4. Arbres
5. Arbres à cames
6. Épingles de guidon
7. Cliquets
8. Engrenages légers
9. Engrenages à vis sans fin
10. Broches
11. Boulons à tête froide
12. Composants automobiles

I.7. AISI 52100 Steele :

L'acier à roulement 52100 est un type d'acier spécial doté de caractéristiques de résistance à l'usure élevée et de résistance à la fatigue de roulement. L'acier à haute teneur en carbone, l'acier de synthèse et certains types d'acier inoxydable et d'acier résistant à la chaleur sont utilisés comme matériaux de palier et à d'autres fins.

C'est un acier faiblement allié à haute teneur en carbone et chrome, qui est durci et qui est particulièrement indiqué pour son utilisation comme roulements.

I.7.1. Composition chimique :

Classe	C	Si	Mn	S	Phosphore	Cr	Ni	Mo	Cu
52100	0,93- 1,05	0.15- 0.35	0,25- 0,45	0,025	0,015	1,35- 1,60	0.25	0.10	0.30

I.7.2. Propriétés mécaniques et physique

- Module d'élasticité **190-210 GPA**
- Densité : **7,81 [g / cm³]**
- Coefficient de Poisson **0,27-0,30**
- Point de fusion : **1424 [° C]**

I.7.3. Domain d'utilisation

Principalement utilisé pour la fabrication de roulements d'avion et d'autres pièces fortement sollicitées. Cet acier de nuance 52100 est de préférence refondu à l'arc sous vide pour donner une performance optimale.

Applications typiques : Fabrication de roulements, joints CV, vis à billes, jauges, couteau, etc.

[11]

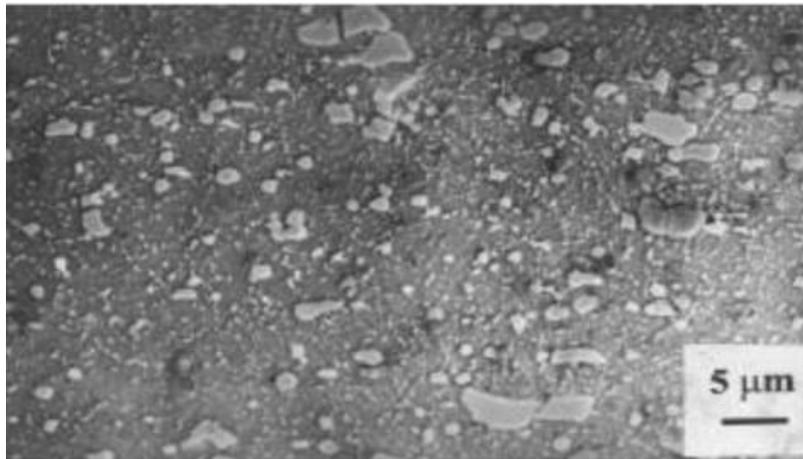


Figure I.4 : la microstructure d'un acier 52100 AISI

I.8. AISI 304 Steele (Acier Inoxydable AISI 304)

L'acier inox 304 est l'acier inoxydable le plus largement utilisé, contenant 18-20 % de Cr et 8-10.5 % de Ni, également connu sous le nom d'acier inoxydable 18-8. L'acier inoxydable 304 est non magnétique dans des conditions de recuit, mais après un travail à froid (comme l'emboutissage, l'étirage, le pliage, le laminage). La matière AISI 304 a une bonne résistance à la corrosion atmosphérique et à l'oxydation. La teneur élevée en alliage nickel-chrome lui confère une excellente résistance à la corrosion et est largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme acier inoxydable de qualité alimentaire standard [12].

I.8.1. Composition chimique

Classe	C	Si	Mn	S	Phosphore	Cr	Ni
304	0.07	1	2	0,030	0.045	18-20	8-10.5

I.8.2. Propriété mécanique et physique

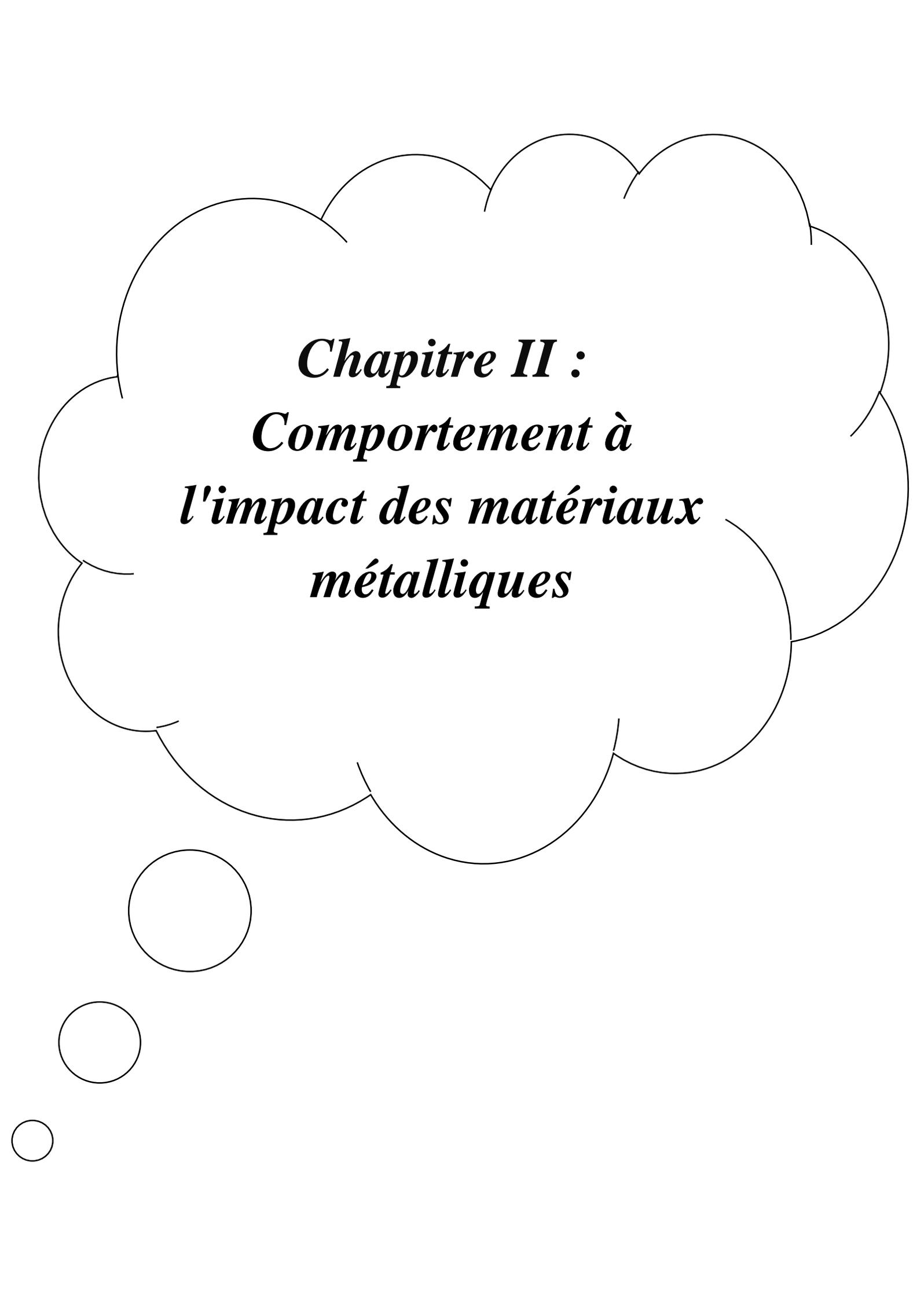
- Module d'élasticité : **193 GPA**
- Point de fusion : **1454°C**
- Coefficient de Poisson : **0.3**
- Capacité thermique spécifique : **500 J/kg K à 20 °C**

I.8.3. Domaine d'utilisation

1. Des silos,
2. Des réservoirs,
3. Des conteneurs et de cuves,
4. Des chambres de refroidissement,
5. Des chambres de cuisson,
6. Des chambres de lavage, nettoyage et désinfection.



Figure I.5 : coud en acier AISI 304 inox



Chapitre II :
Comportement à
l'impact des matériaux
métalliques

II.1. Introduction

Tous les matériaux possèdent une limite d'élasticité, qui correspond à un chargement critique à partir duquel le comportement du matériau n'est plus réversible. Il peut y avoir rupture brutale (cas du verre), rupture progressive (cas du béton), mais dans la plupart des cas il y a plastification du matériau. Ceci signifie que sa forme est changée de façon irréversible, contrairement au domaine d'élasticité où le solide reprend sa forme initiale lorsque l'on relâche les efforts.

L'instabilité de la déformation plastique de nombreux matériaux, métaux ou polymères, est couramment observée lors de processus où la vitesse de déformation est importante, C'est notamment le cas de l'usinage à grande vitesse, du formage par explosion ou du magnétoformage, et des déformations provoquées par l'impact d'un véhicule ou d'un projectile. [13]

Dans ce chapitre nous discutons de la formulation de lois de comportement adaptées aux grandes déformations plastiques et aux grandes vitesses de déformation.



Figure II.1 : Exemples d'impact de projectiles sur des structures dans le domaine des transports. A-Automobile criblée de balles réelles B-Impact d'oiseau sur un Boeing

II.2. Généralités

II.2.1. Définition d'un impact

En mécanique, le choc correspond à l'application d'une force importante durant un temps court, généralement accompagné d'un brusque changement de vitesse. Un impact peut être défini comme le cas particulier d'un choc d'un projectile sur une surface.

Les impacts à fortes énergies entraînent souvent la perforation et semblent donc causer les dégâts les plus graves. Cependant, il ne faut pas négliger les impacts à faible énergie car ceux-ci provoquent des microfissures et le délaminage dans le cas des matériaux composites. [14].

II.2.2. 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 : [14].

- les impacts à faible vitesse (de l'ordre de 1 m.s⁻¹),
- les impacts à forte vitesse (de l'ordre de 100 m.s⁻¹).

II.3. Applications

II.3.1. 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. [15].

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. [16].

II.3.2. 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 chocs 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. [17]

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^{-1} [16]. 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. [14]

II.3.3. 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^{-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. [15]

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. Le composite se compose de fibres de Kevlar 29 et d'une matrice de PF (phénol formaldéhyde) et de PVB (polyvinyl butyral). Depuis, quelques changements ont été apportés pour améliorer l'ensemble.

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 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. [18]

Toutes ces catégories sont résumées par ordre de vitesse dans le tableau :

Catégorie	Vitesse [m/s]	Masse [g]	Energie d'impact [J]	Domaine d'application
Basse vitesse	<10	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'impact

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

L'impact des structures et les systèmes de protection associés constituent un sujet de recherche important depuis des années. Des efforts considérables ont été entrepris afin de comprendre physiquement et de décrire mathématiquement les phénomènes qui se produisent lors de la perforation par impact à grande vitesse, mais la complexité de ces phénomènes limite considérablement l'utilisation des équations analytiques simples. La perforation de plaques par impact de projectile est un processus complexe faisant souvent apparaître plusieurs phénomènes comme les déformations élastique et plastique, les effets de la vitesse de déformation, de l'adoucissement thermique, la formation de fissures, du cisaillement adiabatique, la formation de bouchons et de pétales, et même la projection possible d'étincelles. Les paramètres les plus importants qui affectent la capacité d'une plaque cible semblent être le projectile (géométrie, densité et dureté), les propriétés intrinsèques de la plaque à perforer (dureté/résistance, ductilité, microstructure et épaisseur) ainsi que les conditions d'impact comme la vitesse d'impact, l'angle d'impact et l'état du contact projectile/plaque [19].

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 utilisé

La géométrie du projectile et plus particulièrement la forme du bout impactant à une influence significative sur le mode de rupture de la plaque à perforer. En 1978, Wilkins a présenté quelques types de rupture de la cible (plaques minces) qui dépendent de la forme du nez du projectile. La majorité des projectiles étudiés dans la littérature ont une forme cylindrique et se différencient par la géométrie du bout impactant dont les plus connus sont les bouts hémisphériques, coniques, plats, ogives et quelques fois une combinaison de deux de ces formes, on désignera parfois les projectiles par le nom du bout impactant. Tous ces projectiles disposent d'un axe longitudinal de symétrie qui facilite leur utilisation dans les expériences.

Le diamètre de la partie cylindrique de ces projectiles peut varier : il est fixé en fonction des moyens techniques dont disposent les différents laboratoires qui travaillent sur la thématique d'impact **à grande vitesse** et de l'épaisseur de la plaque à perforer. Les matériaux les plus utilisés pour usiner ces impactant sont très souvent des métaux, incluant de nombreuses bases fer allant de l'acier doux et dure à la forme la plus complexe de l'acier allié, avec une dureté jusqu'à 64 HRC.

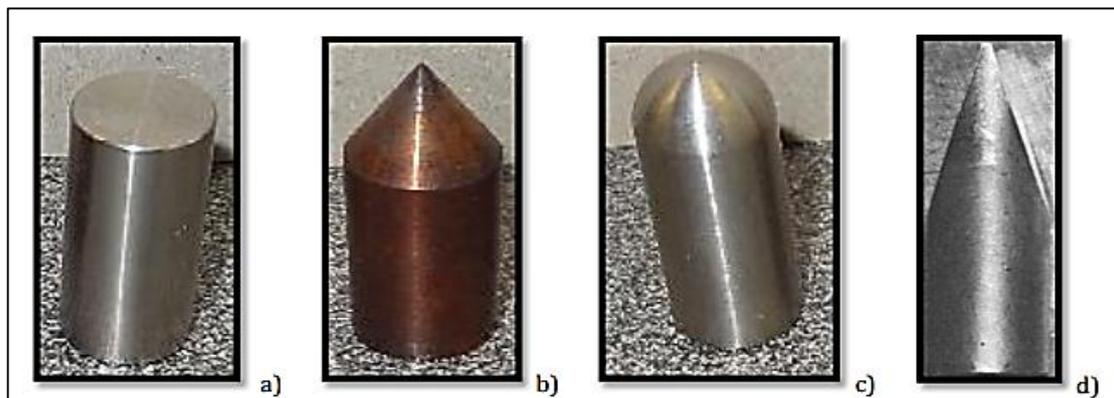


Figure II.2 : Différentes géométries de projectile à queue cylindrique. a- Projectile plat ; b- Projectile conique ; c- Projectile hémisphérique ; d- Projectile ogive.

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

Comparaison des tendances rapportées dans la littérature concernant la forme des projectiles similaire lors de l'étude de l'effet sur la tôle. Cependant, certaines divergences observées : d'un côté, le projectile aplati a entraîné la formation d'un ruban la force de cisaillement sous le projectile initie en fait la fracture. Enfin ce sont considéré comme le plus critique.

D'un autre côté, les projectiles coniques arrondis peuvent être considérés légèrement moins critiques, étant donné qu'ils engendrent la formation d'une zone d'étirement puis une ouverture sous forme de pétales. Finalement, 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. [20]

II.7. L'épaisseur des plaques utilisée

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.8. Modèles numériques pour les matériaux métalliques

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 s^{-1} . [21]

Auteur	Modèle	Matériaux - Vitesse
Ludwik 1909	$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^{p(1/M)}$	-
Norton 1929	$\sigma = K(\varepsilon^p)^{\frac{1}{M}}(\dot{\varepsilon}^p)^{1/N}$	Acier, superalliage, $10^{-2} s^{-1}$
Ramberg Osgood 1943	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K\left(\frac{\sigma}{E}\right)^n$	AA 1xxx, Acier
Hollomon 1945	$\sigma = K\varepsilon^n$	Acier, $<1000 s^{-1}$
Voce 1948	$\sigma = \sigma_0(1 - Ae^{B\varepsilon})$	Acier, $<1000 s^{-1}$

Tableau II.2 : Lois de comportement de base

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.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 :

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

Où σ est la contrainte équivalente et ε 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 :

[22]

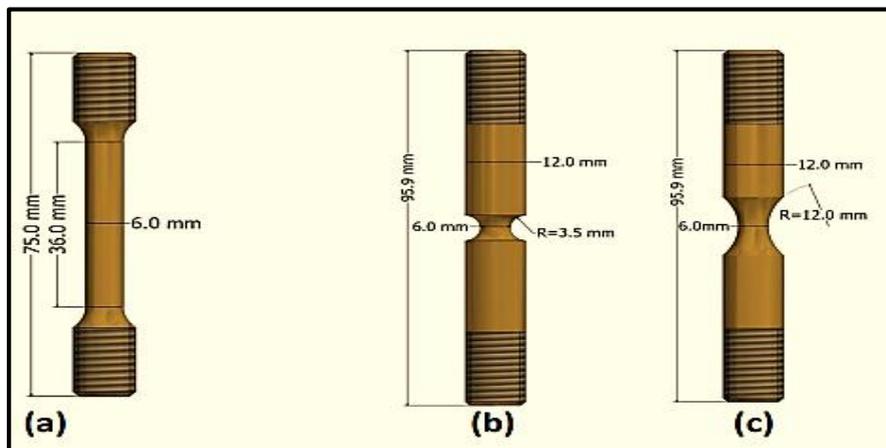
$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_{ref}}, \quad T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad \dots\dots\dots (II.3)$$

II.10. Méthode d'identification numérique de la loi de rupture des matériaux :

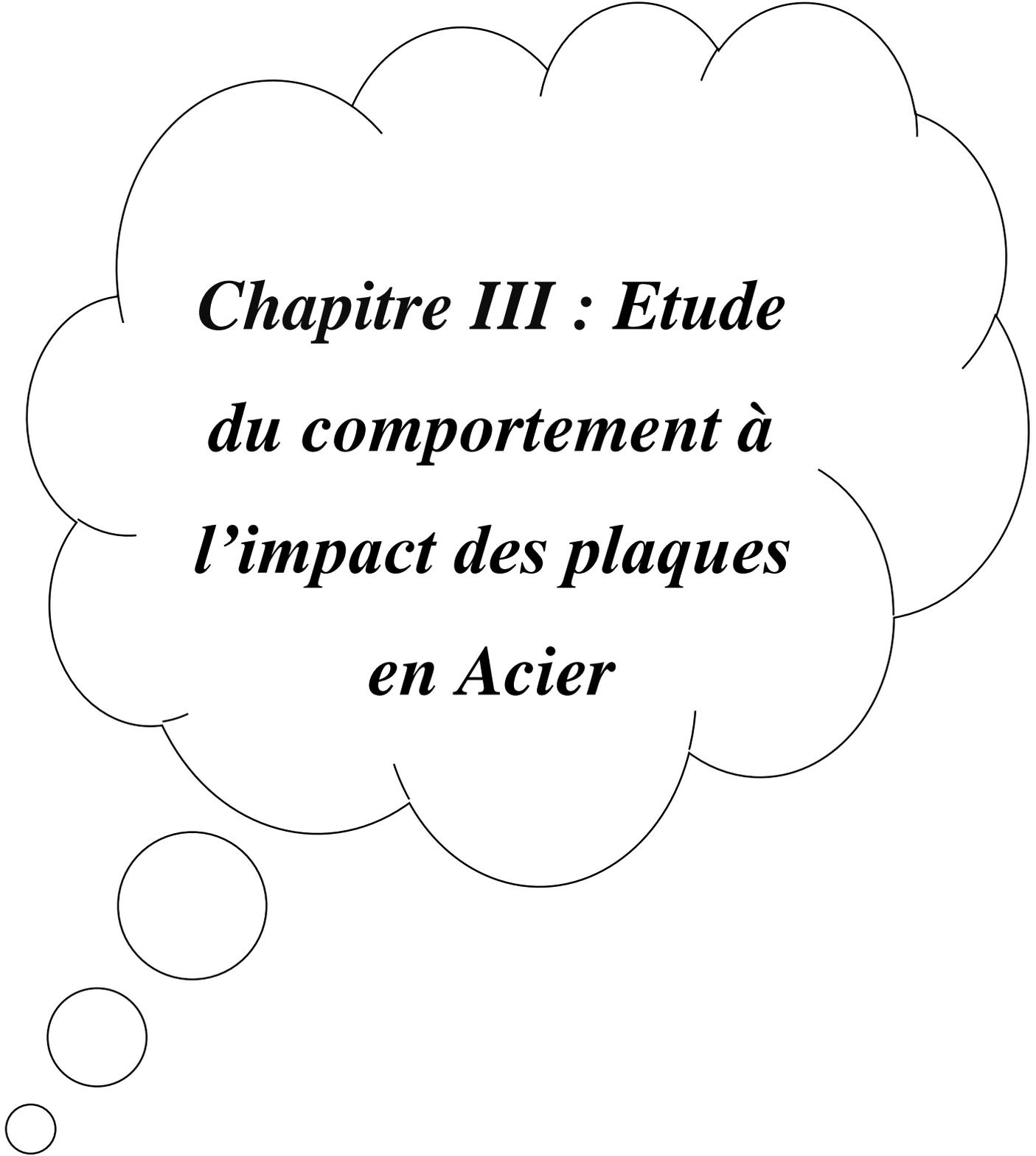
Pour mieux représenter les phénomènes de rupture, et l'évolution de l'endommagement dans les matériaux. La triaxialité nous permet d'identifier les tubes de chargement soumis à l'éprouvette au cours du test de traction ou flexion. Dans ce travail, nous avons reproduit numériquement les mêmes conditions d'essai de traction, dans l'objectif est de tracer la courbe de triaxialité et identifier les paramètres de rupture $\sum D_i$ en se basant de la loi de rupture de Johnson Cook.

Johnson et Cook ont proposé que la déformation à la rupture dépende généralement du rapport de triaxialité des contraintes, de la vitesse de déformation et de la température. Le modèle de fracture JC peut s'écrire comme suit :

$$\epsilon_f = \left[D_1 + D_2 \exp \left(D_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \right) \right] [1 + D_4 \ln(\dot{\epsilon}_p^*)] [1 + D_5 T^*] \quad \dots\dots\dots (II.4)$$



FiguerII.3 : éprouvette utilisée dans l'expérience



***Chapitre III : Etude
du comportement à
l'impact des plaques
en Acier***

III.1. Introduction

La simulation est en effet un outil d'investigation particulièrement utile et complémentaire à l'expérimentation : au-delà de la connaissance du comportement global, elle permet d'accéder à des informations à l'intérieur du matériau. Elle revêt également un aspect prédictif appréciable, car elle permet, de manière simple, l'étude de l'évolution des résultats en fonction des paramètres d'entrées d'une modélisation. 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) [23]. Dans notre cas, les simulations sont réalisées avec le code de calcul numérique explicite ABAQUS.

III.2. Définition du modèle

Il s'agit donc de comprendre et de maîtriser les phénomènes de réponse des matériaux à des sollicitations mécaniques instantanées. Ceci notamment pour une meilleure maîtrise des mécanismes d'endommagement, de la rupture et de l'absorption d'énergie pour la protection des personnes et des structures contre des catastrophes dans le domaine des transports aériens, maritimes ou terrestres. [24] Autrement dit maîtriser les mécanismes de l'absorption d'énergie et ceux de rupture pour des chargements de type impact et perforation. Ce n'est pas toujours facile, car cela nécessite le développement de moyens expérimentaux et numériques adaptés. De nombreuses études expérimentales, analytiques et numériques sont aujourd'hui disponibles dans la littérature internationale. Des travaux sur la pénétration et la perforation des structures par des projectiles ont été menés par des chercheurs comme Goldsmith [24].

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 rapide (résistance à l'impact). Cette analyse permet donc la prédiction du comportement de ces plaques aux chocs mécanique. Pour ce faire, des plaques en Acier, AISI1045, AISI4340 et AISI52100 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.

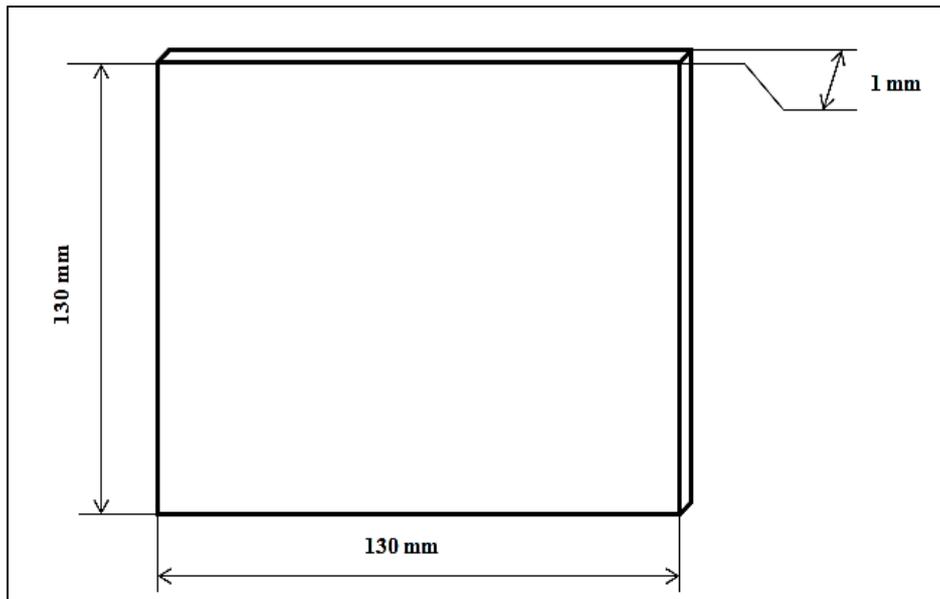


Figure III.1 : Représentation schématique de plaques utilisées

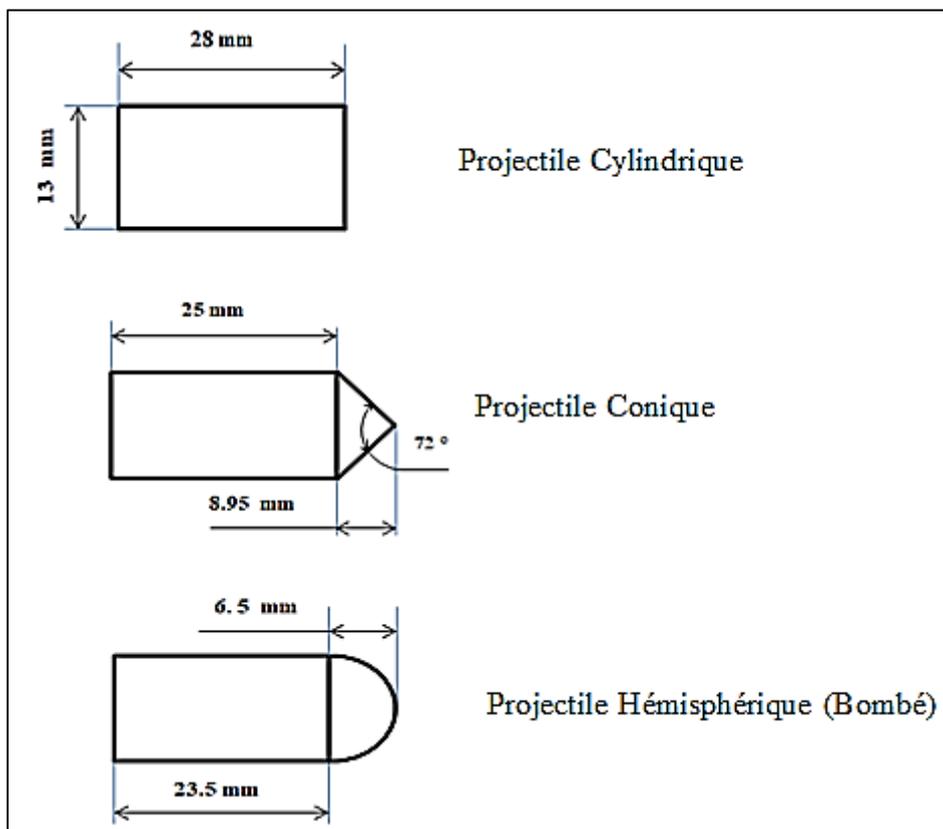


Figure III.2 : Représentation schématique des projectiles utilisés.

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.

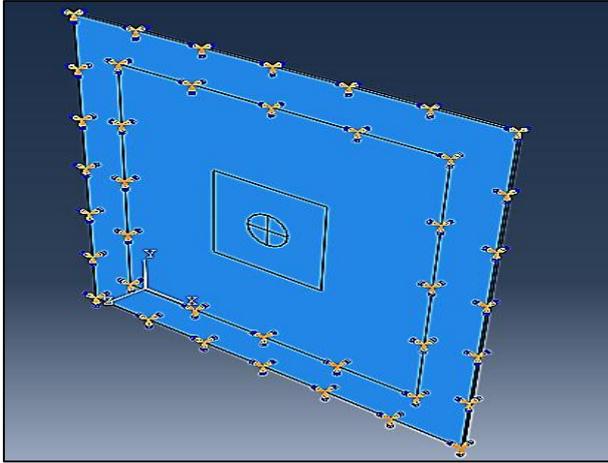


Figure III.3 : Conditions aux limites des plaques

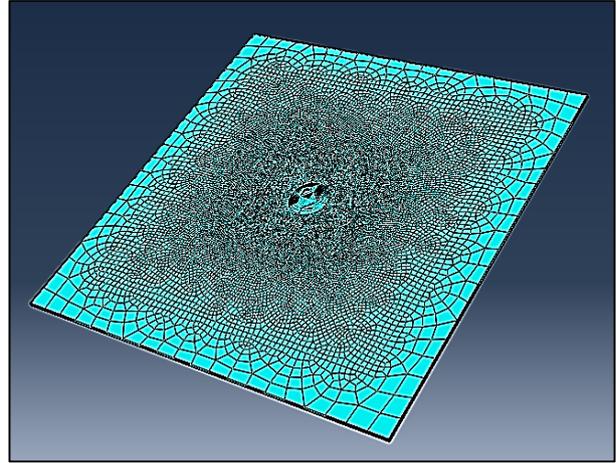


Figure III.4 : Maillage de la plaque

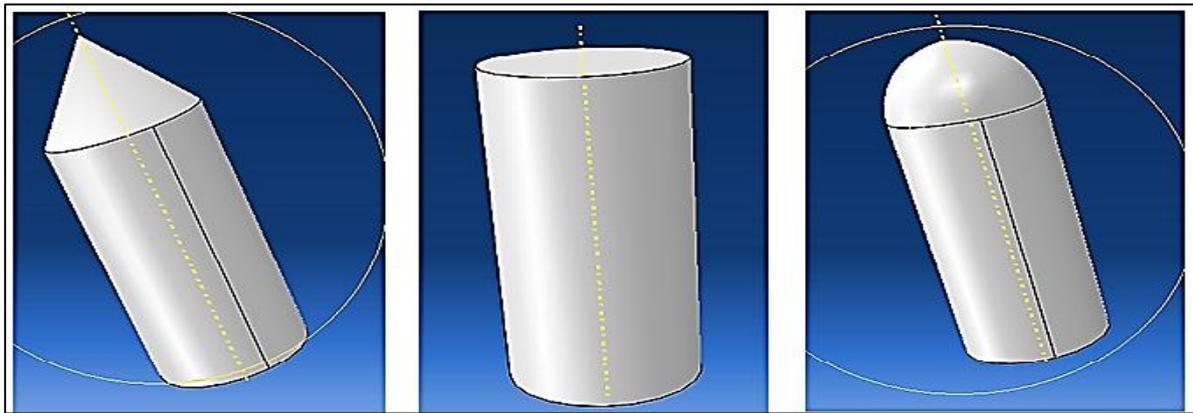


Figure III.5 : Modélisation des projectiles utilisés

Selon les travaux réalisés précédemment par les chercheurs dans ce domaine et suivant les informations et les paramètres disponibles dans la littérature, on a amené à choisir trois types différents d'acier dont le but d'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 Aciers. Les propriétés des matériaux utilisés sont indiquées dans les tableaux (III.1) (III.2) et (III.3).

<i>Type d'acier</i>	Module d'élasticité E (GPa)	Coefficient de poisson (μ)	Masse volumique Kg/m³
AISI 1045	200	0.3	7870
AISI4340	210	0.3	7850
AISI52100	200	0.3	7810

Tableau III.1 : propriétés des aciers utilisés

Paramètre	A [MPa]	B [MPa]	n	m	C
AISI(1045)	551.1	600.8	0.234	1	0.0134
AISI(4340)	792	510	0.26	1.03	0.014
AISI(52100)	774.7	134	0.37	3.171	0.018

Tableau III .2 : paramétré de Johnson-Cook des trois aciers

Paramètre	D1	D2	D3	D4	D5
AISI-1045	0.1	0.76	-1.57	0.005	-0.84
AISI-4340	0.05	3.44	-2.12	0.002	0.61
AISI-52100	0.0368	2.34	-1.484	0.0035	0.411

Tableau III.3 : paramétré d'endommagement Johnson-Cook des trois aciers

[Damage paramètres]

III.3. Analyse des résultats

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

Dans cette partie du travail un projectile de forme variable de masse 30 g, est éjecté perpendiculairement avec une vitesse de 200 à 500 m/s avec un intervalle de 50 m/s sur une plaque en acier AISI 1045 et AISI 4340. 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 ce cas on a pris comme exemple les résultats de la vitesse 200 m/s pour pouvoir faire une comparaison entre les deux aciers 1045 et 4340. Ce choix a été pris car au-delà de cette vitesse, pour tous les types de projectiles, il y'aura perforation directe avec des contraintes faibles.

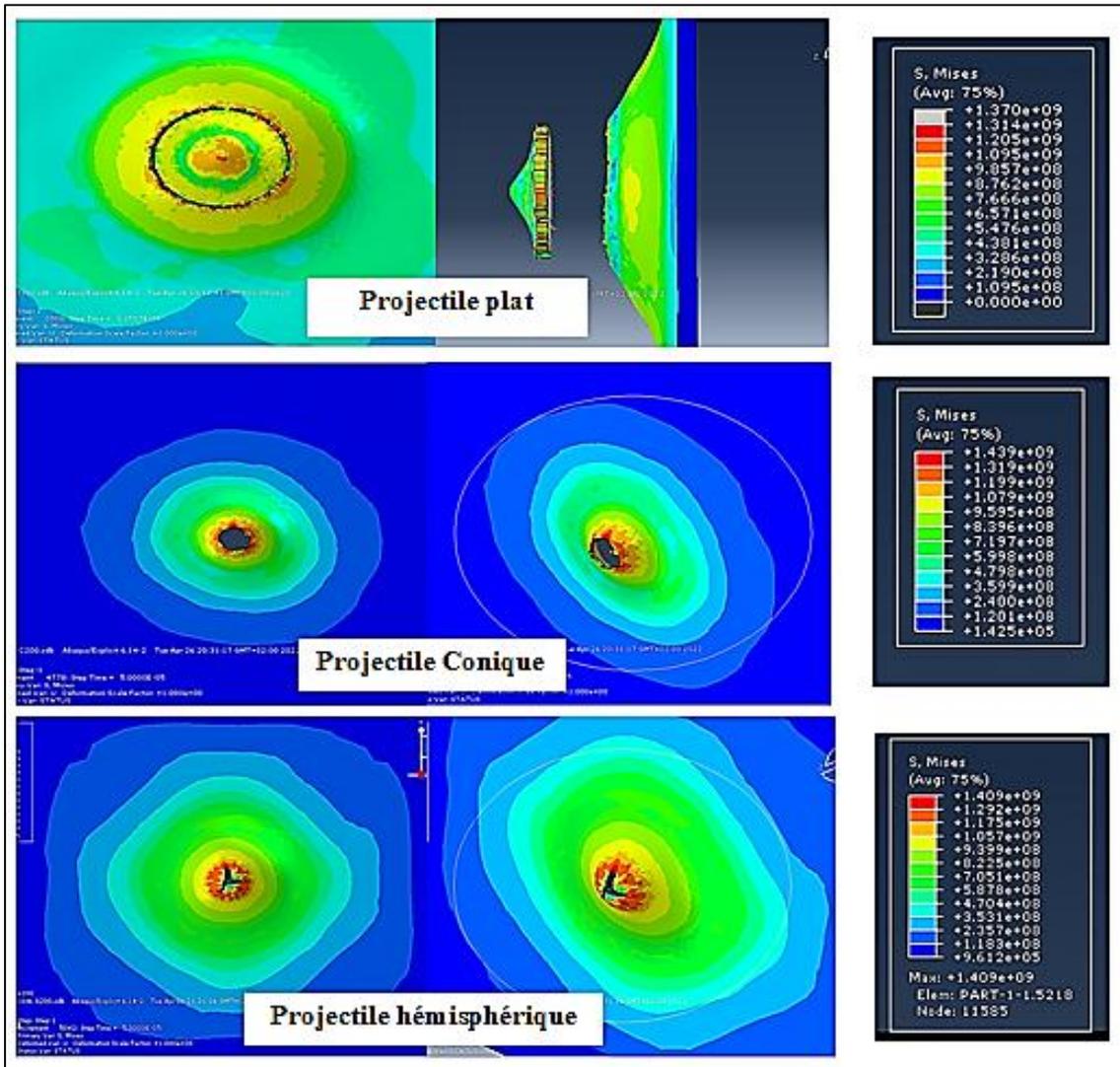


Figure III.6: Répartition des contraintes pour le cas de l'acier AISI 1045 à une vitesse de 200 m/s

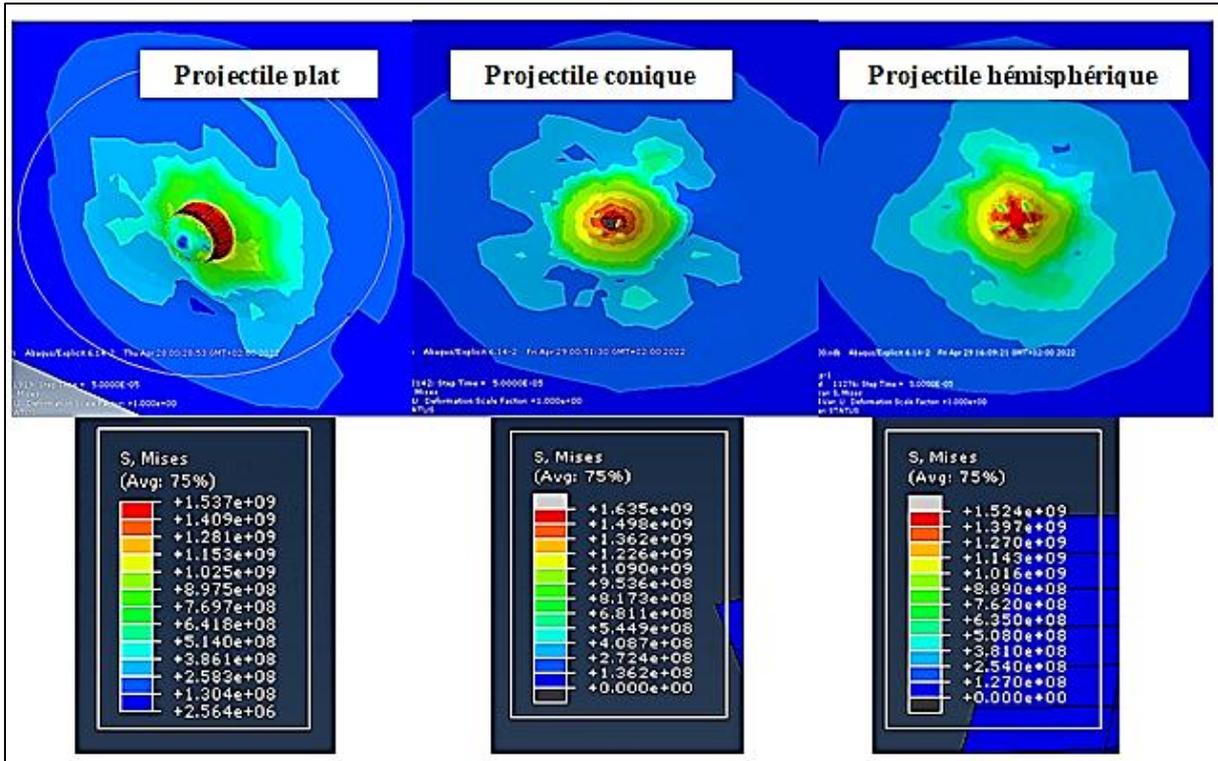


Figure III.7 : Répartition des contraintes pour le cas de l'acier AISI 4340 à une vitesse de 200 m/s

Les résultats obtenus montrent que le projectile conique a causé l'intensité des contraintes la plus élevée pour une même vitesse d'impact de 200 m/s. Les figures III.6 et III.7 montrent que le niveau de ces contraintes est d'autant plus élevé lorsque le bout de l'impacteur est de forme géométrique aigüe. On observe aussi dans les deux figures que la répartition ou la concentration des contraintes se diffère d'un projectile à l'autre, par exemple, dans le cas du projectile cylindrique à bout plat on remarque une concentration des contraintes autour du périmètre de la surface d'impact par contre dans le cas du projectile conique les contraintes commencent du centre (point de contact) de la plaque ver l'extérieur suivant l'angle de la tête conique.

Les deux figures montrent aussi que l'acier AISI 4340 possède les contraintes les plus élevées dans tous les types de projectiles par rapport à celles de l'acier AISI 1045, par exemple pour le projectile cylindrique à bout plat la contrainte maximale est de 1.37×10^3 [Mpa] pour l'acier AISI 1045 par contre, dans le cas de l'acier AISI 4340 et pour la même vitesse, la contrainte est de 1.53×10^3 [Mpa]. Cela signifie que l'acier AISI 4340 est plus résistant à l'impact que l'acier AISI 1045 dans les conditions d'impact.

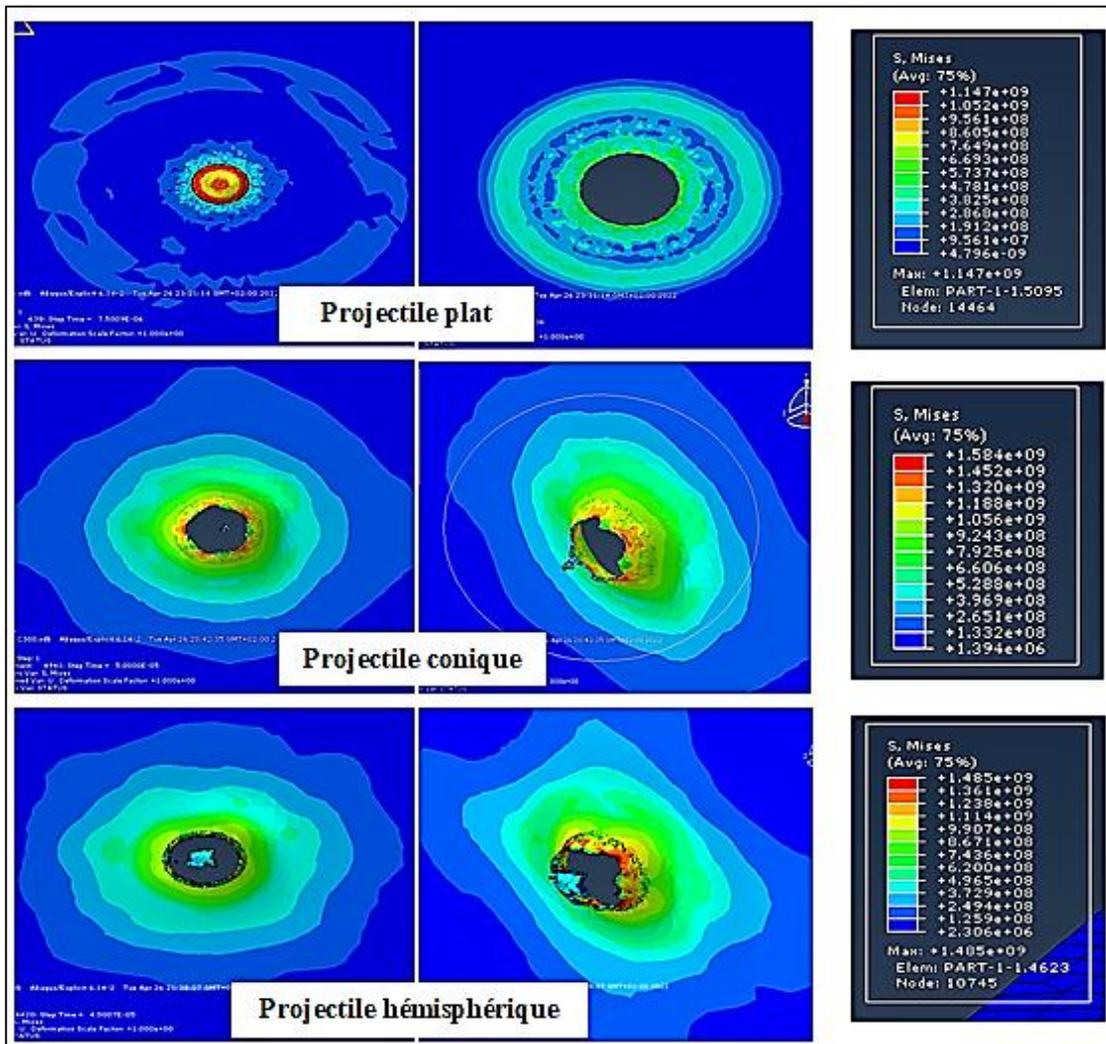


Figure III.8 : Répartition des contraintes pour le cas de l'acier AISI 1045 à une vitesse de 300 m/s

La figure III.8 représente les contraintes maximales trouvées pour l'acier AISI1045 avec une vitesse d'impact de 300 m/s. Dans cette figure nous observant la même répartition des contraintes que nous avons cités dans les cas précédents (vitesse 200m/s, Figure III.6) ainsi que leurs intensités diminuent à cause de la perforation directe dans les trois cas testés.

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

Afin de mieux présenter les différents modes de déformations provoquées par les trois types de projectiles on a utilisé la figure III.9 qui représente les résultats obtenues avec une vitesse d'impact de 300 m/s sur les deux aciers AISI1045 et AISI4340.

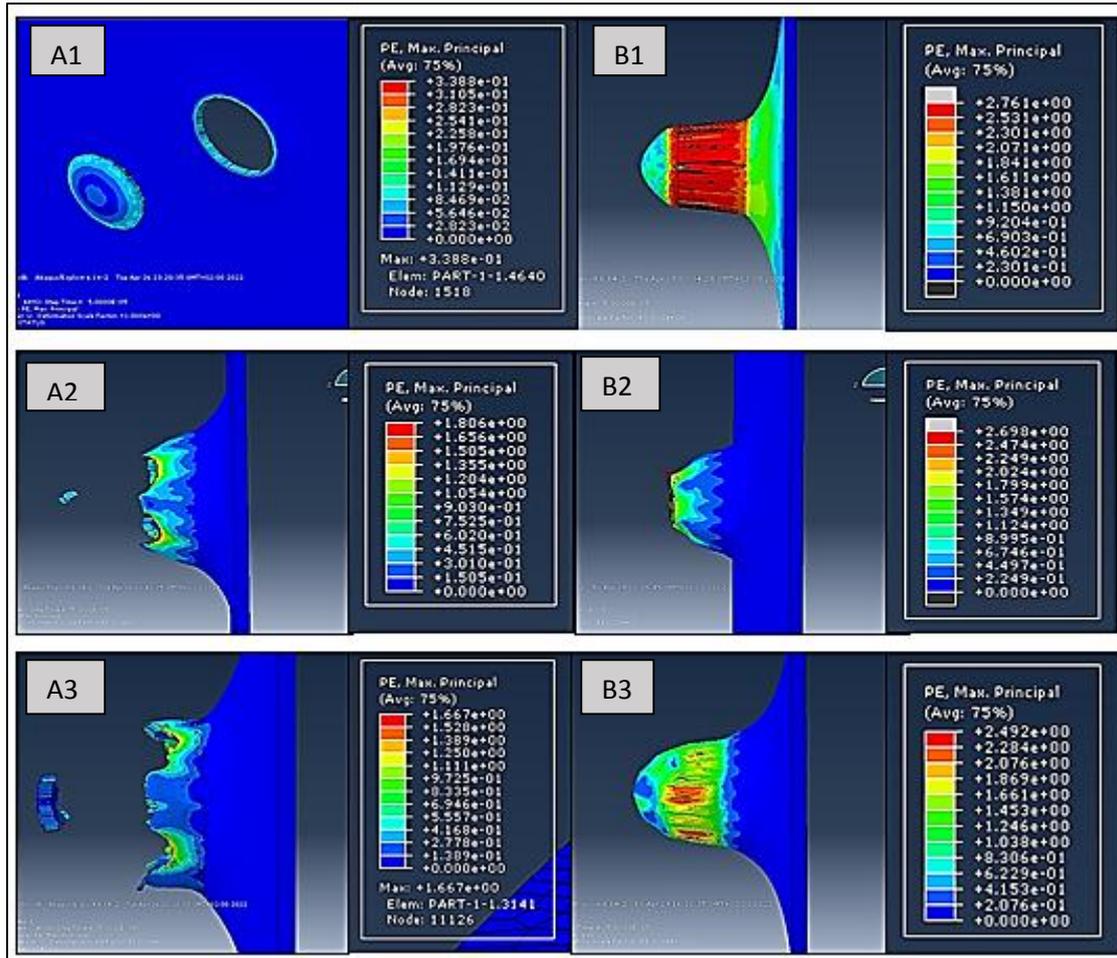


Figure III.9 : L'influence du type de projectile sur les déformations.

[A1 :AISI1045 P. plat ; B1 :AISI4340 P. Plat ; A2 :AISI1045 P. conique B2 :AISI4340 P. conique ;
A3 :AISI1045 P. hémisphérique ; B3 :AISI4340 P. hémisphérique]

D'après la figure III.9 nous observant trois types de déformations ou de ruptures différentes selon la géométrie et la forme de projectile utilisé (plat, conique et hémisphérique). Le projectile plat provoque une rupture par cisaillement dynamique et éjection de bouchon (figure III.9.A1), contrairement à ça nous observant une rupture par striction radiale et formation de pétales dans le cas du projectile conique (figure III.9.A2) et une rupture par striction circonférentielle avec éjection de petit bouchon (figure III.9.A3) dans le cas du projectile hémisphérique. Ces trois types de rupture s'apparaissent dans le cas de l'acier AISI 1045 à une vitesse de projection de 300m/s, par contre dans les figures III.9. B1, B2 et B3, cas de l'acier AISI 4340, seulement le projectile conique provoque la perforation figure III.9.B2, le projectile plat et hémisphérique provoque une déformation plastique mais n'est pas suffisante pour conduire au phénomène de perforation.

La figure III.9 montre aussi nettement que la zone endommagée plastiquement par un projectile plat et hémisphérique est plus étendue que celle engendrée par un impacteur à bout conique. La forme aiguë du bout impactant engendre des contraintes plus fortes très localisées et des zones plastiques très restreintes. Rappelons que le niveau de ces contraintes a franchi la limite de rupture de la plaque ce qui mène à la perforation de la plaque.

III.3.2. Effet de la masse de projectile sur les contraintes et les déformations

Dans cette partie d'étude l'effet de la masse du projectile sur la répartition et l'intensité des contraintes et déformations a été traité. Pour ce faire, un projectile cylindrique à bout sphérique de masse variable, 30 à 60g avec un intervalle de cinq (5) grammes, est éjecté perpendiculairement avec une vitesse de 200 m/s sur une plaque en acier AISI4340.

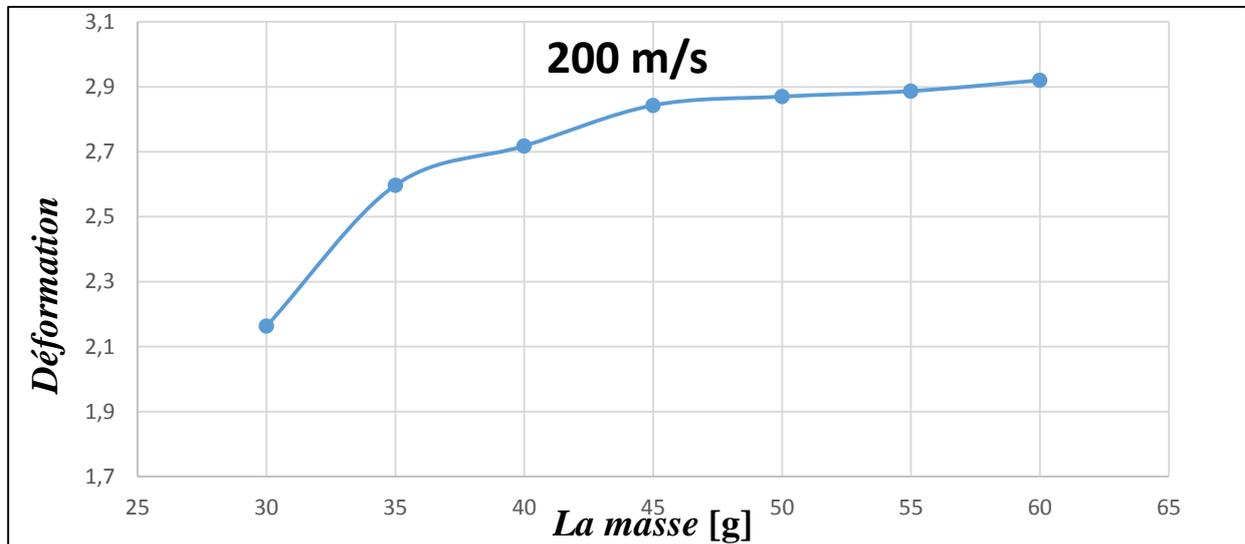


Figure III.10 : L'évolution des déformations en fonction de la masse de projectile.

Les résultats obtenus montrent que la masse de projectile a une influence directe sur les contraintes et déformations de la plaque à tester, la figure III.10 montre clairement la croissance de la déformation en fonction de la masse du projectile à une vitesse d'impact de 200 m/s, par exemple, la déformation atteinte par un projectile de **30g** est de **2.163** par contre la déformation est de **2.92** avec un projectile de **60g** de masse.

Parallèlement à ça, la zone impactée est plastiquement déformée avec perforation minime jusqu'à une perforation directe comme le montre la figure III.11.

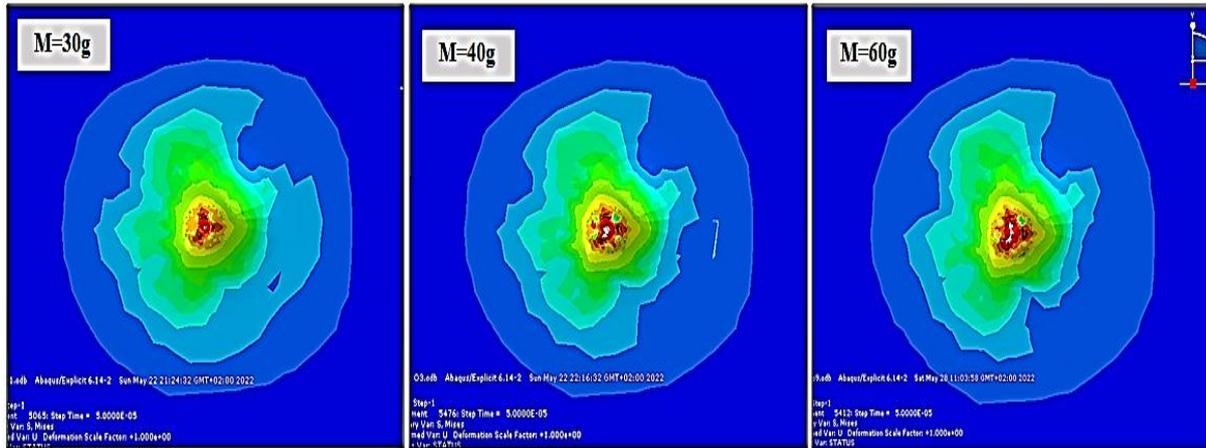


Figure III.11 : Taille de la déchirure en fonction de la masse de projectile.

Dans la figure III.11 nous observant que la zone impactée est plastiquement déformée, l'impacteur a pu pénétrer dans tous les cas mais la taille de la déchirure devenue plus importante lors d'un impacteur de masse élevée. Il est clair que la vitesse et la masse du projectile sont deux paramètres étroitement liés. Donc, les résultats obtenus montrent que la masse du projectile est un paramètre déterminant du comportement de la plaque à l'impact.

III.3.3. Effet de l'angle d'orientation sur les contraintes et déformations

Cette partie traite l'étude de la résistance à l'impact des plaques en acier (AISI1045, AISI 4340) sous l'effet de l'angle de d'orientation θ . Les angles balayés sont : 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° dont l'angle 0° est celui qui coïncide avec l'axe perpendiculaire par rapport à la plaque. Dans ce cas, un projectile cylindrique à bout plat est projeté à une vitesse de 300 m/s suivant les angles d'orientation cités précédemment.

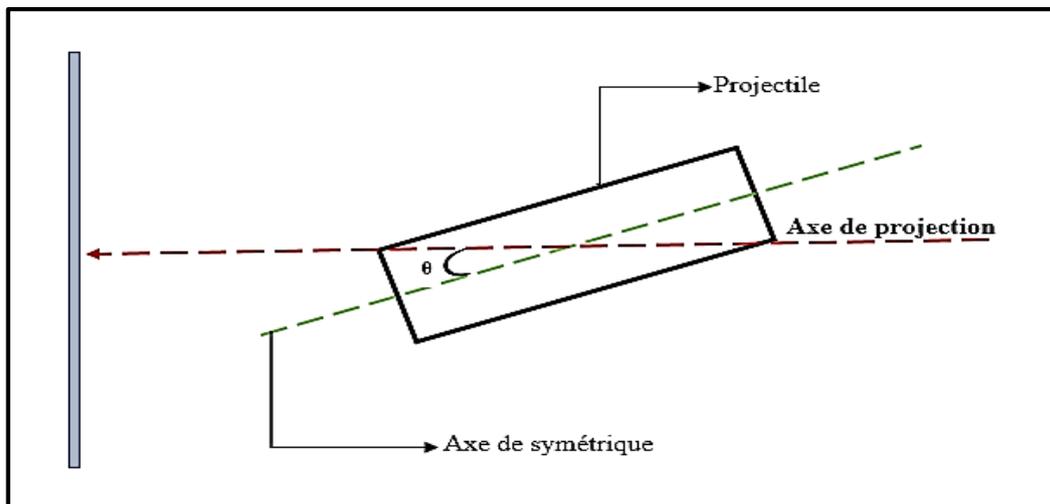


Figure III.12 : Représentation de l'angle d'orientation de projectile

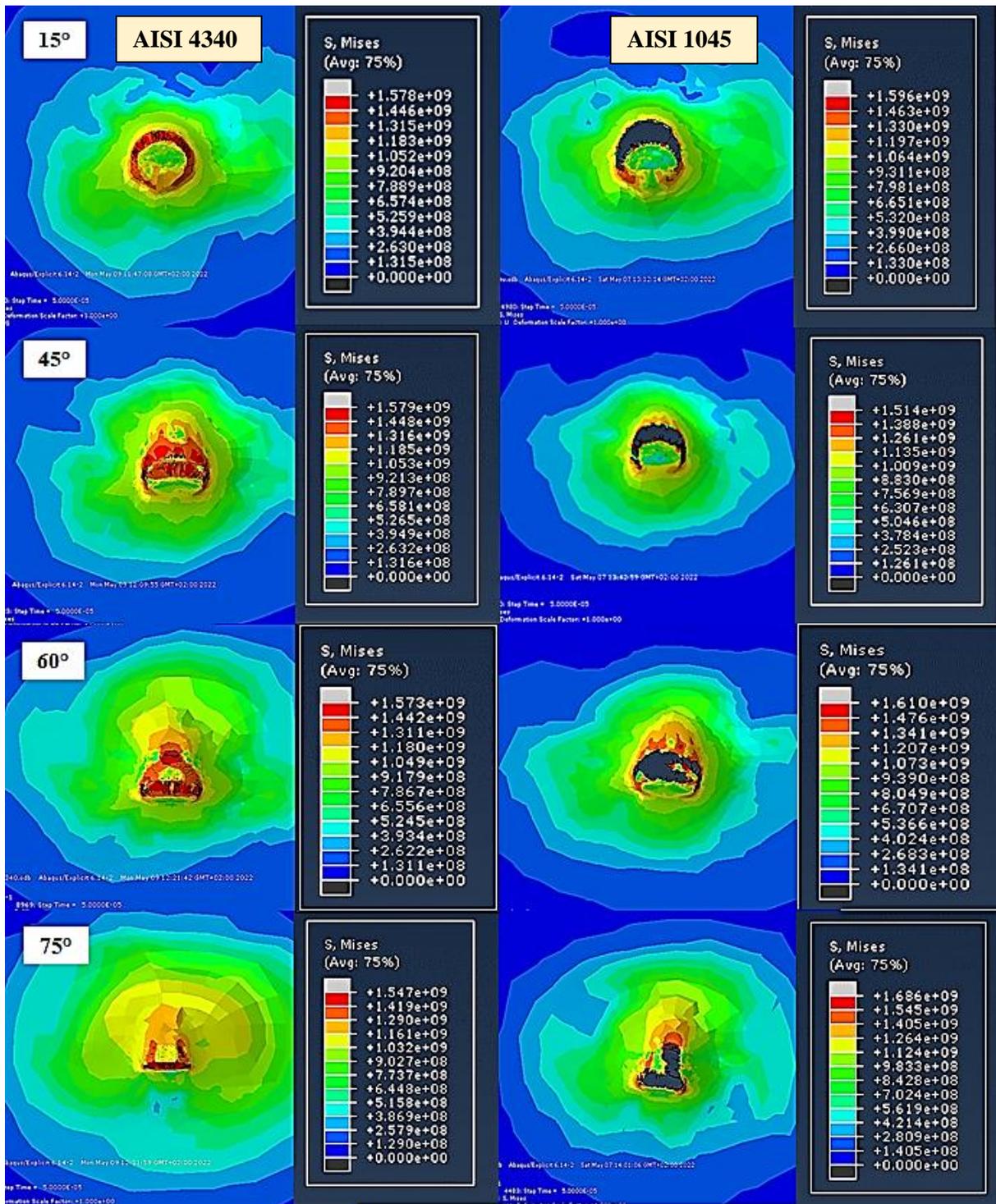


Figure III.13 : L'influence de de l'angle d'orientation du projectile sur la répartition des contraintes et les déformations.

Dans les essais précédents, figure III.6, les résultats montrent la concentration des contraintes autour du périmètre du bout impactant avec l'angle d'orientation $\theta = 0^\circ$. La figure III.13 représente l'influence de cet angle sur la concentration des contraintes ainsi que les déformations et la taille de la déchirure. Les résultats montrent clairement que les contraintes se répartissent autour du bout impactant qui se change avec le changement de l'angle

D'orientation de projectile, autrement dit, lorsqu'on fait orienter l'impacteur avec un angle θ ça veut dire qu'on a changé la surface de contact entre la plaque et l'impacteur. A cet effet, nous revenant à confirmer que la forme aigüe du bout impactant engendre des contraintes plus fortes très localisées et des zones plastiques très restreintes comme le montre les résultats représentés dans la figure III.13. Nous observant que la taille de la déchirure diminuer avec l'augmentation de l'angle d'orientation $\theta = 60^\circ$, au-delà de 15° , cette valeur, le bout impactant devient moins aigüe ce qui conduit à minimisé les zones dangereuses avec une diminution de l'intensité des contraintes et la taille de la déchirure (cas de l'acier **AISI1045** *figures à droite*). Les mêmes résultats trouvés avec le cas de l'acier **AISI4340** sauf que la concentration des contraintes n'a pas conduit à la perforation de la plaque vue la qualité et la résistance élevée de ce type d'acier, dans ce cas nous avant observer une petite déchirure avec un angle θ de 15 et 30° qui devient minime jusqu'il soit nul à $\theta=75^\circ$.

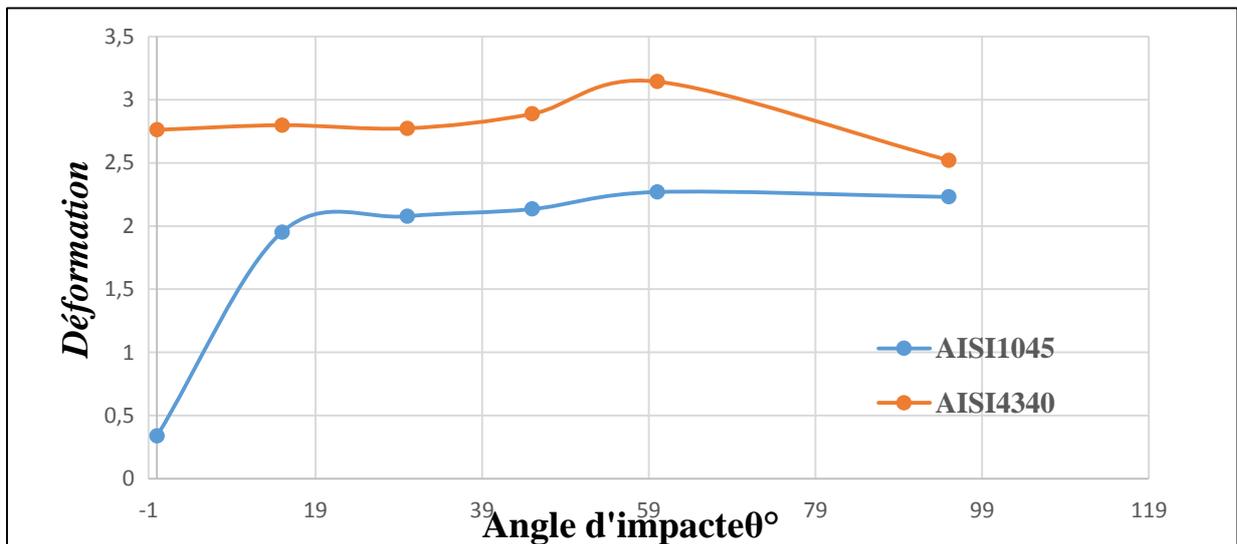


Figure III.14 : L'influence de de l'angle d'orientation du projectile sur les déformations.

D'après la figure III.14, nous observant que les deux courbes ayant presque la même allure sauf que le premier point de l'angle $\theta=0^\circ$ ou il 'y a perforation directe avec enlèvement de bouchant ce qui donne une valeur de déformation minime vue la limite de performances de l'acier AISI1045. Nous observant aussi que dans tous les points, le niveau de déformations est plus élevé dans le cas de l'acier AISI4340 par rapport à celles de l'acier AISI1045, cela est sûrement due à la résistance de l'acier AISI4340 car dans ce cas, la zone endommagée est plus étendue avec une petite déchirure qui tend à s'annulée avec un angle de 60 à 75° .

Conclusion générale

Conclusion générale

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

Dans ce travail nous avons étudiée numériquement trois exemples différents de problème d'impact en utilisant un projectile rigide et des plaques minces en Acier. 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 utilisés (cylindrique à bout plat, cylindrique à bout conique et cylindrique à bout hémisphérique) avec l'utilisation de deux types d'acier (AISI 1045 et AISI 4340). Dans le deuxième cas nous avons étudié la masse du projectile (cylindrique à bout hémisphérique) sur des plaques en acier AISI4340 et finalement, l'angle d'orientation d'un projectile cylindrique à bout plat a été traité avec l'utilisation de l'acier AISI1045 et AISI4340.

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

- ✓ La forme du projectile ou le bout impactant est un facteur géométrique essentiel et déterminant du comportement des plaques en acier aux chocs mécaniques à grandes vitesses.
- ✓ Trois formes de ruptures ont été remarquées : Le projectile à bout plat provoque une rupture par cisaillement dynamique et éjection de bouchon, une rupture par striction circonférentielle avec éjection de petit bouchon a été remarqué dans le cas du projectile hémisphérique, et finalement le projectile cylindrique à bout conique conduit à une rupture par striction radiale et formation de pétales.
- ✓ Le niveau des contraintes est d'autant plus élevé lorsque le bout impactant est de forme géométrique aigue, comme le cas du projectile à bout conique, ce qui conduit à une perforation directe.
- ✓ La masse du projectile est aussi un paramètre déterminant du comportement des plaques aux impacts à grandes vitesses, les zones déformées plastiquement sont plus étendues lorsque la cible est impactée avec un projectile de masse importante. L'énergie cinétique varie proportionnellement à la masse du projectile, une énergie cinétique importante conduit à la perforation de la plaque.
- ✓ Plus l'angle d'orientation du projectile augmente plus le bout impactant devient moins aigue ce qui conduit à minimiser les zones dangereuses avec une diminution de l'intensité de

contraintes et la taille de la déchirure, cela implique que les dégâts causés par l'un des projectiles ne sont pas toujours les mêmes, sa position le temps du contacte joue un rôle aussi important pour la détermination de ces dégâts-là.

- ✓ Les aciers AISI4340 sont plus résistants à l'impact par rapport aux aciers AISI1045 ce qui favorise leurs utilisation pour le blindage des carrosseries par exemple.

Bibliographies

- [1] Kokouvi Mawuli KPENYIGBA**Etude du comportement dynamique et modélisation thermo viscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique** 23 octobre 2013.
- [2] Abdessamed BACHIRI 1 *, Nouredine DJEBBAR 2, Benali BOUTABOUT1 Effet de l'impact du projectile sur le comportement mécanique des aéronefs** (2021).
- [3] La fabrication de l'acier : <https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/matiere-fabrication-acier-835/>.
- [4] **Généralités** acier : http://archives.univbiskra.dz/bitstream/123456789/14890/1/mokrani_kenza.pdf.
- [5] désignation normalisée des matériaux : https://www.academia.edu/3739557/Designation_normalisee_des_materiaux.
- [6] Fonderie Vincent « <http://www.fonderie-vincent.com/n/Lexique-de-la-fonderie/Acier-non-allie-i96.html> ».
- [7] Amélioration Des Caractéristiques Mécaniques D'un Aciers par des Différents Techniques. R. BUTIN, M. PINOT "Fabrications mécaniquesl. Technologie, tome2, 1981.<http://dspace.univmsila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/21143/1060.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [8] Acier AISI 1045 STELE : <https://waldunsteel.com/fr/products/1020-steel/>
- [9] Acier AISI 4340 STELE : <https://waldunsteel.com/fr/products/1045-steel/>
- [10] Acier AISI 1020 STELE : <https://waldunsteel.com/fr/products/4340-steel/>
- [11] Acier AISI 52100 STELE : <https://www.astmsteel.com/product/52100-bearing-steel-aisi/>.
- [12] Acier AISI 304 STELE : <https://matieredumonde.com/acier-inoxydable-304/>.
- [13] thèse doctorat d'état es sciences mathématiques mécanique « instabilités thermo-viscoplastiques aux grandes vitesses de déformation ».
- [14] Bathias C., Matériaux composites, l'Usine Nouvelle, Dunod, Paris, 2005.
- [15] Jean-Richard ANDRE, Matthieu SONNATI «Comportement à l'impact des matériaux composites » Master 2 MQM 2006-2007.
- [16] VALERSTEINAS P., Projet Mosaïc : structure automobile en composites et aluminium, Techniques de l'Ingénieur, AM5605, 1998.
- [17] Mr. BENAÏSSA « Résistance aux Chocs des Matériaux Composites» Mémoire de Magistère Université de Mostaganem, 2012.
- [18] Kolopp, A Impact sur structures sandwiches pour application débinage Aéronautique.Thèses,2012.<file:///D:/parcour%20L2L3M1/M2/PFE%20finale%20master/impact.pdf>.

- [19] THÈSE « Étude du comportement dynamique et modélisation thermo viscoplastique de nuances d'acier soumises à un impact balistique ».
- [20] Amélioration de la résistance d'impact d'un bord d'attaque d'un avion en alliage d'aluminium par des matériaux composites et métallique.
file:///D:/parcour%20L2-L3-M1/M2/PFE%20finale%20master/KHANFIR_Ahmed.pdf.
- [21] THÈSE « Contribution à la caractérisation de la déformation et de la rupture dynamique de structures sous impact »
<file:///D:/parcour%20L2-L3-M1/M2/PFE%20finale%20master/ANTOINAT.pdf>.
- [22] Méthode d'identification numérique du Comportement Mécanique et Dynamique des Matériaux utilisés dans le Calcul Automobile.
file:///D:/parcour%20L2L3M1/M2/PFE%20finale%20master/iste_incertainia20v4n1_3.pdf.
- [23] Abdessamed BACHIRI ¹ *, Noureddine DJEBBAR ², Benali BOUTABOUT¹
Effet de l'impact du projectile sur le comportement mécanique des aéronefs**
(2021).
- [24] Werner Goldsmith. Impact: the theory and physical behaviour of colliding solids.
Book (2018).
- [25] B. V. Sankar, S. HU, Dynamic delamination propagation in composite beams.
Journal of Composite Materials, vol. 25, pp. 1414-1426, (1991).