

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie de la Construction

Département Génie Mécanique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master Académique en Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Thème

Modélisation du comportement de structures tubulaires traitées et non traitées

Proposé et dirigé :

M.OULD OUALI Mohand

M. AHMED ALI Abdellah

présenté par :

M.AIT TALEB Aissa

Promotion 2017/2018



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord et particulièrement Mr **OULD OUALI Mohand**, encadreur de mon mémoire, pour ses directives et son soutien moral tout au long de la durée de mon travail.

J'adresse mes sincères remerciements à toute l'équipe du laboratoire **LECMM** (Laboratoire Elaboration et Caractérisation des Matériaux et Modélisation), plus particulièrement : M. AHMED ALI Abdellah et M^{me} AIMENE Kahina.

Je remercie également tous les **membres du jury**, qui vont honorer par leur présence et leur jugement, la soutenance de ce Mémoire.

En fin, ma gratitude va à tous les **enseignants** qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.

Merci pour l'amour que vous me portez, merci pour la confiance sans failles que vous m'avez témoigné.

AITTALEB Aissa

DÉDICACE

À mes très chers parents, mes frères et sœurs et

SI SALEME Youcef et son épouse Souad

Et à tous ceux qui me sont chers

À titre de reconnaissance, d'amour et

D'affection je leur dédie ce travail.

Mes camarades de La promotion master 2018 FMP

AITTALEB Aissa

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I: Absorption d'énergie sur des systèmes tubulaires.

1. Introduction	4
2. Mécanismes d'Absorption d'Énergie des matériaux métalliques :	4
3. Généralité sur les systèmes d'absorption d'énergie :	5
4. Système d'absorption d'énergie par déformation élastique :	6
5. Systèmes d'absorption d'énergie par déformation plastique :	7
5.1. Absorption d'énergie par déformation plastique des structures tubulaires cylindriques :	7
5.2. Flambage des structures tubulaires sous chargement radiale :	7
5.2.1 Structures tubulaires charge localement :	7
5.2.2. Compression latérale des tubes :	9
6. Flambage sous chargement axiale des tubes :	9
6.1. Inversement des tubes :	9
6.2. Aplatissement des tubes :	10
6.3. Flambage progressif des tubes :	11
6.4. Différents Types de Flambage :	11
- Le flambage global	11
- Le flambage localisé	12
6.5.1. Les modes de déformation :	13
5.1. Deux principaux modes d'effondrement (déformation) : lorsque un tube	13
5.2. Les modes d'écrasement stable :	14
A) Le mode l'écrasement stable:	14
-Mode axisymétrique (AM)	14
-Mode mixte (XM)	15
-Mode diamant (DM)	16
B) Mode d'écrasement instable	16
6.4. Les principaux paramètres géométriques contrôlant ces modes sont:	17
6.5. Une comparaison entre les modes de déformation stable et instable :	17
Conclusion :	18

Chapitre II :Abaqus, lois de comportement et aciers.

1.Introduction.....	19
2. Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS	19
2.3. Les Logiciels sur le marché :.....	19
2.4. Deux solveurs principaux.....	20
2.4.1. ABAQUS/Standard :.....	20
2.4.2. ABAQUS/Explicit.....	21
2.5. Comparaison :	22
2.6. Présentation des différents types d'éléments Abaqus :.....	22
2.7. Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS :.....	23
2.8. Structure d'une analyse sous Abaqus :.....	23
3. Lois de comportement mécanique :	24
3.1 Les lois empiriques :	24
3.1.1. Le modèle LINDHOLM :	24
3.1.2. Le modèle de KLOPP, CLIFTON et SHAWKI :.....	24
3.1.3. Le modèle de Johnson-Cook :.....	25
4. Essais de caractérisation des matériaux	26
4.1. Les essais de traction :.....	27
4.2. L'essai au choc :.....	28
4.3. Essais de dureté :.....	29
A) La dureté Brinell (HB).....	30
B) La dureté VICKERS(HV)	30
4.3.2. Mesure de profondeur :	31
4.4. Essais mécaniques uni-axiaux :.....	32
5. Les aciers et traitements thermiques :	32
5.1. Les aciers :.....	32
5.1.1. On parle d'acier allié :.....	32

Aciers faiblement alliés :.....	32
Aciers fortement alliés :	32
5.1.2. On parle d'acier non allié :	32
5.1.3. Propriétés des aciers	32
A). Propriétés physiques de l'acier	32
B). Propriétés mécaniques de l'acier.....	33
5.1.4 Généralité sur l'acier doux :(Aciers non alliés d'usage général)	33
5.1.5. Classification des aciers selon leur composition chimique :.....	33
5.1.6. La désignation	33
5.1.7. La norme suivie	34
5.1.8. Caractéristique mécanique de l'acier E235 :.....	34
5.2. Les traitements thermiques.	34
5.2.1. Les principaux traitements thermiques sont :.....	35
A) Le recuit :	35
C) Le revenu :.....	35
5.2.2. Le but de traitement thermique :	36
5.2.3. Traitements thermochimiques :.....	37
5.2.4 Les principaux traitements thermochimiques :	38
A) La carbonituration :.....	38
B) La nitruration :.....	38
C) La cémentation :.....	38
5.2.5. Autres traitements :	38
A) La cyanuration :	38
B) La sulfinisation :.....	38
5.2.6. L'objectif de la cémentation :.....	38
Conclusion.....	39

Chapitre III : Modélisation numérique.

1. Introduction	40
2. Construction du modèle sous Abaqus CAE	40
2.1 Modules d'ABAQUS/CAE :.....	40
2.2 Introduction des zones traitées :	43
3. Identification des paramètres matériau de la loi de Johnson-Cook :.....	44
4. Description des géométries et des conditions de simulation.....	44
4.1. Dimensions des éprouvettes utilisées [Ahmed Ali]:	45
5. Résultats et interprétations :.....	47
5.1. Étude paramétrique - Identification des paramètres du modèle :.....	47
a) Influence de variation de paramètre A :.....	47
b) Influence de la variation du paramètre B :.....	48
c) Influence de variation de paramètre C :	49
d) Influence de variation de paramètres n :	49
5.2. Comparaisons des résultats numériques et expérimentaux :.....	50
5.2.1. Tube non traité :	51
5.2.2. Tube traité partiellement sur deux (02) anneaux :.....	53
5.2.3. Tube non traité en dynamique :.....	53
5.2.4. Répartition des contraintes, déformation plastique et vitesse dans le tube :	55
6. Conclusion :.....	57
Conclusion générale.....	58
Annexe.....	59
Bibliographie.....	69

Liste des figures

Chapitre I: Absorption d'énergie sur des systèmes tubulaires.

Figure I.1 : l'absorption d'énergie d'un tube métallique.	4
Figure I.2 : Exemple d'un système d'absorption d'énergie par déformation élastique.....	6
Figure I.3 : Processus d'écrasement par chargement localisé comprenant trois phases distinctes.....	8
Figure I.4 : processus de compression latérale des tubes cylindriques. (a) : le tube avant l'écrasement, (b) : le tube après l'écrasement.....	9
Figure I.5 : processus classique d'inversement extérieur d'un tube circulaire.	10
Figure I. 6: Aplatissement des tubes circulaires(A) avec inversion,(B) sans inversion sur des structures en acier.....	11
Figure I.7 :(a). Types d'instabilité : 1. par point limite OABC; 2. par bifurcation.....	12
Figure I.8 : Mode de dégradation de la structure tubulaire : évasement (a), fragmentation (b), pliage (c), flambement (d).	13
Figure I.9 : La courbe caractéristique de mode d'écrasement stable et instable.....	13
Figure I. 10 : le mode d'écrasement axisymétrique.	14
Figure I.11 : Courbe typique de force - déplacement d'un tube circulaire en mode d'écrasement axisymétrique.....	14
Figure I.12 : analyse du mode de déformation axisymétrique.	15
Figure I.13 : Le mode de déformation non-axisymétrique, mixte.	15
Figure I.14 : le mode de déformation non-axisymétrique en diamant.	16
Figure I. 15 : Le mode d'écrasement instable.....	16

Chapitre II :Abaqus, lois de comportement et aciers.

Figure II.1 : Organigramme de résolution de schéma implicite.....	20
Figure II. 2 : Organigramme de résolution de schéma explicite.	21
Figure II.3 : Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus.	22
Figure II.4 : structure d'analyse sur ABAQUS.	23
Figure II.5 : exemple de dispositif de traction et éprouvettes de traction plates et cylindriques.	28
Figure II. 6 : Diagramme conventionnel de traction simple.	28
Figure II.7 : Principe de l'essai de résilience utilisant un mouton-Charpy.	29
Figure II.8 : Principe de l'essai de dureté BRINELL.	30
Figure II.9 : principe de l'essai de dureté VICKERS.	30
Figure II.10 : Principe de l'essai de dureté ROCKWELL (B) et ROCKWELL (C).....	31
Figure II.11 : Le procédé de traitement thermique.....	36

Chapitre III : Modélisation numérique.

Figure III.1 : le corps rigide indéformable.(la partie supérieur).....	40
Figure III.2 : éprouvette on acier déformable. (L'éprouvette a un quart de cercle).	41
Figure III.3 : assemblage des éléments,(éprouvette et les du corps rigide).	41
Figure III.4 : le maillage de la structure tubulaire, Maillage raffiné.	42
Figure III. 5 : visualisation de la structure après déformation.	43
Figure III.6 : Tubes après leur protection, montrant des zones ciblées cémentées.	43
Figure III. 7 : structure tubulaire circulaire en acier doux E235 non traité.....	45
Figure III.8 : courbe expérimentale de l'éprouvette non traite sous chargement quasi-statique [Ahmed Ali].	45

Figure III.9 : Forme géométrique cémentée dans ce cas l'épaisseur des bandes égale à 6 mm.	46
Figure III.10 : courbe Force-Déplacement pour la contrainte d'écoulement A (Mpa).	48
Figure III.11 : courbe Force-Déplacement pour le paramètre B (MPa).	48
Figure III.12 : Influence du coefficient C sur les courbes force-déplacement.	49
Figure III.13 : Influence de l'exposant n sur les courbes force déplacement.	50
Figure III.14 : courbe comparatif entre l'expérimentale et numérique.	51
Figure III.15 : courbe énergie pour la partie numérique.	52
Figure III.16 : courbe énergie pour la partie expérimentale.	52
Figure III.17 : courbe expérimentale et simulation de l'éprouvette à deux anneaux.	53
Figure III.18 : Courbe force-déplacement de la réponse du tube dans le cas de chargement dynamique.	54
Figure III. : 19 Courbe énergie-déplacement dans le cas dynamique.	54
Figure III.20 : Répartition de la contrainte de Von Mises.	55
Figure III. 21 : Répartition de la déformation plastique cumulée.	56
Figure III.22 : Répartition de la vitesse de déformation	57

Liste des tableaux

Chapitre II :Abaqus, lois de comportement et aciers.

Tableau II.1 : Inconvénients et avantages de module implicite et explicite.	22
Tableau II.2 : les unités dans ABAQUS.	23
Tableau II.3 : la composition chimique des aciers.	34
Tableau II.4: la norme de l'acier E235 est indiqué dans le tableau.	34
Tableau II.5 : les Caractéristiques mécaniques du matériau de référence.	35
Tableau II.6 : Différents traitements de surface	37

Chapitre III : Modélisation numérique.

Tableau III.1 : variation des bandes ou anneaux. (A).	46
Tableau III.2 : variation des valeurs pour la contrainte d'écoulement A.....	47
Tableau III.3 : Les valeurs de paramètre B (Mpa).	48
Tableau III. 4 : Les valeurs du coefficient C.....	49
Tableau III. 5 : Les valeurs du coefficient n.	50

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours les besoins industriels dans des domaines très diversifiés tels que l'aéronautique, le nucléaire et l'automobile imposent des contraintes et des prouesses de plus en plus élevées afin de diminuer les coûts de fabrication et d'augmenter la fiabilité des pièces. L'utilisation croissante des moyens de transports, conduit à une augmentation du nombre de d'accidents. A fin, augmenter a sécurité des véhicules de nombreuses études et expériences ont été réalisées en vue de trouver des solutions susceptibles de réduire la gravité des accidents mettant en danger des vies humaines, pouvant parfois entraîner de nombreux décès.

Une des principales fonctions des structures avant d'une automobile, comme des longerons (figure-1-par-choque avant de vincule) est d'absorber l'énergie d'un choc éventuel pour avoir une meilleure protection des occupants du véhicule. L'amélioration et l'optimisation des performances en matière d'absorption d'énergie de ces structures dépendent principalement de leurs matériaux, de leurs géométries et du type de sollicitations auxquelles elles sont soumises lors des impactes. Le problème ainsi posé, est un problème dans lequel interviennent, des phénomènes très complexes liés au comportement du matériau sous des sollicitations souvent dynamiques (chocs) et aux modes de déformation (flambage), qui s'en suivent.

À propos du comportement à l'écrasement des structures tubulaires, de nombreux travaux à la fois théoriques et expérimentaux, ont été réalisés. La maîtrise de la prévision du comportement et de la rupture des structures mécaniques est devenue essentielle. Pour cette raison la modélisation numérique occupe une place importante dans certains domaines de l'industrie. Nous ne connaissons pas encore très bien les causes d'instabilité d'écrasement, le positionnement du mode de déformation, l'effet dynamique, etc....

Dans ce travail ont se propose d'étudier le comportement de structures tubulaires à section circulaire utilisées comme système d'absorption d'énergie sous différentes sollicitations quasi-statique et dynamique. Les résultats des simulations numériques menées en utilisant un code de calcul par éléments finis ABAQUS, seront confrontés à des résultats expérimentaux précédemment réalisés.

Le contenu de ce mémoire présentant, un travail de recherche bibliographique sur les systèmes d'absorption d'énergie et une présentation du logiciel de simulation ABAQUS et enfin les résultats de la simulation numérique est décliné en trois grands chapitres.

Le premier chapitre : Ce chapitre donne un aperçu général sur les différents systèmes d'absorption d'énergie par déformation élastique et plastique. Un intérêt particulier sera accordé aux systèmes utilisant des structures tubulaires à parois minces subissant une déformation plastique sous chargement axial. Une description détaillée des différents modes de déformation qui en résulte et de la capacité d'absorption d'énergie correspondante à chacun des modes est présentée.

Le deuxième chapitre : Dans la première partie de ce chapitre on présentera une description du code de calcul par éléments finis ABAQUS. La seconde partie portera sur la présentation des caractéristiques mécaniques du matériau des structures tubulaires utilisées (acier doux E235) et sur le traitement thermique superficiel et local de cémentation à basse pression opéré sur les tubes bruts pour améliorer leur capacité d'absorption d'énergie.

Le troisième chapitre : dans ce chapitre on a réalisé une simulation numérique des éprouvettes en acier doux traité et non traité soumises à un écrasement uniaxial sous sollicitation quasi-statique en utilisant un code de calcul par éléments finis ABAQUS version 6.14 avec une présentation brève des différents modules. Une étude paramétrique pour l'identification des paramètres de la loi de comportement JOHNSON-COOK est présentée.

Enfin ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale.

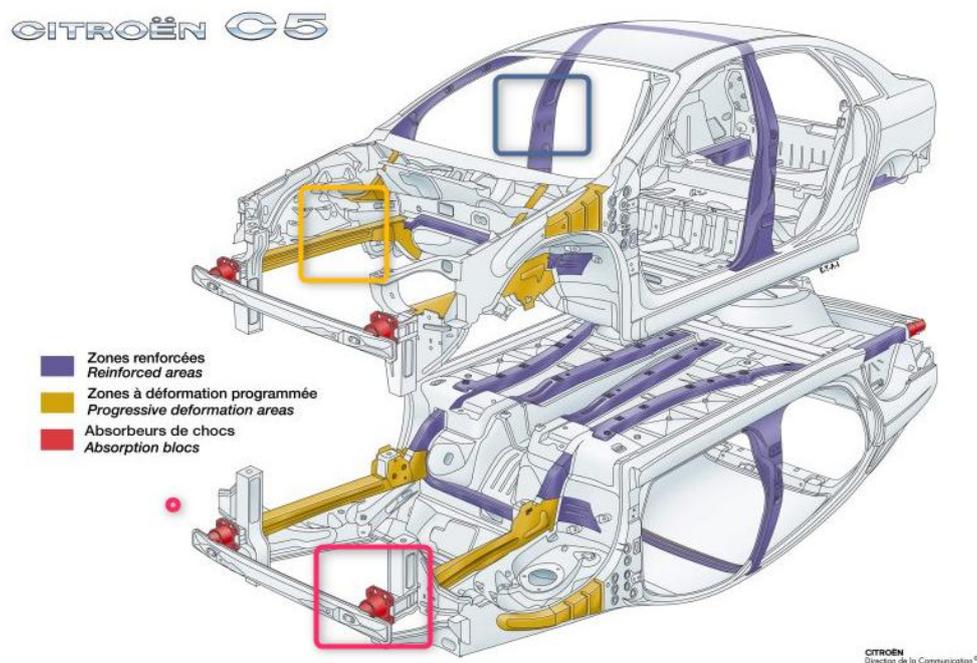


Figure A: le longeron (la Partie avant) d'un châssis automobile Citroën C5.

Chapitre I

Absorption d'énergie sur des systèmes tubulaires

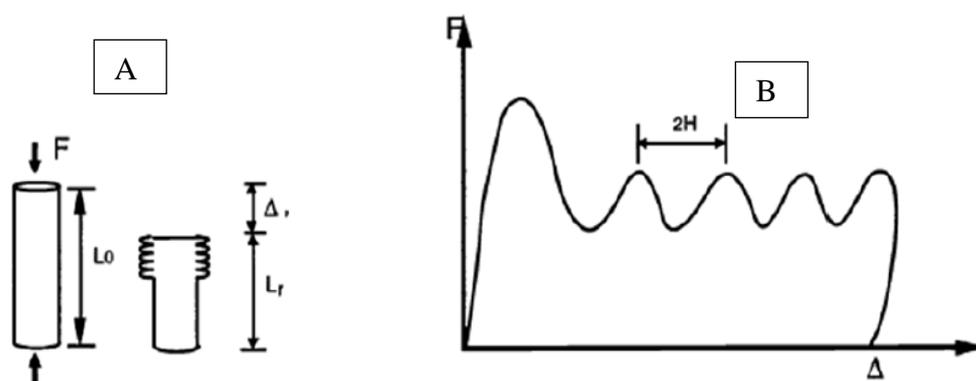
1. Introduction

Dans ce chapitre approche d'une manière générale sur les systèmes d'absorption d'énergie des structures tubulaires, ou on va transmettre quelque notion sur les systèmes l'absorption d'énergie par déformation élastique et déformation plastique, On suite différentes modes de flambage des différentes structures. Pour notre cas nous ferons attention à des structures tubulaires cylindriques à parois mince.

2. Mécanismes d'Absorption d'Énergie des matériaux métalliques :

Le processus principal d'absorption d'énergie d'un tube métallique est la formation des plis, dans lesquels le métal subit une grande déformation irréversible. Du point de vue microscopique, cette grande déformation résulte du glissement cristallin et du mouvement des dislocations. La ductilité des métaux comme les alliages d'aluminium est entièrement due à leur capacité à supporter le glissement extensif sans nucléation ni apparition de fissures. Le processus de glissement extensif devient difficile lorsque la déformation augmente. L'apparition de fissures est possible dans ce cas.

À partir de la courbe force-déplacement d'une structure soumise à une compression axiale (F), et ayant un déplacement (Δ) dans la direction de cette force, certains paramètres sont utilisés pour évaluer la performance en matière d'absorption d'énergie de cette structure. [07]



(A) tub métallique avant et après déformation

(B) Courbe force déplacement typique de compression uni-axial.

Figure I.1 : l'absorption d'énergie d'un tube métallique.[04]

Énergie absorbée :
$$E_{ads} = \int_0^{\Delta l} F d\delta$$

Force moyenne :
$$F_{moye} = \int_0^{\Delta l} F d\delta / \Delta l$$

Énergie spécifique d'absorption :
$$E_{SA} = \frac{F_{moy}}{\rho A}$$

Où :

L_0 : longueur initiale

L_f : longueur finale.

ΔL : longueur difforme.

F : la force appliquée sur le tube.

r : Masse volumique de matériaux.

A : Aire de la section orthogonale à la direction de la charge.

$2H$: la longueur d'onde d'écrasement.

3. Généralité sur les systèmes d'absorption d'énergie :

L'énergie d'un système représente sa capacité à modifier, par interaction, l'état d'un autre système. Lorsqu'un système interagit avec un autre, il y a un transfert d'énergie entre les systèmes par le travail d'une force. Un échange de chaleur. Un rayonnement. La notion d'énergie soit omniprésente, même dans la vie de tous les jours, il s'avère très difficile de la définir de façon précise. Et son unité est le joule (J).

La capacité d'absorption d'énergie d'un système donné dépend principalement de sa forme géométrique et des propriétés mécaniques du matériau composant la structure.

Suivant leur principe de fonctionnement, les systèmes d'absorption d'énergie sont repartis en deux divisions :

La première division réunit l'ensemble des systèmes dont le principe de fonctionnement est basé sur le frottement, exemple les freins et dynamos.

La deuxième division conçoit les systèmes dont l'absorption d'énergie est le résultat d'une déformation purement élastique ou élasto-plastique (Au-delà de la limite d'élasticité apparaissent des déformations plastiques) de la partie active du système utilisé. Les propriétés d'élasticité (surtout avec une limite d'élasticité élevée) dans le cas des déformations élastique

sont des critères de base, quant au choix de matériau à utiliser pour la fabrication des tel ou tel système d'absorption d'énergie.

La vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ indique un des paramètres essentiels duquel dépend le mode de déformation et donc la capacité d'absorption d'un système observé. [21]

4. Système d'absorption d'énergie par déformation élastique :

C'est le cas des ressorts par exemple - figure 02 - .Qui conservent temporairement l'énergie ressee sous l'action d'une force extérieur en se déformant de manier élastique, puis la restituent des que celle-ci cesse en reprenant leur forme initiales. On parle de system d'absorption d'énergie réversible. Pour ce type de système le module de résiliences (la résistance au choc) du matériau utilise est alors choisi comme indice de la capacité d'absorption du système considéré. On parle ainsi de système d'absorption d'énergie réversible.

Ce type de mécanisme a pour but de d'éviter la transmissibilité des chocs et des secousses aux voyageur et aux marchandises fragiles. C'est également le rôle des airbags monte sur les véhicules légers. Les élastiques utilise par les sportifs lors des sauts dans le vide, les fils ou liens d'attache, appelés communément « élastique », par dilatation longitudinale absorbe l'énergie cinétique totale acquise par le sauter en chute libre. La perche sous l'influence du poids du sportif subite un flambage élastique qui conduit a une bifurcation de l'équilibre obtenu par déformation de compression et de flexion. L'énergie ainsi accumulée est remise par modification de la perche et communiquée au perchiste en termes d'énergie cinétique en le propulsant vers le haut. [21]



Figure I.2 : Exemple d'un système d'absorption d'énergie par déformation élastique.

5. Systèmes d'absorption d'énergie par déformation plastique :

A noter que ces systèmes sont à usage unique car ils sont de nature destructive. Ils doivent être par conséquent interchangeables.

Plusieurs systèmes basés sur le principe de la déformation plastique, ils sont couramment utilisés comme moyen d'absorption d'énergie. Et ont pour la finalité prévention des dommages et leurs limitations en cas de collision de véhicule crash d'avions, accidents de trains. On appelle cela un système d'absorption d'énergie irréversible. [21]

5.1. Absorption d'énergie par déformation plastique des structures tubulaires cylindriques :

Nous élargissons en détail cette partie à notre travail, nous sommes amenés à distinguer l'absorption d'énergie par déformation plastique de structures tubulaires cylindriques.

Pour cela, divers mécanismes de dissipation d'énergie sont associés à ce type de structure. Car c'est le composant mécanique le plus employé comme système d'absorption d'énergie par déformation plastique, c'est aussi le plus ancien parmi les organes mécaniques utilisés à cet effet. En vue de sa capacité meilleure et efficacité d'absorption cette structure a l'avantage de pouvoir s'adapter à toutes les autres configurations de sollicitation.

5.2. Flambage des structures tubulaires sous chargement radial :

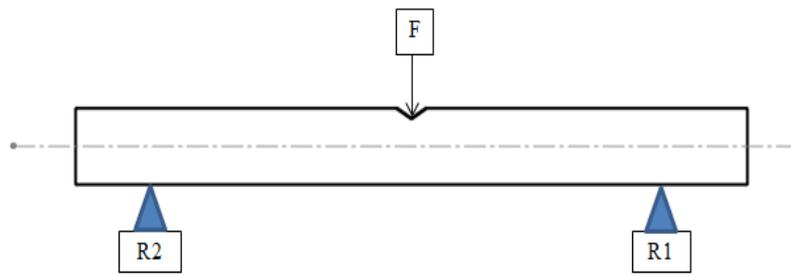
5.2.1 Structures tubulaires chargées localement :

Sous l'action d'une charge localisée, le processus de déformation plastique des tubes, en appuis simples sur leurs extrémités, se produit en trois étapes comme le montre le schéma voir la figure 3.

F : la charge appliquée sur la structure.

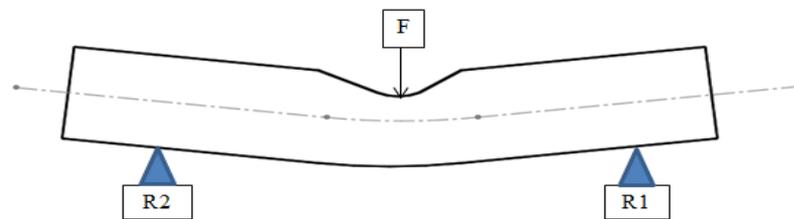
R1 et R2 deux appuis simples.

01) Le début de l'écrasement s'initie par un affaissement localisé :



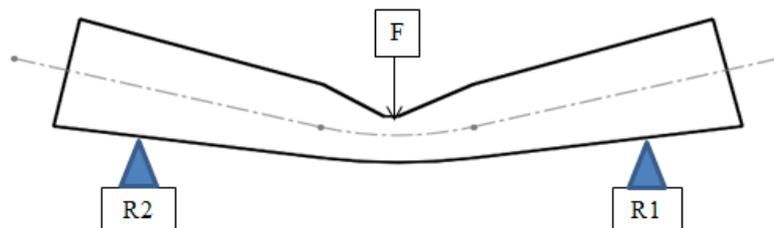
(i) : Affaissement amorcé

02) suivi d'une deuxième phase, caractérisée simultanément par un affaissement plus prononcé, accompagné d'un début de fléchissement global.



(ii) : affaissement et début de fléchissement global

03) enfin d'un effondrement de la structure par pliage total.



(iii) : Effondrement de la structure

Figure I.3 : Processus d'écrasement par chargement localisé comprenant trois phases distinctes.

5.2.2. Compression latérale des tubes :

La figure 4 montre le processus d'écrasement latéral d'un tube entre deux plateaux rigides et parallèles d'une machine de compression.

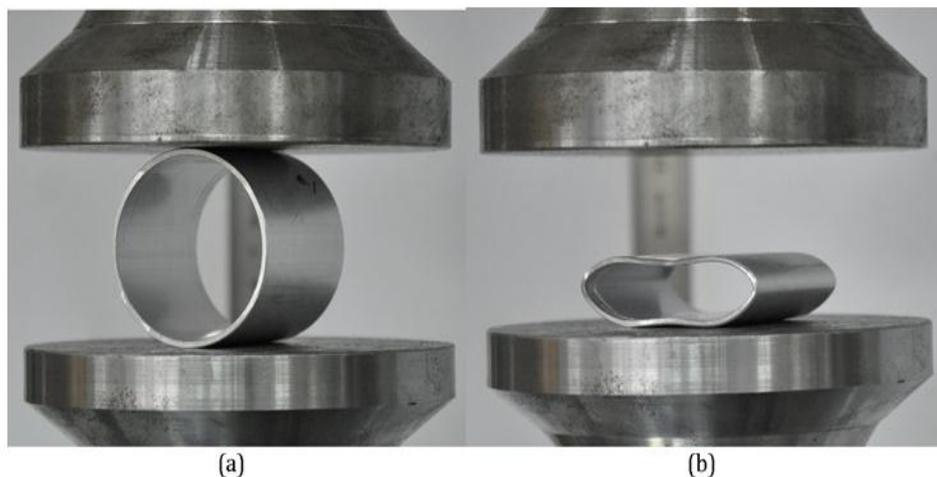


Figure 1.4 : processus de compression latérale des tubes cylindriques. (a) : le tube avant l'écrasement, (b) : le tube après l'écrasement.

Il y a lieu de noter de plus, que Johnson et Reid entre autres, ont montré de manière certain, qu'une structure tubulaire, circulaire et chargée latéralement, nécessite moins d'intensité qu'un autre tube identique et de même matériau, mais soumis à un écrasement axial ce qui sous-entend en tout évidence et une meilleure consommation d'énergie pour ce dernier type de sollicitation, d'où l'intérêt majeur accordé à ce mode de dissipation d'énergie par déformation plastique.[21]

6. Flambage sous chargement axiale des tubes :

La déformation plastique des tubes en compression axiale fournit un large éventail de mécanismes, parmi lesquels on peut citer l'inversement des tubes, aplatissement des tubes, flambage progressive des tubes,

6.1. Inversement des tubes :

Dans ce genre de système, on fait appel à des tubes à parois minces et à base de matériau ductile. Ce procédé d'écrasement, aussi bien que l'aplatissement, demande, nécessairement, l'usage d'une matrice apportée d'un profilé adéquat, le but, une fois monte

sur la machine sou déforme sous l'effet d'un effort axiale par enroulement de ses extrémité vers l'extérieur ou ver l'intérieur on parle alors d'inversion intérieur ou extérieur du tube. [21]

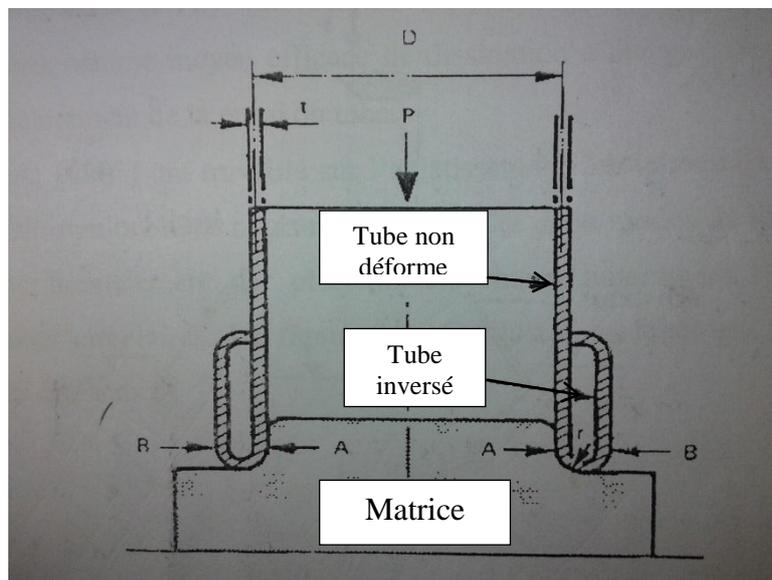


Figure I.5: processus classique d'inversement extérieur d'un tube circulaire.

6.2. Aplatissement des tubes :

Ce procédé d'écrasement est semblable à celui du flambage axial axisymétrique, Plusieurs études ont été menées sur ce mode de déformation plastique, C'est un cas particulier d'inversion de tube, survenant lorsque le rayon de courbure de la matrice est relativement important, de telle sorte que l'inversion se transforme en aplatissement avec déchirure de la paroi et suite, ou non, d'inversion.

Ce type de déformation ai été réalisé sur une maitrise, munie d'un arrondi d'un faible rayon de courbure, induit un flambage progressif, alors qu'au-delà d'une certaine valeur critique, elle provoque la déchirure de la paroi du tube et par conséquent son aplatissement. Une grande propagation de l'énergie absorbée est alors consacre au phénomène de fissuration.

On a identifié deux modes de déformation sur l'aplatissement des tubes avec ou sans inversion la figure 6 illustre parfaitement les deux versions du profile finale après écrasement.[21]

A : aplatissement avec déchirure de la paroi suite d'inversion.

B : aplatissement avec déchirure de la paroi non suite d'inversion.

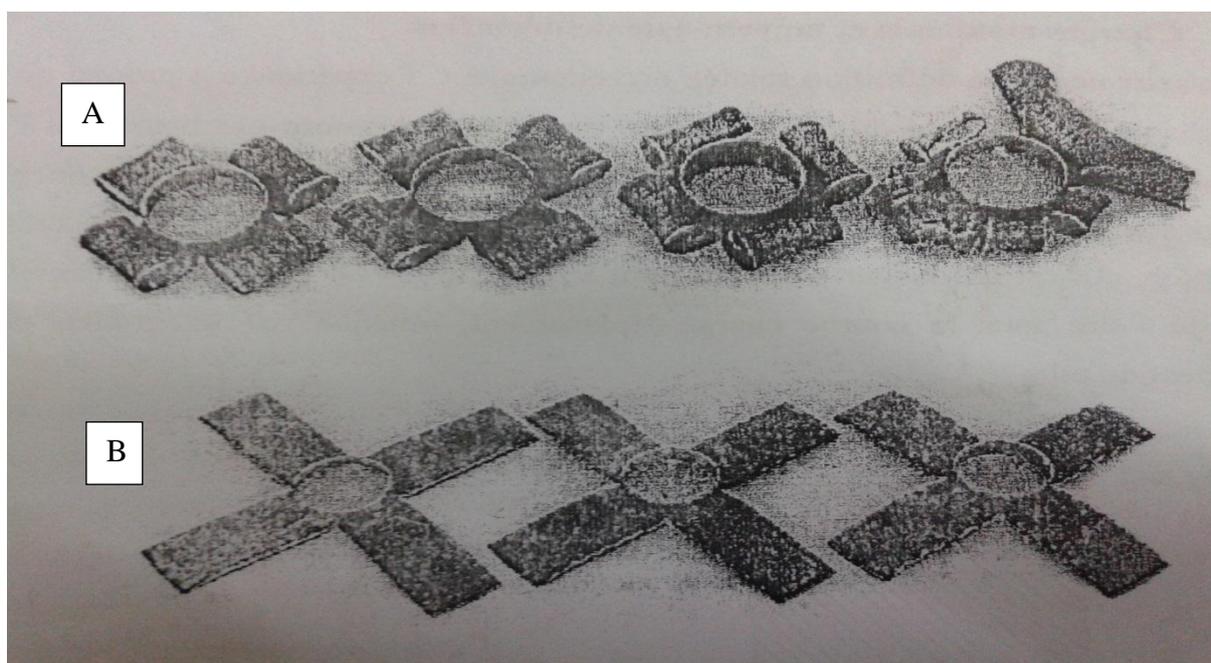


Figure I. 6: Aplatissement des tubes circulaires(A) avec inversion,(B) sans inversion sur des structures en acier.

6.3. Flambage progressif des tubes :

Le processus de flambage se caractérise par l'échange de l'énergie de membrane à l'énergie de flexion.

Une coque mince peut absorber beaucoup d'énergie de membrane sans se déformer beaucoup. Par contre, elle doit se déformer beaucoup pour absorber autant d'énergie en flexion, car la raideur de flexion est beaucoup plus faible que la raideur de membrane. [8]

Ce mécanisme d'absorption a été préféré dans le cadre des cylindres à parois mince. Sous chargement aussi bien statique que dynamique.

Les différentes études ont montré que la capacité d'absorption d'énergie des systèmes tubulaire à paroi mince, à section circulaire, constituent les meilleurs systèmes d'absorption d'énergie comparativement aux sections, carres triangulaire, hexagonale et autre. [21]

6.4. Différents Types de Flambage :

- **Le flambage global** ou de type Euler peut avoir lieu dans une structure soumise à une charge axiale. Après le flambage de la structure une perte totale de la capacité de résistance, la conclusion est négatif peu d'énergie peut être absorbée.

- Le **flambage localisé** se caractérise par la stabilisation par formation réguliers des plis ce qui donne une capacité de résistance après le flambage. Nous distinguons encore deux types de flambage localisé : instabilité par point limite et instabilité par bifurcation.[8]

Les deux derniers types sont présents dans une structure circulaire, pour mieux expliquer la chose voir la figure ci-dessous.

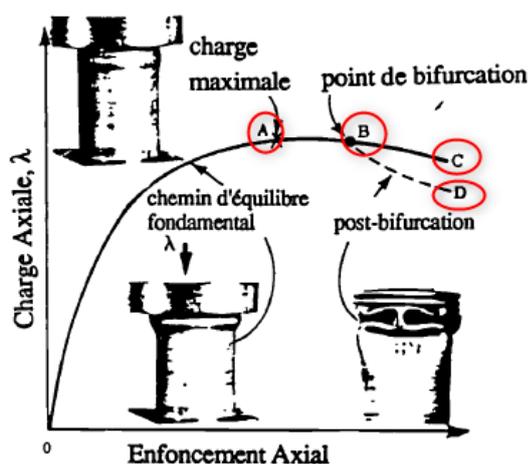


Figure I.7:(a). Types d'instabilité : 1. par point limite OABC; 2. par bifurcation.

- OABD (bifurcation après le point maximum) [8].
- OAB : Déforme suivant le chemin d'équilibre en mode axisymétrique.
- ABC : La déformation peut poursuivre le même chemin si le tube est suffisamment épais.
- ABD : le tube suit le chemin en mode de déformation non axisymétrique. dans le cas contraire.
- Dans le premier cas, il s'agit de l'instabilité par point limite.
- Quant au deuxième cas, il s'agit de l'instabilité par bifurcation, car le deuxième chemin est différent du premier.

Dans cet exemple, le point de bifurcation se situe après le point de la charge maximale A.[8].

La figure montre les modes de dégradation de la paroi constituant la structure tubulaire [6].

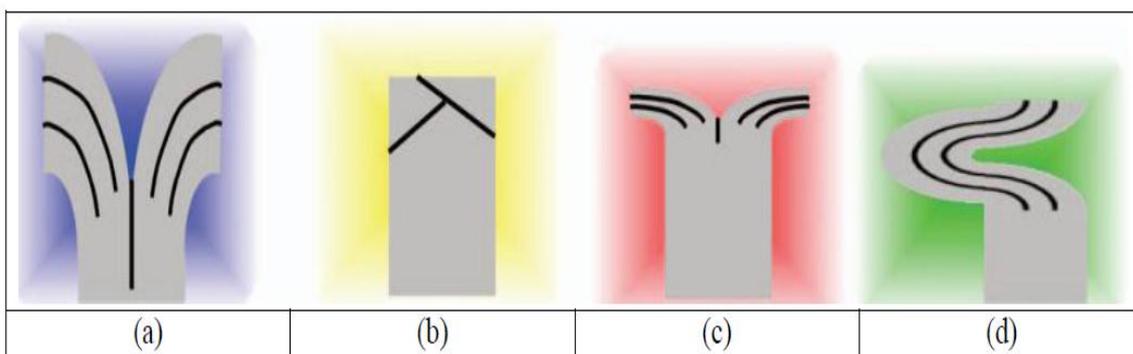


Figure 1.8: Mode de dégradation de la structure tubulaire : évasement (a), fragmentation (b), pliage (c), flambement (d).

Sous l'effet du chargement, les parois vont se rompre selon quatre modes différents :

- l'évasement qui est la séparation des plis et se rempliant sur eux-mêmes,
- la fragmentation qui est la fissuration de la résine dans les plis,
- le pliage qui est écrasement des parois,
- le flambement qui est une flexion des parois.

6.5.1. Les modes de déformation :

5.1. Deux principaux modes d'effondrement (déformation) : lorsque un tube soumise à une déformation axiale, il est normalement se déforme dans un certain mode d'écrasement, une courbe typique Force-Déplacement permet d'explique les deux modes de déformation axiale stable et instable des structures tubulaires.

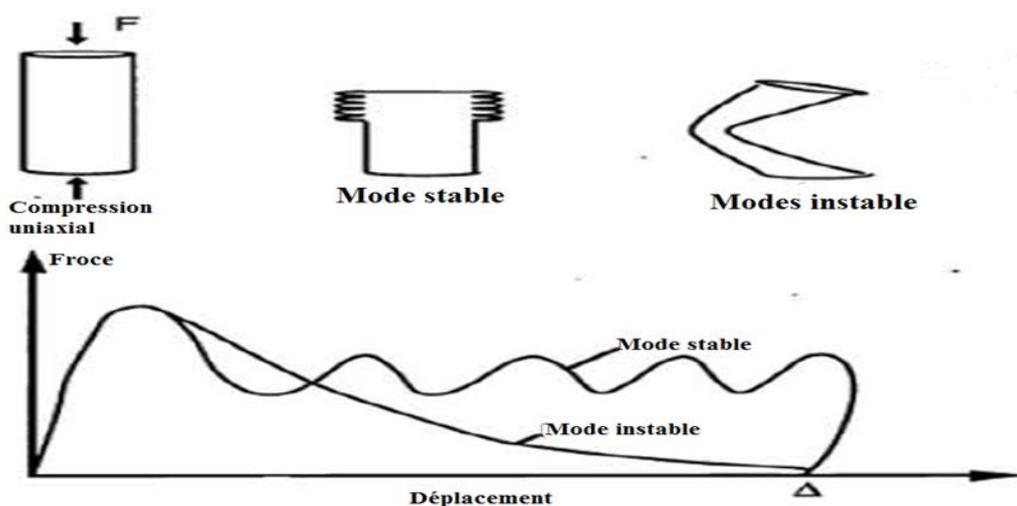


Figure 1.9: La courbe caractéristique de mode d'écrasement stable et instable.[04]

5.2. Les modes d'écrasement stable :

A) Le mode l'écrasement stable:

-**Mode axisymétrique (AM)** : Le mode de déformation stable (en accordéon, concertina). Pour mieux comprendre ce qui se passe réellement pendant la formation des plis axisymétriques, nous allons d'abord analyser le processus d'écrasement en mode axisymétrique.



Figure I. 10: le mode d'écrasement axisymétrique.

Il est caractérisé par la stabilité de l'écrasement de la structure et la discontinuité des plis. La déformation de tub a continué jusqu'à la dernière étape de l'écrasement.

La figure 7 montre une courbe typique de la force d'écrasement en fonction du déplacement

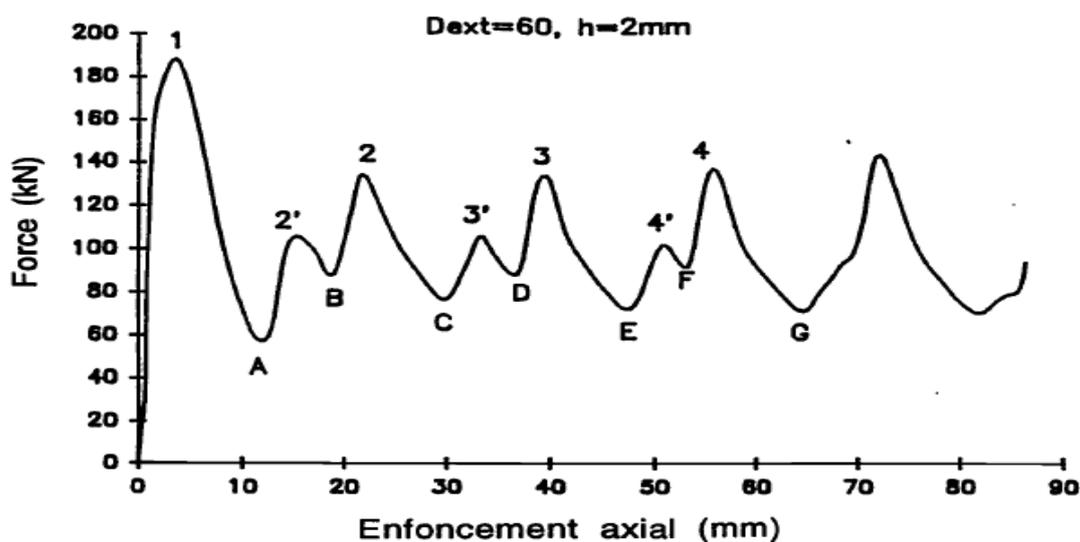


Figure I.11: Courbe typique de force - déplacement d'un tube circulaire en mode d'écrasement axisymétrique. [8]



Figure I.12: analyse du mode de déformation axisymétrique.[8]

La force d'écrasement augmente jusqu'au moment où le premier flambage apparaît (1). Ensuite, la paroi commence à fléchir vers l'extérieur, la force F chute brutalement jusqu'à la formation complète du premier pli. La force atteint sa valeur minimale (A). Du fait de l'écroutissage dans cette zone fortement déformée, la force recommence à augmenter.

La paroi au voisinage de cette zone déjà déformée a tendance à fléchir vers l'intérieur. La force augmente jusqu'au moment de l'apparition du flambage en mode de flexion interne (2'). Puis, la force commence à baisser en conduisant une flexion interne de la paroi. Après une légère flexion interne de la paroi (B), la force recommence à augmenter en accompagnant une flexion externe jusqu'au moment du 2ème flambage (2). Ensuite, la force chute à nouveau jusqu'au point (C) ... ainsi de suite.[04]

-Mode mixte (XM) : Le mode de déformation axisymétrique et non-axisymétrique. C'est un mode qui combine entre le mode le axisymétrique et celui de diamant.



Figure I.13:Le mode de déformation non-axisymétrique, mixte.

-Mode diamant (DM) : Le mode de déformation non-axisymétrique, il est caractérisé par la bifurcation des plis dans la structure. L'orientation de la déformation continue différemment puisque ces zones (plis) ne pourraient pas conduire à une discontinuité partielle dans l'échantillon.



Figure I.14: le mode de déformation non-axisymétrique en diamant.

B) Mode d'écrasement instable : ou le mode eulérien s'expose par un pliage au milieu de la structure créant suite un début de flambage progressif et affecte surtout des tubes ayant une longueur initiale absolument importante.



Figure I. 15: Le mode d'écrasement instable.

Le mode de déformation instable ou autrement dit non-axisymétrique d'une structure mince soumise à une compression axiale a toujours tendance de se fléchir, car la flexion est moins consommatrice d'énergie que la déformation en compression. C'est le phénomène du flambage d'Euler d'une poutre mince soumise à une compression axiale. La flexion interne de

la paroi entraîne une compression circonférentielle. Dans cette zone déformée, la paroi du tube est soumise à une compression axiale et circonférentielle.

La compression axiale produit une flexion axiale externe ou interne. La compression circonférentielle peut entraîner une flexion circonférentielle de la paroi et donc conduire à un mode non axisymétrique. [8]

6.4. Les principaux paramètres géométriques contrôlant ces modes sont:[7]

$$\eta (= R / e)$$

Rapport du diamètre (R)

L'épaisseur (e)

$$\lambda (= R / L)$$

Diamètre à longueur (L).

Pour $\eta < 15$. Le mode axisymétrique devient prédominant pour la plupart des matériaux d'ingénierie. Néanmoins, le mécanisme de pli en diamant (ou mixte) a tendance à se produire pour des valeurs plus grandes.

Des caractéristiques favorables à la résistance au choc pourraient être atteints lorsque le tube se déforme en mode axisymétrique, c'est-à-dire que l'énergie absorbée gagne plus de reconnaissance en mode axisymétrique que dans le diamant ou mixte. Avec η ratio, le λ le ratio peut également jouer un rôle important dans le contrôle du flux de plastique mécanisme. Peu d'enquêtes ont été menées pour déterminer l'effet de ce paramètre sur l'effondrement axial des tubes (par exemple).

À la lumière de ce fait, une nouvelle solution a été proposée pour encourager le mode axisymétrique.

6.5. Une comparaison entre les modes de déformation stable et instable :

L'aire de la courbe force-déplacement est beaucoup moins lors de l'écrasement en mode instable que lors de l'écrasement en mode stable.

Le mode d'écrasement stable se caractérise par la formation de plis progressifs pour des structures en métal. Ce qui donne une meilleure absorption d'énergie par rapport au mode instable.

Le mode d'écrasement stable se caractérise par la formation de plis progressifs pour des structures en métal.

Contrairement au mode d'écrasement stable, peu d'énergie peut être dissipée en mode d'écrasement instable.

Du point de vue de l'absorption d'énergie, il est très important d'avoir un mode d'écrasement stable.[8]

Conclusion :

Ce chapitre nous a permis en premier lieu de consolider et enrichir nos connaissances concernant les divers systèmes d'absorption d'énergie par déformation élastique ou plastique et le comportement des structures tubulaires sous chargement radiale et latérale. Et le flambage des structures sous chargement axiale et les différents mécanismes tel que l'inversement, aplatissement et flambage progressive des structures tubes et l'influences de chaque mécanisme sur l'absorption de l'énergie.

Chapitre II

Abaqus, lois de comportement
et aciers.

1. Introduction

Premièrement, Nous avons commencé par une présentation générale de logiciel de code du calcul par éléments finis ABAQUS, deuxièmement un aperçu sur le modèle de Johnson-Cook et quelque loi de comportement. Troisièmement, Caractérisation et identification des matériaux et bien précisément l'acier qu'on a étudié (E235), nous rappelons les différents traitements de surface appliquées aux aciers. Enfin on va se focaliser sur la cémentation des aciers car l'éprouvette étudiée a subi un traitement local.

2. Présentation du code de calcul par éléments finis ABAQUS [17].

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels.

ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre de choix aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

2.3. Les Logiciels sur le marché :

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont NASTRAN, CATIA, ABAQUS et SolidWorks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent les caractéristiques et de faire des calculs d'une structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec CATIA, calculer avec ABAQUS et faire du post traitement avec NASTRAN. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de commencer avec ABAQUS. [02]

2.4. Deux solveurs principaux: Le programme d'éléments finis que nous utilisons dans l'espace FEA (Final Élément Analyse) est *ABAQUS / CAE*, une interface utilisateur inspirée et similaire pour l'ensemble du système. *ABAQUS* est une suite de modules d'analyse par éléments finis. Les modules d'analyse, *ABAQUS / Standard* et *ABAQUS / Explicit*, constituent le cœur des outils d'analyse complémentaires et intégrés.

ABAQUS/CAE intègre les modules d'analyse dans un environnement *ABAQUS* complet pour la modélisation, la gestion et la surveillance de l'analyse *ABAQUS* et la visualisation des résultats. [03]

2.4.1. ABAQUS/Standard : Algorithme implicite

- Code général d'analyse par éléments finis (discrétisation spatiale)
- Résolution basée sur l'algorithme de Newton-Raphson et la méthode de Riks.
- Problèmes linéaires et non linéaires.
- Géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrique.
- Nombreuses procédures d'analyse dans le domaine temporel et fréquentiel

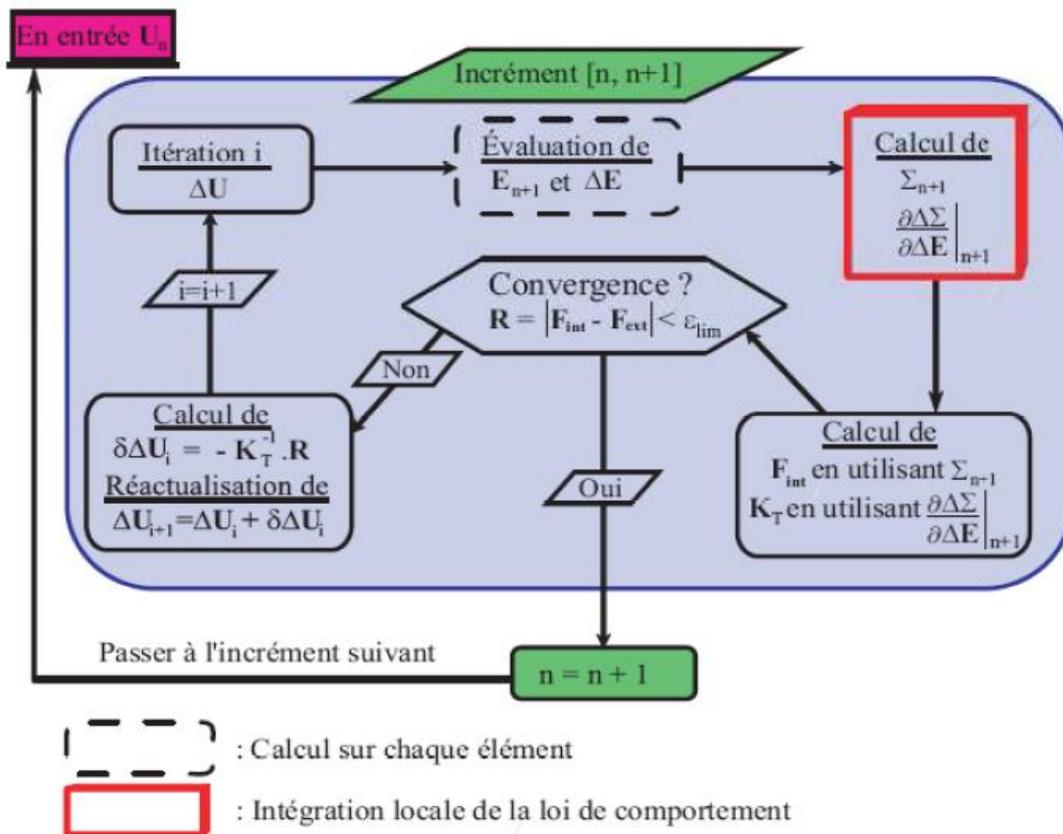


Figure II.1 : Organigramme de résolution de schéma implicite. [04]

2.4.2. ABAQUS/Explicit: algorithme « dynamique » explicite

- Analyse non linéaire (discrétisation spatiale et temporelle)
- Problème transitoire et dynamique des structures
- Résolution basée sur la méthode explicite d'intégration en temps

- Mais possibilité d'analyses quasi-statiques où il existe un comportement non linéaire important.

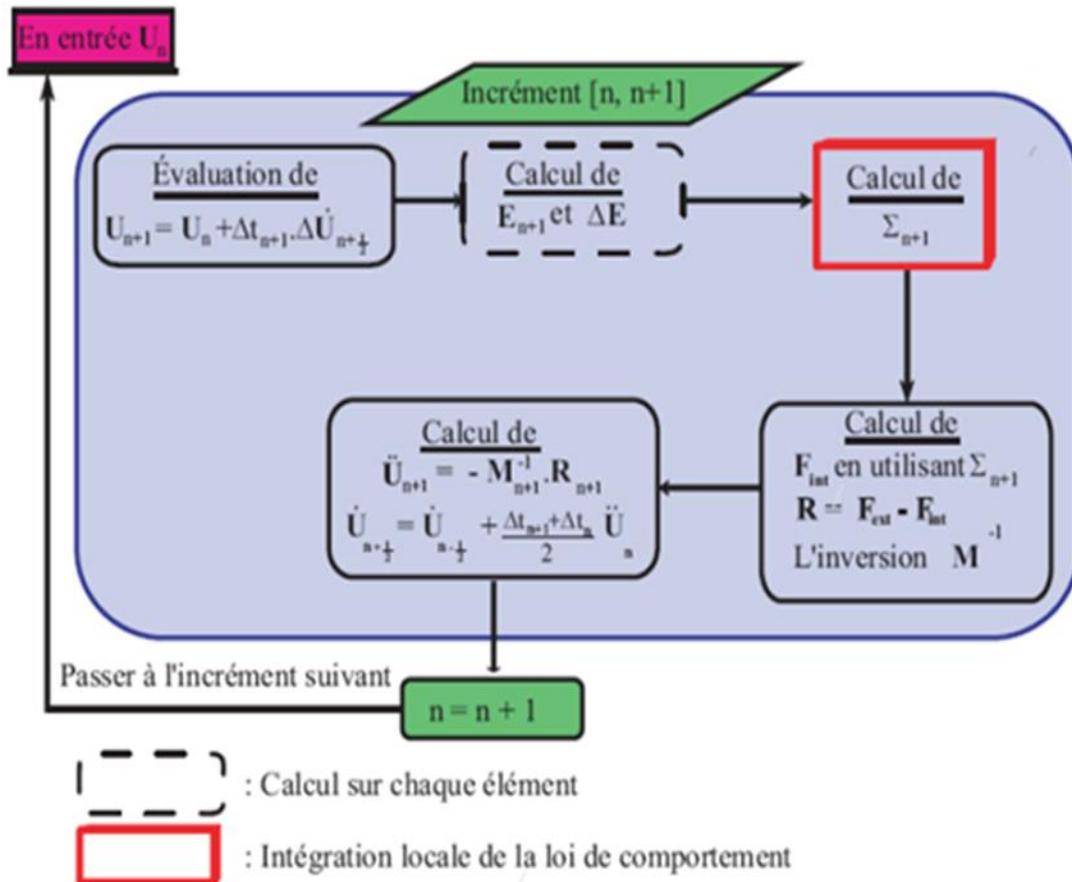


Figure II. 2 : Organigramme de résolution de schéma explicite.

2.5. Comparaison :

Le tableau présente une comparaison entre la méthode Explicit et Implicite :

EXPLICITE	IMPLICITE
⊖ Conditionnellement stable	⊕ inconditionnellement stable
⊖ pas de temps réduit	⊕ pas de temps géré par l'utilisateur
⊕ précision en Δt^2	⊕ précision en Δt^2
⊕ inversion de $[M]$, diagonale	⊖ inversion de $[M]+\alpha[K]$, non diagonale
⊕ taille mémoire réduite	⊖ taille mémoire importante
⊕ résolution élément par élément	⊖ Résolution globale, nécessite la convergence à chaque itération
⊕ robuste	⊖ pivots nuls, divergence
⊕ faible coût CPU	⊖ coût CPU important

Tableau II.1 : Inconvénients et avantages de module implicite et explicite. [04]

2.6. Présentation des différents types d'éléments Abaqus :

Le code de calcul ABAQUS dispose d'une multitude de types d'éléments qui diffèrent par leurs propriétés d'interpolation, de symétrie et leurs propriétés physiques. Ainsi, le code propose des éléments à 3D dimensions, à 2D dimensions des éléments linéaires (1D) et les connecteurs.

Le choix entre ces différentes dimensionnalités dépend de la maîtrise du problème à simuler.

Ce qui permet de tenir compte des symétries de géométrie, des chargements, des conditions aux limites et des propriétés des matériaux. [05]

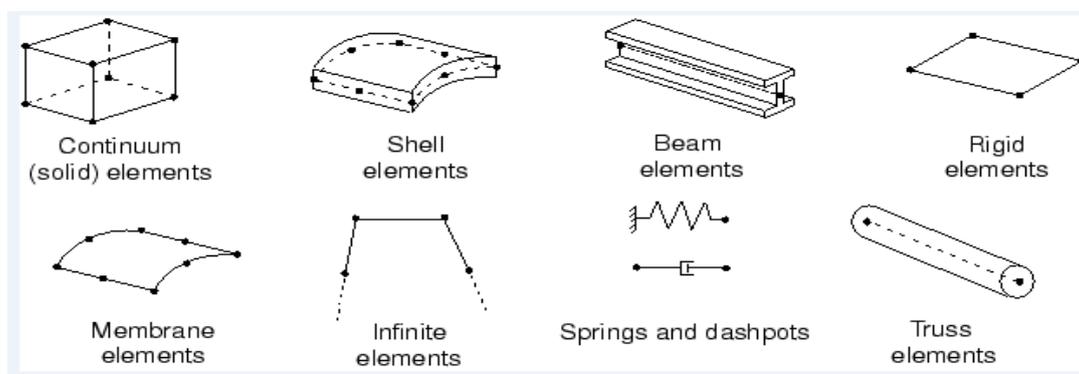


Figure II.3 : Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus.

2.7. Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS : [17] Avant de commencer à définir un modèle, vous devez choisir le système d'unités que vous utiliserez. ABAQUS n'a pas de système intégré d'unités. Toutes les données d'entrée doivent être spécifiées dans des unités cohérentes dans les résultats qui suivent le système d'unité et base sur SI (mm).

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Longueur	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Masse	kg	tonne (10 ³ kg)	slug	lbf s ² / in
Temps	s	s	s	s
Contrainte	Pa (N / m ²)	MPa (N / mm ²)	lbf / ft ²	Psi (lbf / in ²)
Energie	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Masse volumique	kg/m ³	tonne / mm ³	slug / ft ³	lbf s ² / in ⁴

Tableau II.2 : les unités dans ABAQUS. [03]

2.8. Structure d'une analyse sous Abaqus :

Abaqus n'est qu'un solveur (implicite, explicite) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier d'entrée (ou fichier de données) et qui écrit la solution vers un fichier de sortie (ou fichier de résultats).

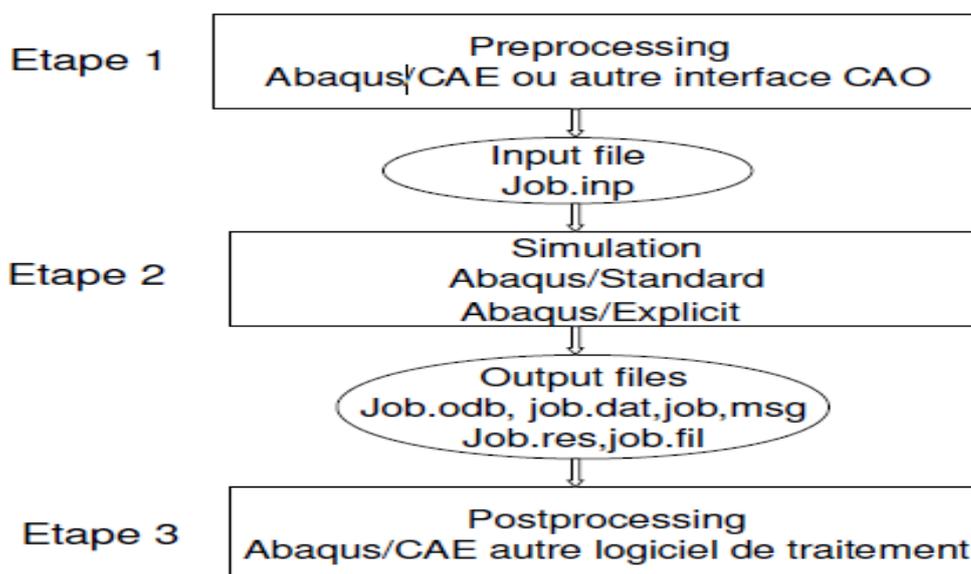


Figure II.4 : structure d'analyse sur ABAQUS.[03]

3. Lois de comportement mécanique : [10]

Les modèles décrits ici s'appliquent aux grandes déformations plastiques et aux vitesses de déformation élevées. Ils sont très utiles pour la simulation numérique dans des domaines aussi variés que l'aéronautique, l'automobile, l'industrie pétrolière et navale, les procédés d'usinage, les applications militaires ou de génie civil.

3.1 Les lois empiriques :

Les modèles empiriques sont issus directement de l'analyse phénoménologique déduite de l'exploitation de données expérimentales.

3.1.1. Le modèle LINDHOLM :

Cette loi de comportement fait intervenir la vitesse de déformation, mais pas la température. Donc elle ne permet pas de reproduire le comportement du matériau dans les conditions de sollicitation en température. Par conséquent, elle ne peut être utilisée pour la simulation de processus dynamique en raison de l'adoucissement thermique.

Ce modèle relie la contrainte σ à la déformation ε et à la vitesse de déformation. $\dot{\varepsilon}$ par la relation suivante :

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \varepsilon^n + (\sigma_2 \varepsilon + \sigma_3) \ln(\dot{\varepsilon})$$

Où :

σ_0 : la limite élastique,

σ_1 : est un paramètre matériau,

σ_2 et σ_3 : sont liées à la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation,

n : coefficient d'écrouissage.

3.1.2. Le modèle de KLOPP, CLIFTON et SHAWKI :

En plus de l'influence de la vitesse de déformation, KLOPP, CLIFTON et SHAWKI intègre l'influence de la température dans leur modèle.

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m T^{-\nu}$$

Où :

K : constante du matériau,

n : coefficient d'écrouissage,

m: coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation

v: paramètre d'adoucissement thermique.

T : température.

Ces constantes seront d'autant plus faciles à déterminer que les tests réalisés permettent de découpler les trois variables de façon indépendante.

3.1.3. Le modèle de Johnson-Cook :

Johnson et Cook proposent une loi empirique conçue à partir de résultats expérimentaux, et destinée à l'implantation rapide dans les codes de calcul.

Ce modèle inclut l'influence de la vitesse de déformation, de l'écrouissage et de la température

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

Équation

Où :

Le premier terme $[A+B \varepsilon^n]$, représente la fonction d'écrouissage,

A : contrainte d'écoulement à déformation plastique nulle (MPa).

B : relatif à la partie linéaire de l'écrouissage (MPa).

ε : Déformation plastique cumulée.

Le deuxième terme $[1+CLn(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)]$, décrit l'effet de la vitesse de déformation.

n : relatif à la partie non-linéaire de l'érouissage.

C : coefficient de sensibilité au durcissement dynamique.

$\dot{\varepsilon}$: La vitesse de déformation plastique.

$\dot{\varepsilon}_0$: La vitesse de déformation de référence.

Remarque : C étant le paramètre de sensibilité à la vitesse.

Le troisième terme $[1-(T-T_0/T_f-T_0)^m]$, représente l'effet de la température (ou adoucissement thermique).

m : coefficient de sensibilité à l'adoucissement thermique.

T_0 : température ambiante

T_f : température de fusion.

T : température de transition.

L'approche phénoménologique adoptée pour l'élaboration de ce modèle conduit à la prise en compte de façon découplée des effets de la vitesse de déformation, de la température et de l'érouissage sur la contrainte d'écoulement. C'est la loi de comportement la plus utilisée dans les codes de calcul.

Il existe de nombreux autres modèles empiriques de comportement qui ne seront pas détaillés ici. (Pour les autres modes de déformation telle que semi-physiques et Les modèles physiques sont détail dans l'annexe B)

Les modèles présentés restent simples à identifier, mais possèdent généralement le désavantage de dissocier les effets d'érouissage, de viscosité et d'adoucissement thermique.

4. Essais de caractérisation des matériaux [18]

Ces caractéristiques sont mises en évidence à partir d'un morceau de matériau, au cours d'essais pratiques sur celui-ci. Ce morceau, aux formes et dimensions généralement normalisées, est appelé éprouvette. Il est pris au hasard (dans une partie de matière à analyser).

Nous limiterons cette étude aux principaux essais mécaniques :

- Les essais de traction,
- L'essai au choc,
- L'essai de fatigue,
- Les essais permettant de mesurer la dureté.

4.1. Les essais de traction :

L'essai de traction est le plus utilisé pour la caractérisation mécanique des matériaux. Étant purement uni axial, du moins tant qu'il n'y a pas de diminution catastrophique au centre de la section de l'éprouvette (striction) il permet de se marquer des méthodes de calcul inverse pour aboutir directement à une loi de comportement uni-axiale.

Il permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la contrainte à rupture, la contrainte maximale, la limite d'élasticité, etc. nécessaires dans les calculs de structure.

Nous donnons ici tout d'abord la description générale d'une machine de traction.

01 : éprouvettes de traction plates. 02 : éprouvettes de traction cylindriques. 03 : cellule de force. 04 : les mors. 05 : system hydraulique.

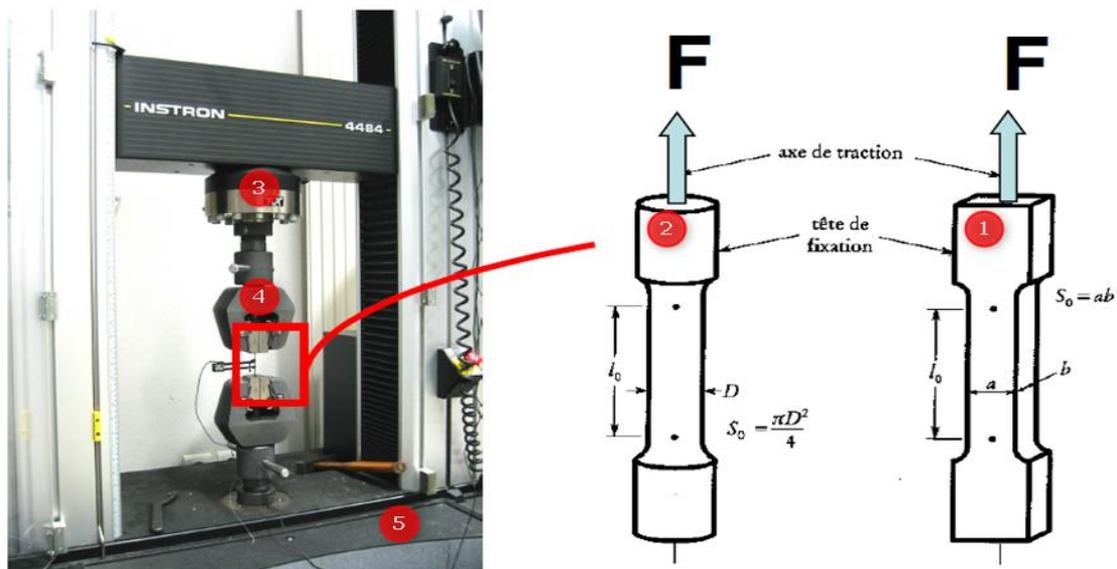


Figure II.5 : exemple de dispositif de traction et éprouvettes de traction plates et cylindriques.

La figure II-6- ci-dessous le diagramme conventionnel de traction présente en abscisses et en ordonnées, En enregistrant la force appliquée à l'éprouvette par la machine de traction et son allongement progressif on obtient un diagramme Effort(N) et Allongement (%).

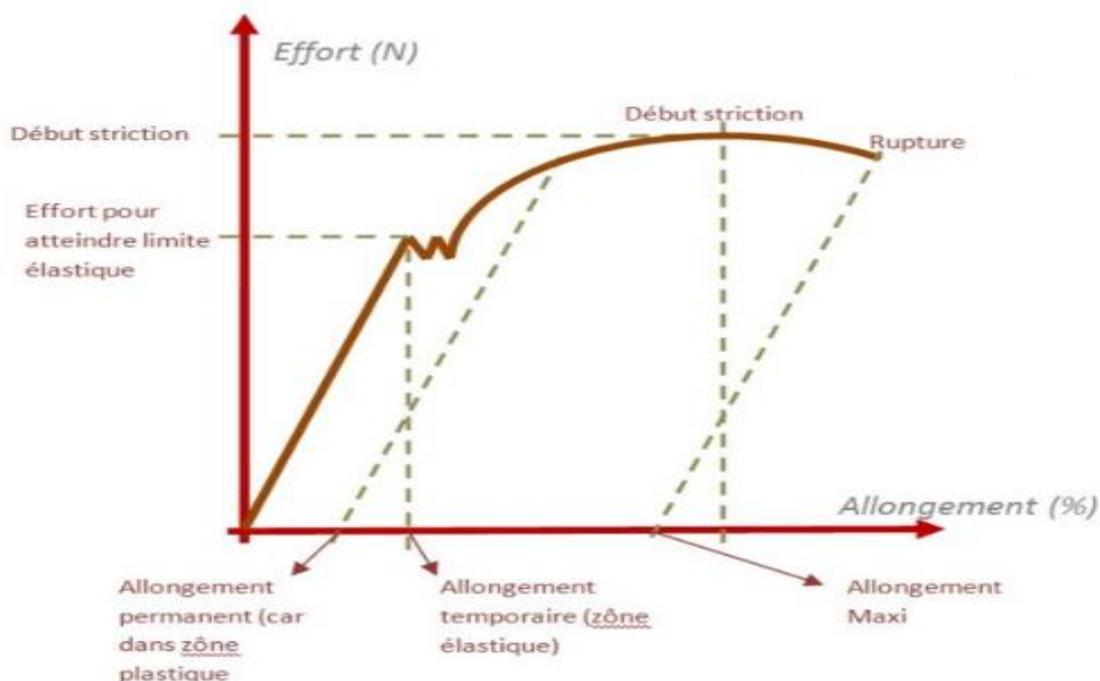


Figure II. 6 : Diagramme conventionnel de traction simple.

4.2. L'essai au choc : Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) éprouvette Charpy sous l'impact d'un "mouton-pendule".

On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (en J/cm²)).

Cet essai permet également d'accéder au taux de rupture fragile (cristallinité - évalué par l'opérateur ou par analyse d'images) ou à l'expansion latérale des éprouvettes suite à la rupture.

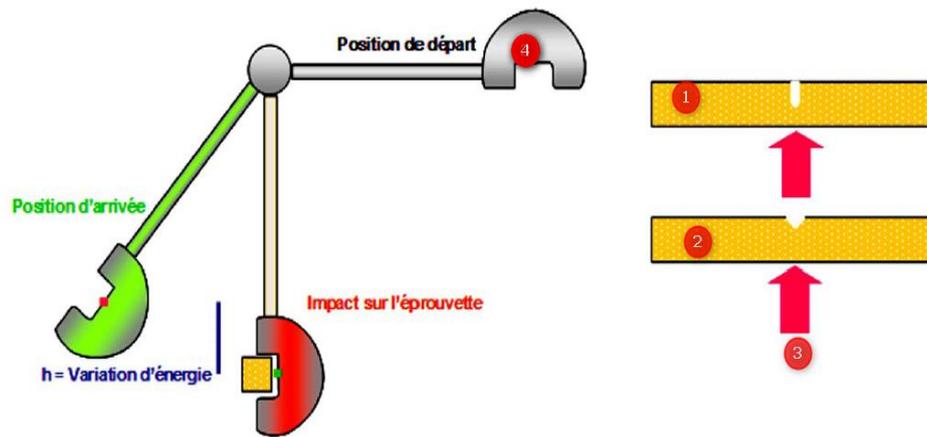


Figure II.7 : Principe de l'essai de résilience utilisant un mouton-Charpy. [20]

-1) éprouvette avec rainure on U. - 2) éprouvette avec rainure on V. -03) couteau impact sur l'éprouvette -4) mouton-pendule.

4.3. Essais de dureté :[21] La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau on donne quelques échèles :

- La dureté Brinell
- La dureté Vickers
- La dureté Rockwell B et C

Les essais d'indentation évaluent la "dureté" du matériau en mesurant mesurent la pression de contact pendant l'enfoncement d'un indenteur (pyramidal, conique ou sphérique).

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau.

Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

4.3.1. Mesure de la surface : La dureté est donnée en méga-pascal (MPa) puisqu'elle est le rapport d'une force en Newton (N) sur une surface calculée en millimètres carrés (mm²).

A) La dureté Brinell (HB): L'essai Brinell utilise comme poinçon une bille en acier trempé ou en carbure de tungstène de 10 mm de diamètre (D). Il s'applique aux métaux "peu durs".

La pression est maintenue pendant 15 à 30 s selon le métal.

$$HB = 2F / \pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

F : charge appliquée.

d : le diamètre de l'empreinte en millimètres.

D : diamètre de la bille.

La norme Brinell de dureté a été éditée dès 1924

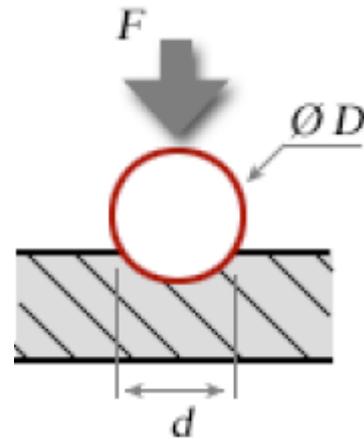


Figure II.8 : Principe de l'essai de dureté BRINELL.

B) La dureté VICKERS (HV) : Elle est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur sous une charge donnée durant 15 secondes.

L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de 136°.

F : La charge appliquée.

La mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope.

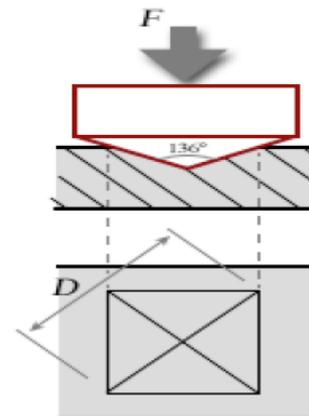


Figure II.9 : principe de l'essai de dureté VICKERS.

La dureté Vickers (HV) est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = 1.854 * F / D^2$$

Où :

F : est la charge appliquée en N :

D : la diagonale de l'empreinte en millimètres.

H : La profondeur de pénétration est $H = D / 7$.

Cet essai est appliqué principalement aux métaux, mais peut l'être également appliqué aux céramiques avec de très faibles charges.

La norme de dureté Vickers a été adoptée en 1952 et celle de micro-dureté, en 1969.

4.3.2. Mesure de profondeur :

- **Dureté Rockwell** : mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (**HRB**) ou d'un cône de diamant de 120° , dureté Rockwell C (**HRC**).

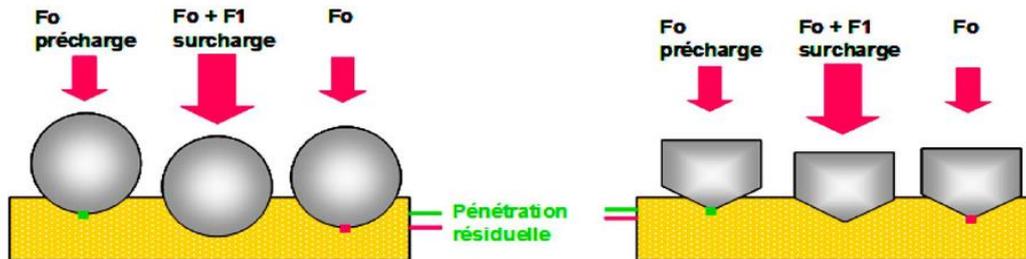


Figure II.10 : Principe de l'essai de dureté ROCKWELL (B) et ROCKWELL (C).

La norme de dureté Rockwell date de 1932.

L'essai consiste à appliquer une pré-charge de F_0 (N) sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur P_0 . On applique une force supplémentaire $F_0 + F_1$, pendant 3 à 8 s, le cône s'enfonce d'une profondeur P_1 . On supprime la force F_1 , le cône reste enfoncé d'une profondeur P_2 .

La profondeur rémanente ($P_2 - P_0$) permet le calcul de la dureté selon la formule : Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué.

- ROCKWELL C (HRC) :

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique ($\varnothing 0,2$ mm).

- ROCKWELL B (HRB) :

Le pénétrateur est une bille d'acier de 1,59 mm de diamètre.

F : La charge(N)

Remarque : Le résultat obtenu à la dimension d'une pression, mais s'exprime dans une unité liée à la géométrie de l'indenteur qui s'écrit : H (pour hardness dureté en anglais) suivi d'un caractère indiquant le type d'indenteur utilisé (V pour Vickers (tête pyramidale) ou B pour Brinell (tête sphérique)).

La dureté est calculée soit après l'essai, par mesure de la surface de l'empreinte soit pendant l'essai, par mesure de l'enfoncement de l'indenteur.

4.4. Essais mécaniques uni-axiaux [19]:

La détermination des lois de comportement des matériaux sur une plage de vitesses importante implique d'utiliser des techniques variées, avec des précautions propres à chacune d'entre elles.

Les résultats sont d'exploitation plus ou moins facile, et l'on séparera les essais quasi-statiques des essais dynamiques. Les premiers permettent, par leur caractère uni-axial, une exploitation relativement directe des résultats, alors que les seconds, qui impliquent des vitesses de déformation élevées, imposeront une modélisation qui prend en compte la propagation des ondes élastiques dans les matériaux et pourront imposer l'utilisation des éléments finis afin d'être "proprement" compris.

5. Les aciers et traitements thermiques :

5.1. Les aciers :

L'acier peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier.

5.1.1. On parle d'acier allié : Si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier.

Aciers faiblement alliés : Ce sont des aciers dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%.

Aciers fortement alliés : Dans ces aciers, au moins un élément d'addition atteint la teneur supérieure ou égale à 5%.

5.1.2. On parle d'acier non allié : Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, 0.5%. Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus exprimé sur les propriétés de l'acier.

5.1.3. Propriétés des aciers : Les propriétés essentielles de l'acier sont de grandes formabilité et durabilité, de bonnes contraintes de traction et limite d'élasticité, une bonne conductivité thermique, et pour les aciers inoxydables une résistance à la corrosion.

A). Propriétés physiques de l'acier : sont caractérisés par la couleur, la masse spécifique, le point de fusion, la conductibilité et le coefficient thermique de dilatation.

B). Propriétés mécaniques de l'acier: sont caractérisés par la résistance, la dureté, la résilience, la fatigue et le fluage.

5.1.4 Généralité sur l'acier doux :(Aciers non alliés d'usage général)

Cet acier comporte généralement moins de 0,25 % de carbone et une quantité négligeable d'éléments d'alliage. L'acier doux est la forme la plus courante car son prix est aussi le moins cher des matériaux perforés. Le matériau présente des propriétés tolérables avec de nombreuses applications. Le matériau présente une bonne soudabilité, et il est utilisé dans la plupart des applications de fabrication générale et structurelles en acier. Les propriétés mécaniques, la qualité et le coût varient suivant le procédé de fabrication utilisé. L'acier doux est produit en bobine ou en tôle par laminage à chaud ou à froid afin d'obtenir l'épaisseur souhaitée.

5.1.5. Classification des aciers selon leur composition chimique [22]:

D'après la composition chimique, les aciers sont divisés en acier au carbone et aciers alliés.

Qualité	C (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)	lim. Rupt. (MPa)	allong. (%)
extra-doux	0,15	0,4	0,04	0,03	0,02	400	30
doux	0,25	0,4	0,04 0,06	0,03 0,10	0,02 0,03	500	25
mi-doux	0,35	0,4	0,06	0,15	0,03	600	20
mi-dur	0,45	0,5	0,06	0,20	0,03	700	15
dur	0,55	0,6	0,06	0,25	0,03	800	10
extra-dur	0,65	0,7	0,06	0,3	0,03	900	5

Tableau II.3 : la composition chimique des aciers.

5.1.6. La désignation : Pour ces aciers de construction, leurs appellations comportent la lettre qui désigne leur usage commence par la lettre « S » pour les aciers d'usage général et par la lettre « E » pour les aciers de construction mécanique. Le nombre qui suit indique la valeur minimale de limite élastique en Méga Pascals.

Exemples :

S235 (acier d'usage général, de limite élastique 235MPa)

E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa)

S'il s'agit d'un acier moulé, la désignation est précédée de la lettre « G ».

Les lettre (S, E) représentant la classe, suivie de la limite élastique à la traction en MPa et d'indications complémentaires (S : soudable ; M : moulable ; TS : trempe superficielle).[05]

5.1.7. La norme suivie : Tableau ci-dessous montre la norme de l'acier E235

NF EN	Nuances FN EN	soudure	AFNOR NFA	Secteur d'application	Définition domaine d'emploi	Nuance NFA
10297-1	E235 E235 (E275) E355 (E315) E410	Sans soudure	49311	Mécanique	Tubes sans soudure pour usage mécanique	TU37b TU52b TU20MV6

Tableau II.4: la norme de l'acier E235 est indiqué dans le tableau.

5.1.8. Caractéristique mécanique de l'acier E235 :

Dans le tableau ci-dessous une présentation des caractéristique mécanique de l'acier doux E235 selon la variation les épaisseurs.

Épaisseur mm	R MPa	Re MPa	A %
e ≤ 16	360-470	≥ 235	26
16 < e ≤ 40	360-470	≥ 225	26
40 < e ≤ 65	360-470	≥ 215	25

Tableau II.5 : les Caractéristiques mécaniques du matériau de référence.

❖ **Autres appellations** : Européennes (NF EN/EN) : E 235 / S 235 JRH

5.2. Les traitements thermiques. [14]

Les techniques de traitements thermiques sont variées. Elles consistent en une succession de chauffages et de refroidissements, dont les cycles et les températures sont contrôlés avec précision.

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. (Figure)

Le but étant d'améliorer les caractéristiques des matériaux (résistance à la rupture, augmentation de la limite d'élasticité, dureté) pour une meilleure adaptation aux conditions en service.

5.2.1. Les principaux traitements thermiques sont :

A) **Le recuit** : il se pratique avec un chauffage, un maintien en température et un refroidissement suffisamment lent, pour éviter la formation de constituants de trempe.

B) **La trempe** : elle consiste en un chauffage et un maintien à une température appropriée, suivi d'un refroidissement suffisamment rapide pour laisser subsister une structure qui n'existe normalement pas à l'équilibre à la température ambiante.

C) **Le revenu** : il ne s'applique qu'aux pièces durcies par trempe et doit être pratiqué aussitôt après la trempe. Il sert à relaxer les contraintes créées par trempe en augmentant la résilience et en diminuant la limite d'élasticité.

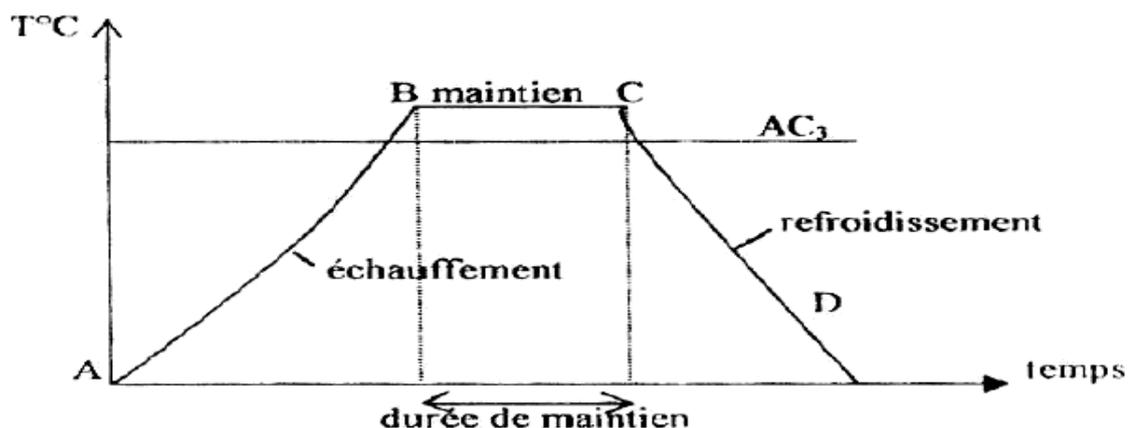


Figure II.11 : Le procédé de traitement thermique.

AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC₃).

BC : Maintient à une température définie.

CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :

- lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).

5.2.2. Le but de traitement thermique [15]:

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e ,

A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.

- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subits une déformation plastique à froid (emboutissage).

Remarque : Les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité.

Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux.

En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage. [15]

Le tableau ci-dessous regroupe les différentes catégories de traitements rencontrés dans l'industrie automobile et aéronautique :

Type de traitement	Origines principales des contraintes	Dénomination des traitements
Mécanique	Déformation plastique locale	Sablage, grenailage, martelage, galetage, polissage...
Thermique	Dilatation différentielle et Transformation de phase	Trempe superficielle
Thermochimique	Diffusion, dilation différentielle et transformation de phase, précipitation	Cémentation, nitruration, carbonituration....

Tableau II.6 : Différents traitements de surface [16].

5.2.3. Traitements thermochimiques [14]:

Un traitement thermochimique est un traitement thermique effectué dans un milieu particulier. Ce milieu a pour fonction d'apporter un ou plusieurs éléments chimiques, qui vont enrichir la surface du matériau et diffuser jusqu'à une certaine profondeur.

Ce traitement donne à la pièce des propriétés superficielles nouvelles (par exemple : augmentation de la résistance au grippage, à l'usure, à la corrosion et de la tenue en fatigue).

Les traitements thermochimiques des aciers sont employés dans le but d'améliorer leurs propriétés surfaciques. [12]

Le mécanisme essentiel est la distribution d'une ou plusieurs espèces chimiques dans l'acier à une température généralement élevée.

Dans certains cas, le processus est suivi d'une trempe et d'un revenu alors qu'il exige seulement un refroidissement à l'air dans d'autres cas. L'espèce propageant peut être le carbone, l'azote ou le bore, ainsi les processus sont nommés cémentation, carbonituration, nitruration.

Ces traitements de surfaces ont une grande importance industrielle parce que les propriétés mécaniques et chimiques des couches extérieures des pièces traitées peuvent être améliorées. Selon le processus choisi, la surface traitée présentera une résistance à l'usure et à la corrosion améliorée avec une dureté élevée.

5.2.4 Les principaux traitements thermochimiques : pour nous on précise la cémentation.

A) La carbonituration : Traitement thermique de diffusion de carbone et d'azote, suivi d'un durcissement par trempe.

B) La nitruration : Traitement ayant pour but de durcir les matériaux ferreux par la diffusion d'azote à une température inférieure aux points de transformation de l'acier.

C) La cémentation : Traitement thermochimique auquel est soumis un produit ferreux porté à l'état austénitique pour obtenir un enrichissement superficiel en carbone.

Les températures de refroidissement peuvent descendre à -80 °C après arrêt à la température ambiante (traitement de stabilisation de l'austénite par le froid). Les chauffages peuvent être effectués en milieu solide, liquide ou gazeux.

La cémentation peut être réalisée :

- dans un bain de sels actifs
- sous atmosphère contrôlée
- en caisse à l'aide d'un ciment solide
- sous vide (basse pression), assistée ou non par plasma.

Après cette phase, les pièces sont durcies par trempe dans un fluide adapté à l'acier.

5.2.5. Autres traitements : [13]

A) La cyanuration : Augmentation de la teneur en azote et en carbone en plongeant la pièce dans un bain de cyanure de sodium. Il faut ensuite assurer une trempe.

B) La sulfinisation : C'est une cémentation par le soufre. Il n'y a pas d'accroissement de dureté, mais le soufre confère à la pièce traitée une haute résistance à l'usure.

5.2.6. L'objectif de la cémentation :

L'objectif de la cémentation est d'augmenter la teneur en carbone de la partie superficielle d'une pièce en acier à moins de 0,2% de carbone afin de pouvoir lui faire subir une trempe.

Conclusion

À la fin de ce chapitre on a admet d'une manière brève d'acquérir des connaissances et des notions générales sur le code de calcule ABAQUS, et l'introduction des lois de comportement et bien précisément le modèle empirique JOHNSON-COOK. Et connaitre les aciers et leurs principales propriétés mécaniques, ainsi que leur caractérisation mécanique. Et également le traitement thermique des aciers qui jouer un grand rôle sur le changement des propretés mécaniques des matériaux.

La connaissance de la structure et du comportement des aciers au cours de leur utilisation dans plusieurs domaines reste dominatrice et pour cette raison l'acier joue un rôle très important dans la vie quotidienne des hommes. Il est à l'origine de tous les changements scientifiques et industrie.

Chapitre III

Modélisation numérique

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique de comportement mécanique des tubes en acier doux sous chargement de compression uni-axial. La première section est dédiée à la construction du modèle de calcul sous le logiciel de simulation par éléments finis ABAQUS. Nous aborderons ensuite le calibrage des paramètres matériau de la loi de comportement Johnson-Cook utilisée dans cette étude. Enfin, nous présentons les résultats obtenus dans les deux cas : tube non traité et traité. Une comparaison avec les résultats expérimentaux est donnée à la fin du chapitre.

2. Construction du modèle sous Abaqus CAE

Nous allons décrire toutes les étapes nécessaires à la modélisation d'un tube en acier doux (on représente un quart de cercle) avec ABAQUS. Pour résoudre un problème sur Abaqus il faut passer successivement sur des étapes obligatoires ci-dessous.

2.1 Modules d'ABAQUS/CAE :

Abaqus/CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation [01] :

✓ Le module « PART » :

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

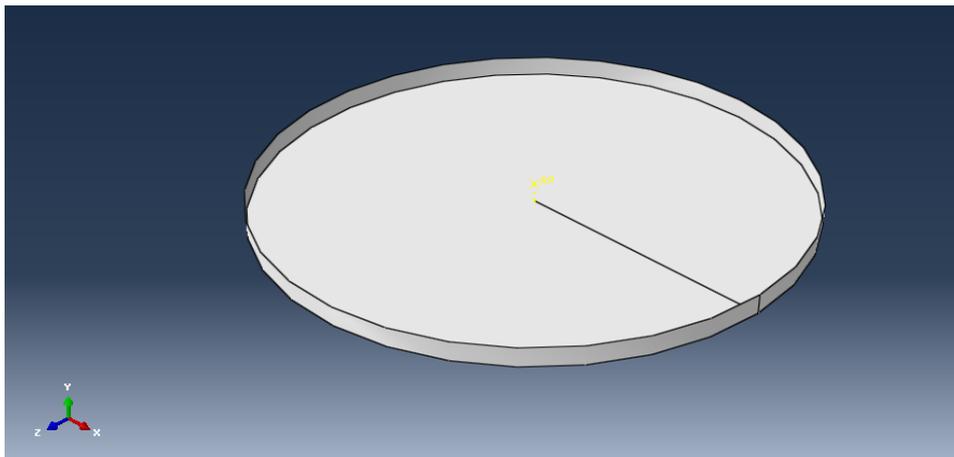


Figure III.1 : le corps rigide indéformable.(la partie supérieur).

✓ Le module « PROPERTY » :

Définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

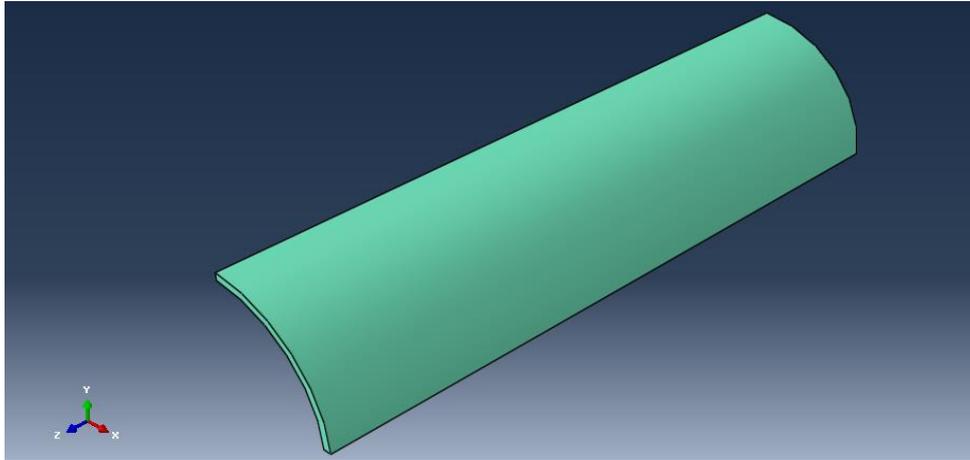


Figure III.2 : éprouvette on acier déformable. (L'éprouvette a un quart de cercle).

✓ Le module « ASSEMBLY » :

Assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

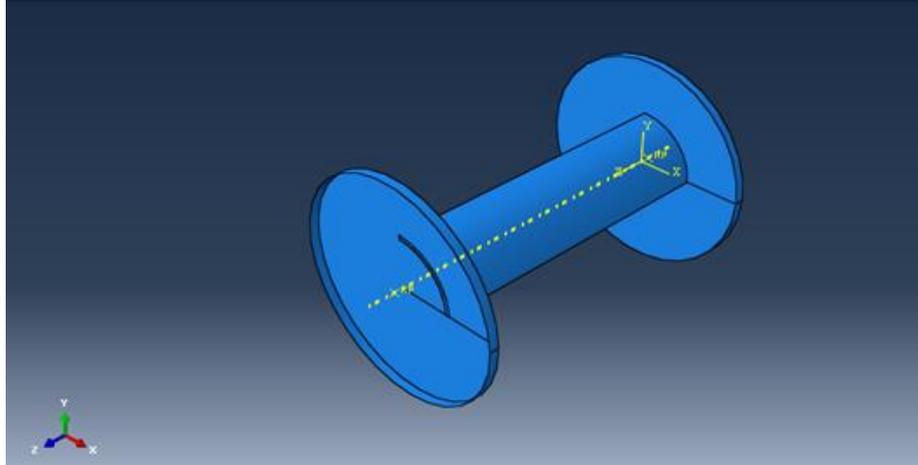


Figure III.3 : assemblage des éléments,(éprouvette et les du corps rigide).

✓ Le module « STEP » :

Définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

✓ Le module « INTERACTION » :

Il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

✓ Le module « LOAD » :

Nous permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

✓ Le module « MESH » :

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

Remarque: il est préférable de mailler seulement le corps déformable séparément. Car les deux parties (corps rigide) ne se déforment pas.

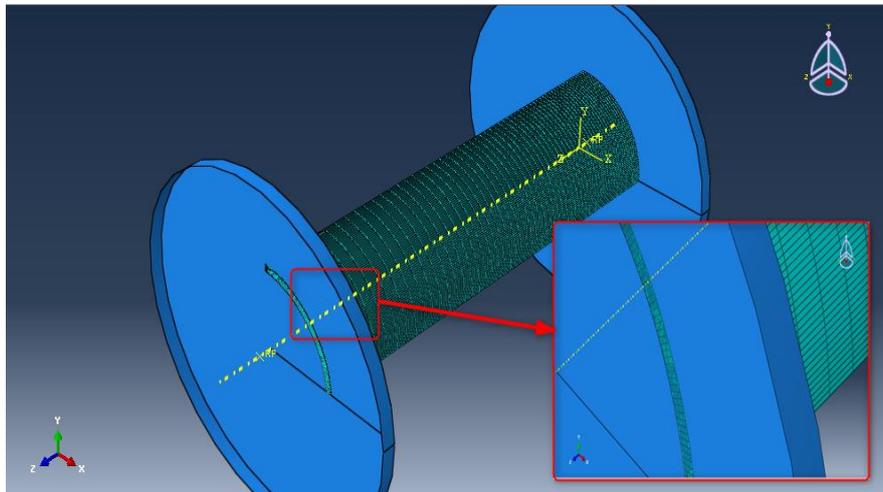


Figure III.4 : le maillage de la structure tubulaire, Maillage raffiné.

✓ Le module « JOB » :

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

✓ Le module « VISUALIZATION » :

Ce module permet de visualiser les résultats de modèle obtenu, les courbes de charges, les déformations.

Une comparaison entre les résultats numérique et expérimental est présente dans la partie prochaine.

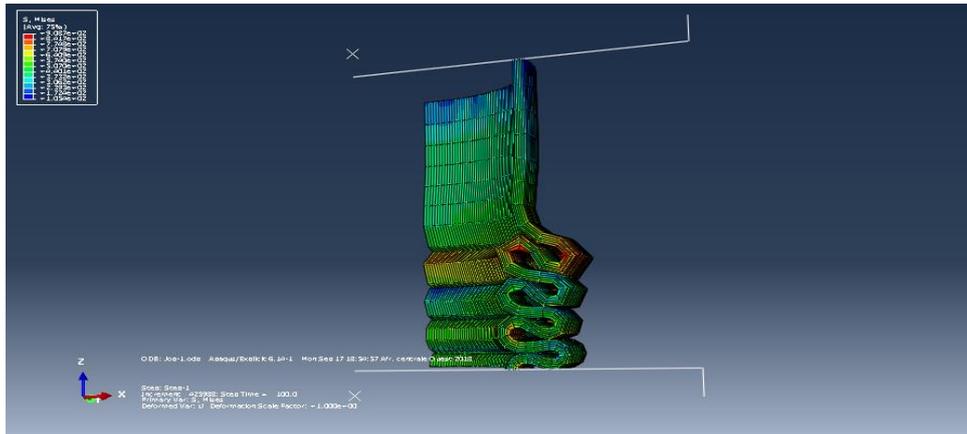


Figure III. 5 : visualisation de la structure après déformation.

2.2 Introduction des zones traitées :

La figure ci-dessous montre les zones cémentées (01). Dans ce cas l'éprouvette est à deux bandes (deux anneaux).

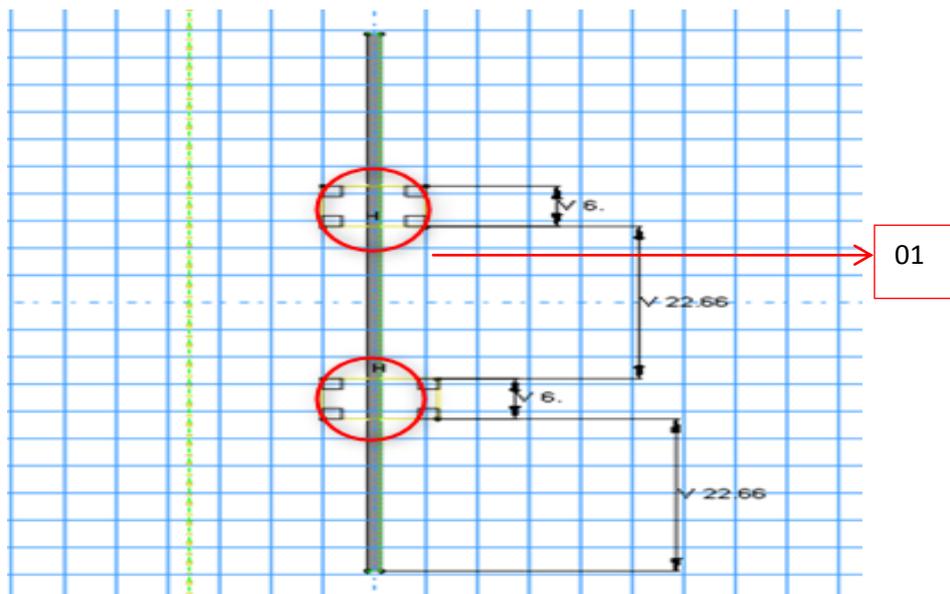


Figure III.6 : Tubes après leur protection, montrant des zones ciblées cémentées.

Dans ce cas, nous modéliserons le tube comme un bi-matériau constitué d'une partie non traitée et d'une partie traitées (2 anneaux). Chacune des deux parties possèdera donc des propriétés matériau différentes. par un souci de simplicité, nous considérerons la même loi de comportement (Johnson-Cook) avec des paramètres matériaux différents.

3. Identification des paramètres matériau de la loi de Johnson-Cook :

Plusieurs relations constitutives sont disponibles dans la littérature pour modéliser l'écoulement plastique des matériaux métalliques sous chargement d'impact (en quasi-statique et dynamique). Dans cette étude, nous adoptons le modèle de Johnson-Cook. Ce modèle s'applique aux grandes déformations plastiques et aux vitesses de déformation élevées. En effet la loi de Johnson et Cook est destinée au calcul de structure sous chargements quasi-statique et dynamique. Cependant une identification des paramètres matériau est nécessaire.

Nous rappelons l'écriture générale de cette loi :

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

Le cas quasi-statique isotherme est obtenu en posant le coefficient de sensibilité au durcissement dynamique $C=0$ et le coefficient de sensibilité à l'adoucissement thermique $m=0$.

La détermination des autres paramètres matériaux A, B et n s'effectue en calibrant par rapport à des résultats expérimentaux après étude de la convergence du maillage.

4. Description des géométries et des conditions de simulation

Nous abordons dans cette partie l'aspect numérique de notre travail, elle porte sur le comportement mécanique des tubes en acier doux E235 de section circulaire soumis à un chargement de compression uni-axial (écrasement) en régime quasi-statique.

4.1. Dimensions des éprouvettes utilisées [Ahmed Ali]:

Les dimensions de l'éprouvette tubulaire sont illustrées dans la figure ci-dessous.

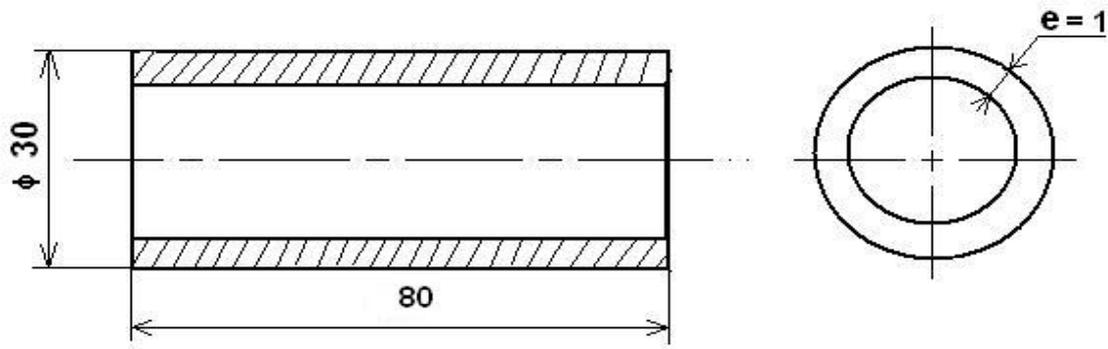


Figure III. 7 : structure tubulaire circulaire en acier doux E235 non traité.

L'évolution de la force d'écrasement de cette éprouvette tubulaire en fonction du déplacement de l'impacteur obtenue expérimentalement est donnée sur la figure ci-dessous.[AHMED ALI]

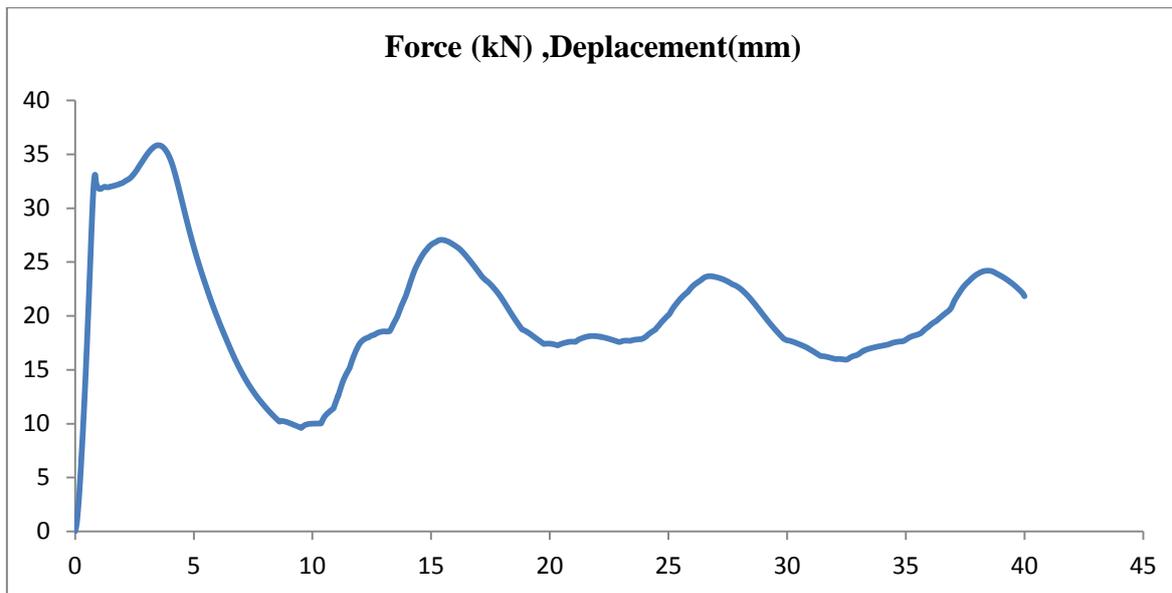


Figure III.8 : courbe expérimentale de l'éprouvette non traitée sous chargement quasi-statique [Ahmed Ali].

Les éprouvettes partiellement traitées ont les mêmes dimensions. Cependant, des zones bien précises ont subies des traitements de trempe comme l'indique la figure ci-dessous.[AHMED ALI]

e: Largeur de la surface traitée.

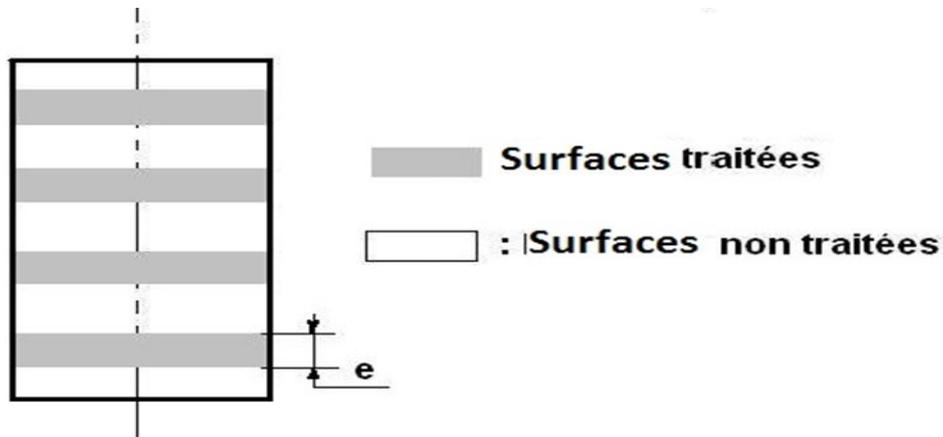


Figure III.9 : Forme géométrique cémentée dans ce cas l'épaisseur des bandes égale à 6 mm.

Le tableau ci-dessous récapitule les configurations réalisées expérimentalement [AHMED ALI]

Géométrie des bandes	variantes	Largeur des bandes (mm)
Bandes circulaires ou anneaux (A)	2 anneaux (2A)	6
	3 anneaux (3A)	4
	4 anneaux (4A)	3
	5 anneaux (5A)	2,4

Tableau III.1 : variation des bandes ou anneaux. (A).

Ce Type traitement nécessite un équipement spécifique, cette opération a donc été dans une société française (BODYCOTE) spécialisée dans les technologies avancées traitements thermiques. Pour étudier l'effet de la fraction volumique carburée, seuls 15% de la surface du tube externe est traitée. C'était un choix plutôt aléatoire dont le but principal est de

créer les deux phases en alternance entre zones relativement molles et dures pour maximiser l'énergie absorbée pendant le flambement en plastique [7].

5. Résultats et interprétations :

5.1. Étude paramétrique - Identification des paramètres du modèle :

La première étape de cette étude consiste à identifier les paramètres de la loi de comportement JOHNSON-COOK. Pour ce faire, des simulations de compression uni-axiale en variant les valeurs des paramètres A, B et n ont été effectuées sur les éprouvettes tubulaires non traitées et traitées (cémentée) afin de constater l'effet de renforcement. Ces simulations sont réalisées sur le code de calcul ABAQUS/Explicit.

a) Influence de variation de paramètre A :

Nous faisons une étude paramétrique en adoptant les valeurs dans le tableau ci-dessous où seule la valeur de A est variée.

A (MPa)	B (MPa)	C	n
227	810	0.025	0.46
247	810	0.025	0.46
197	810	0.025	0.46

Tableau III.2 : variation des valeurs pour la contrainte d'écoulement A.

Les résultats obtenus avec ABAQUS sont donnés sur la figure ci-dessous. La figure montre l'influence de la contrainte d'écoulement A sur le comportement mécanique du matériau étudié.

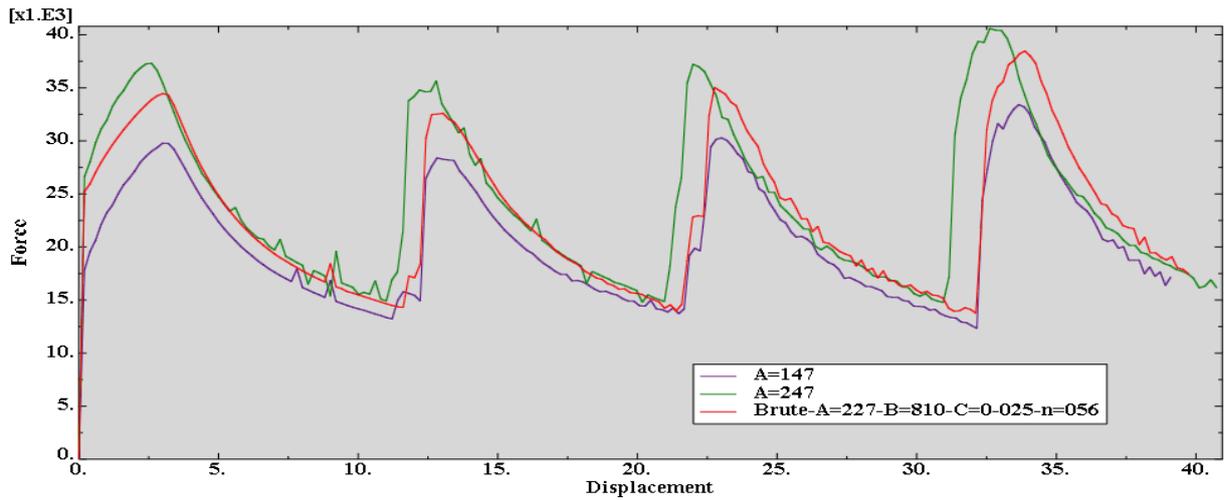


Figure III.10 : courbe Force-Déplacement pour la contrainte d'écoulement A (Mpa).

b) Influence de la variation du paramètre B :

B est relatif à la partie linéaire de l'écrouissage. Nous modifions les valeurs de ce paramètre comme indiqué sur le tableau.

A (MPa)	B (MPa)	C	n
227	810	0.025	0.46
227	910	0.025	0.46
227	710	0.025	0.46

Tableau III.3 : Les valeurs de paramètre B (Mpa).

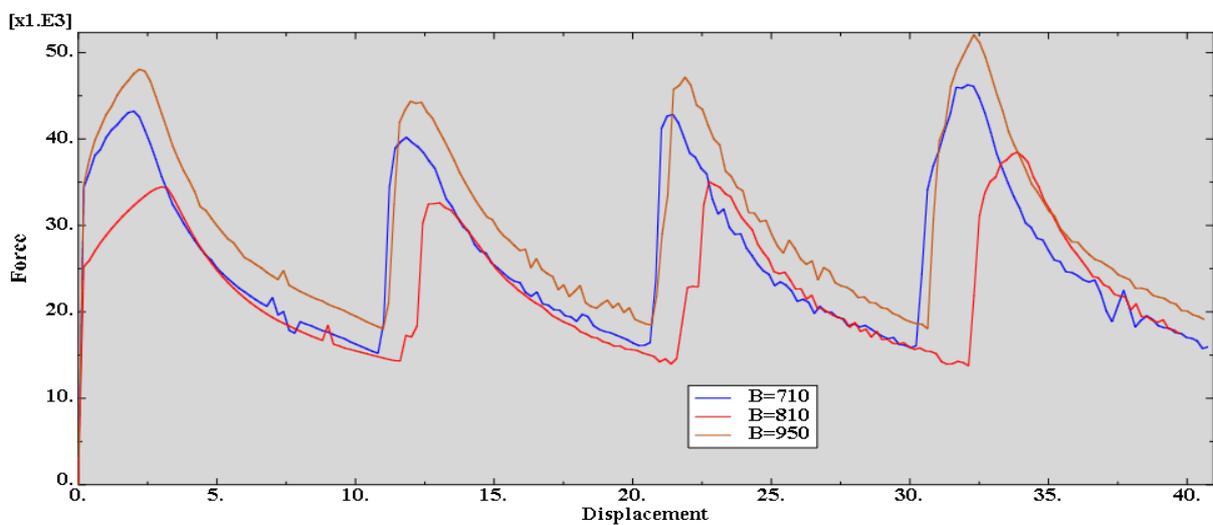


Figure III.11 : courbe Force-Déplacement pour le paramètre B (MPa).

c) Influence de variation de paramètre C :

C représente le coefficient de sensibilité au durcissement dynamique:

A (MPa)	B (MPa)	C	n
227	810	0.25	0.46
227	810	0.025	0.46
227	810	0.0025	0.46

Tableau III. 4 : Les valeurs du coefficient C.

La figure montre l'influence du coefficient de sensibilité au durcissement dynamique C sur le comportement mécanique du matériau étudié.

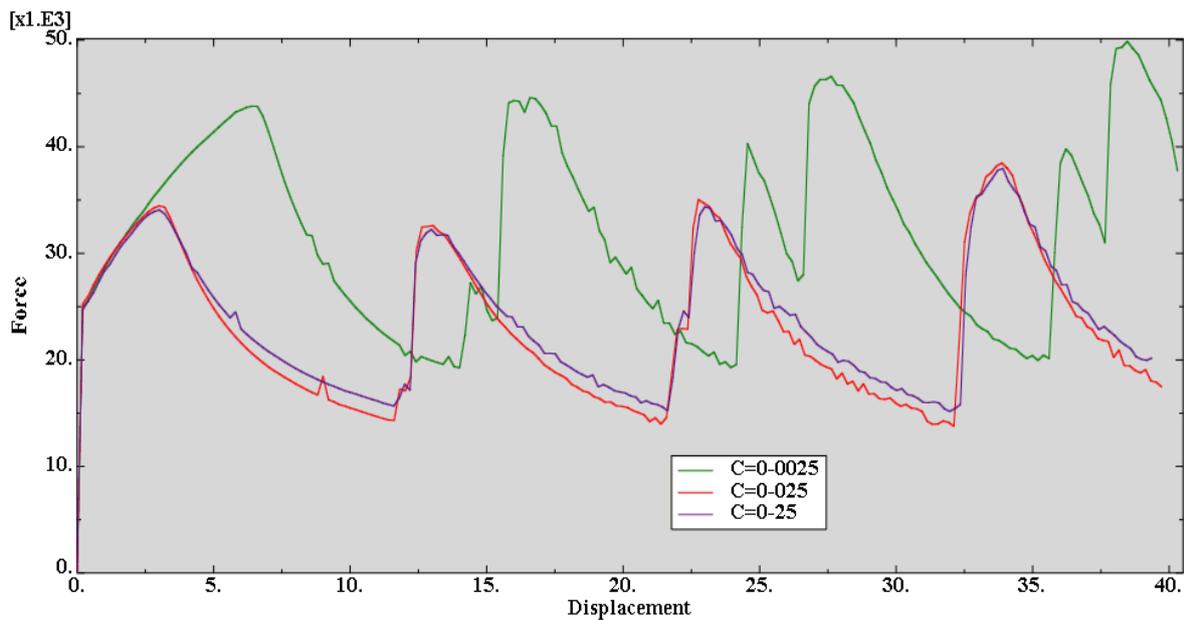


Figure III.12 : Influence du coefficient C sur les courbes force-déplacement.

d) Influence de variation de paramètres n :

L'exposant n est relatif à la partie non-linéaire de l'écroutissage. L'étude paramétrique du tableau ci-dessous est réalisée:

A (MPa)	B (MPa)	C	n
227	810	0.025	0.46
227	810	0.025	0.36
227	810	0.025	0.56

Tableau III. 5 : Les valeurs du coefficient n.

La figure montre l'influence du paramètre n relatif à la partie non-linéaire de l'écroissage sur la représentation numérique de comportement mécanique du matériau étudié.

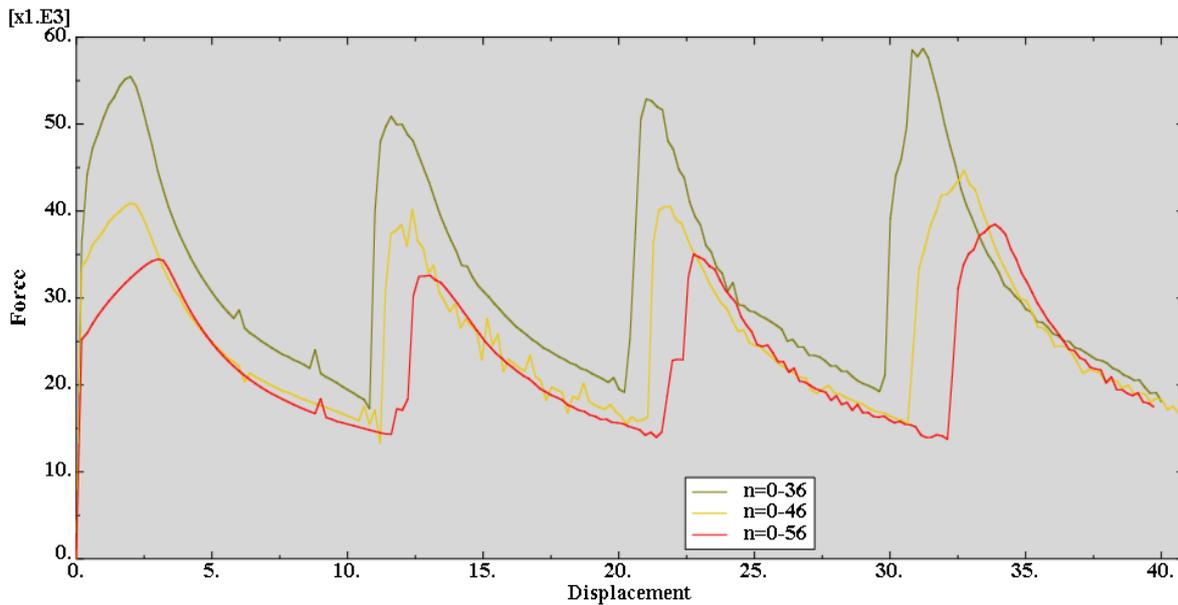


Figure III.13 : Influence de l'exposant n sur les courbes force déplacement.

5.2. Comparaisons des résultats numériques et expérimentaux :

Après l'étude réalisée précédemment sur chaque paramètre A, B, n et C, nous avons obtenu un jeu de paramètre qui approche le mieux les résultats expérimentaux. Nous donnons ci-dessous les résultats obtenus.

5.2.1. Tube non traité :

La figure qui suite montre une comparaison entre les courbes force-déplacement dans les cas expérimentale et numérique. Nous reproduisons successivement l'évolution de la force appliquée en fonction du déplacement, puis l'évolution de l'énergie absorbée en fonction du déplacement. Les résultats ainsi obtenus montrent une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les prédictions numériques. Un certain décalage apparaît cependant lors des pics suivant le premier pic. Ce décalage pourrait être réduit d'une manière sensible en raffinant les maillages.

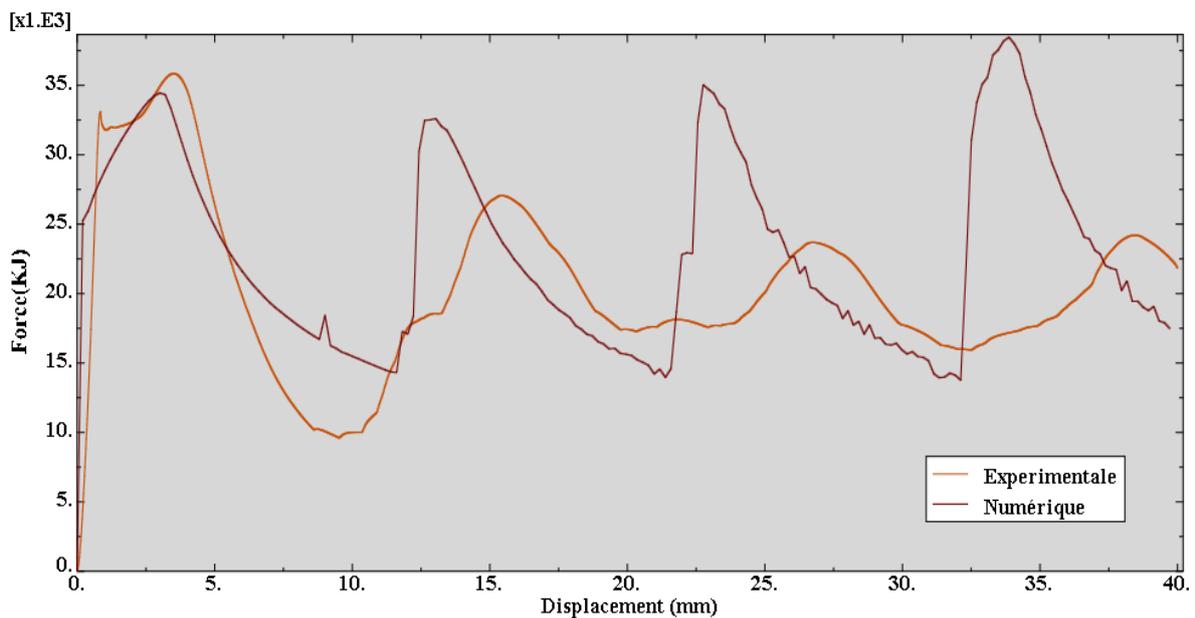


Figure III.14 : courbe comparatif entre l'expérimentale et numérique.

La figure ci-dessous indique l'énergie absorbée par l'éprouvette dans le cas expérimentale et numérique.

➤ **Énergie :**

- **Le résultat numérique :**

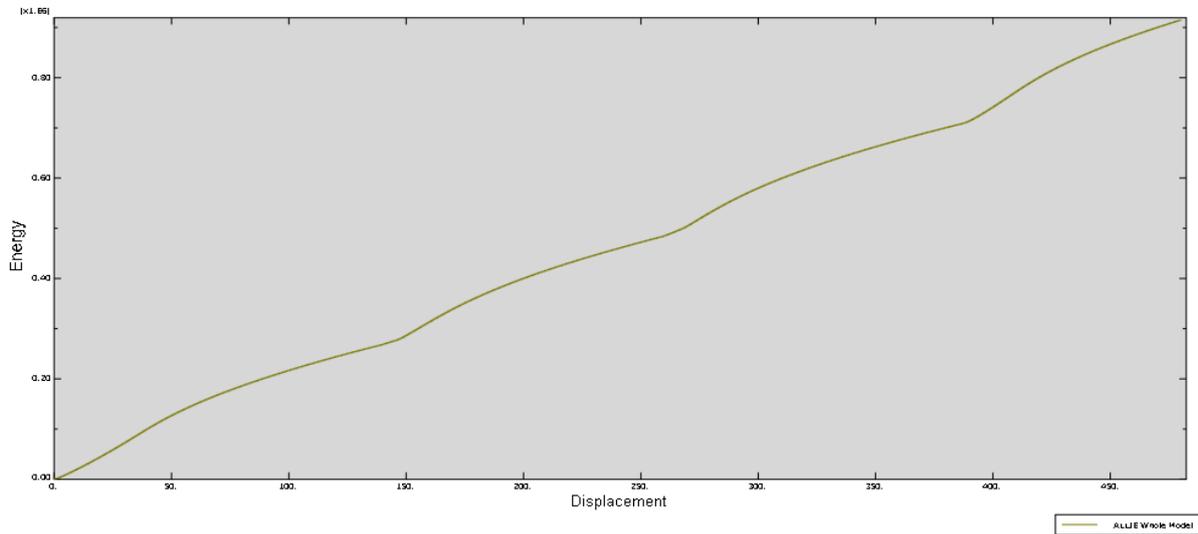


Figure III.15 : courbe énergie pour la partie numérique.

- **Le résultat expérimental [Ahmed Ali]:**

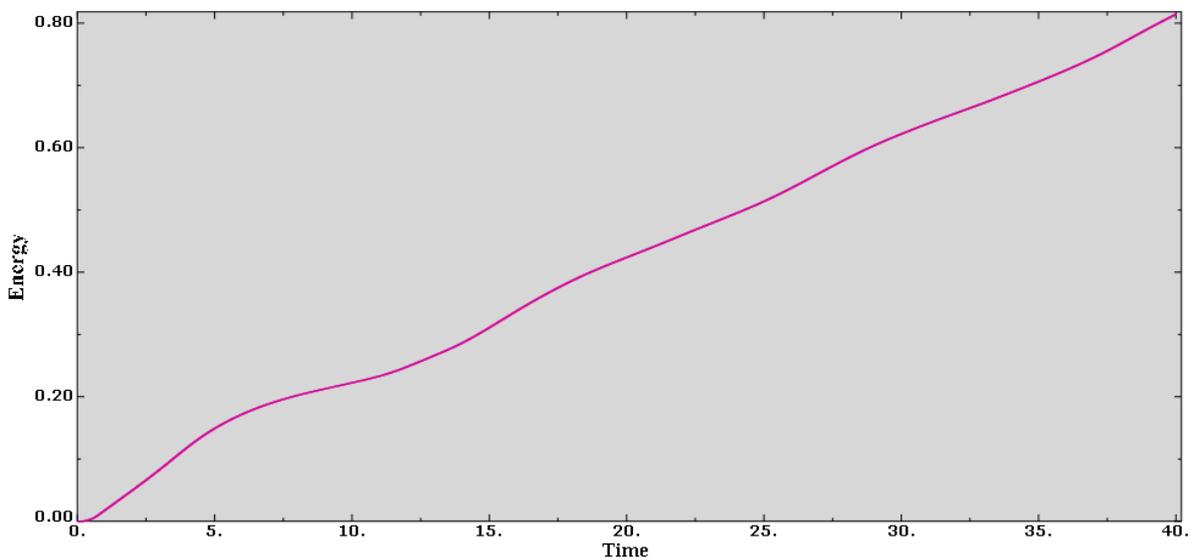


Figure III.16 : courbe énergie pour la partie expérimentale.

5.2.2. Tube traité partiellement sur deux (02) anneaux :

La figure-III-17-ci-dessous représente une comparaison entre la courbe expérimentale et la courbe obtenue avec la simulation l'éprouvette traitée sur deux zones (éprouvette à deux anneaux). Ici aussi, un bon accord apparaît entre les résultats expérimentaux et numériques.

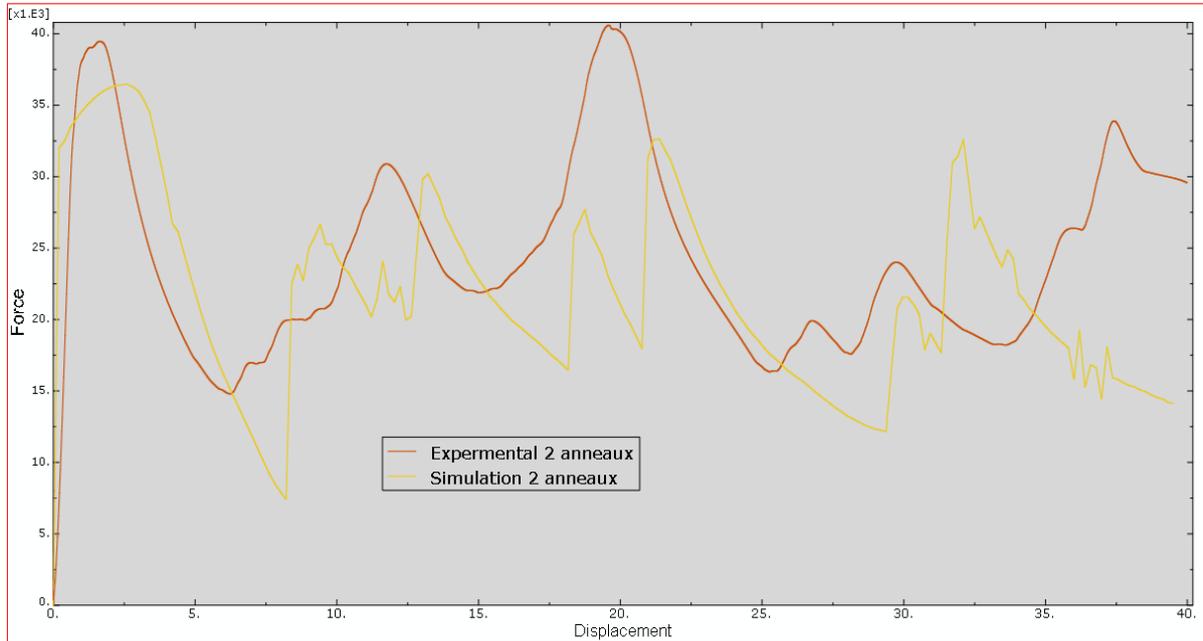


Figure III.17 : courbe expérimentale et simulation de l'éprouvette à deux anneaux.

5.2.3. Tube non traité en dynamique :

Nous donnons dans ce qui suit une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques dans le cas d'un chargement dynamique. Dans ce cas aussi, nous constatons que le modèle décrit correctement la réponse du tube au chargement dynamique.

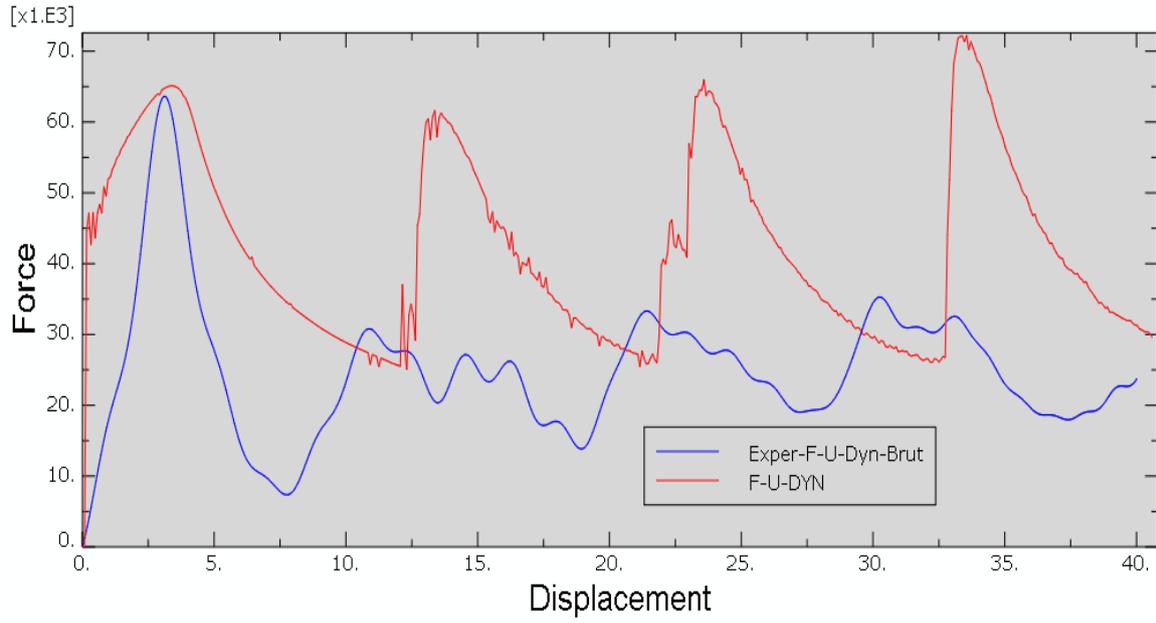


Figure III.18 : Courbe force-déplacement de la réponse du tube dans le cas de chargement dynamique.

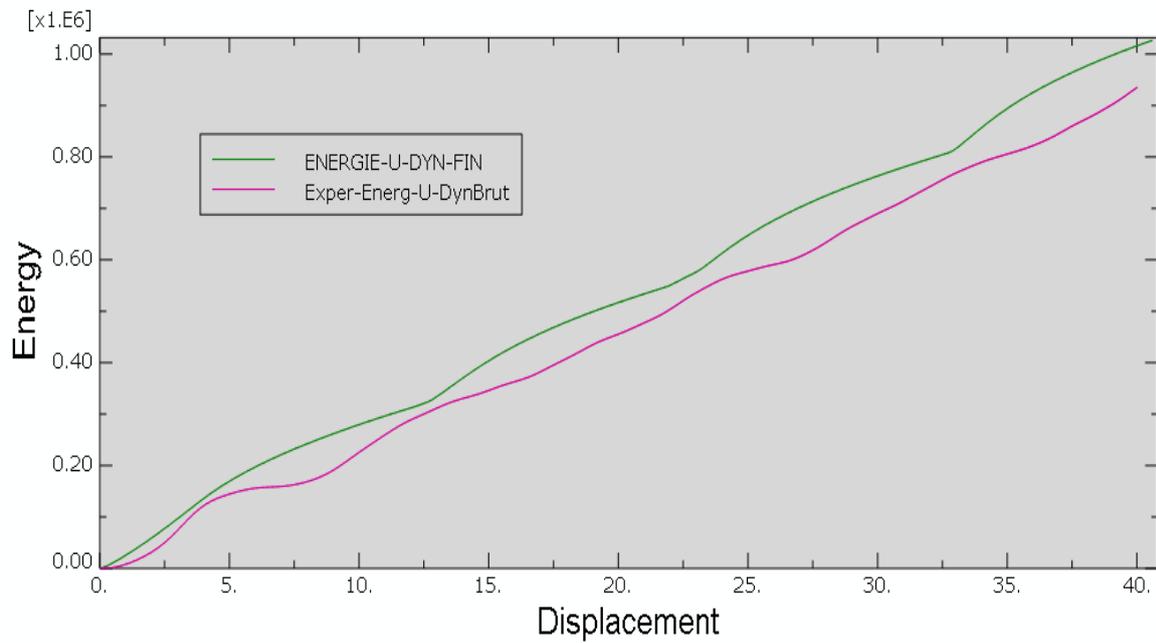


Figure III. : 19 Courbe énergie-déplacement dans le cas dynamique.

5.2.4. Répartition des contraintes, déformation plastique et vitesse dans le tube :

Dans ce qui suit nous donnons la répartition de la contrainte de Von Mises, la déformation plastique cumulée ainsi que la vitesse dans le tube non traité à des déplacements de l'impacteur de 6 mm, 10 mm, 16,2 mm et 38,5 mm.

a) Répartition de la contrainte de Von Mises

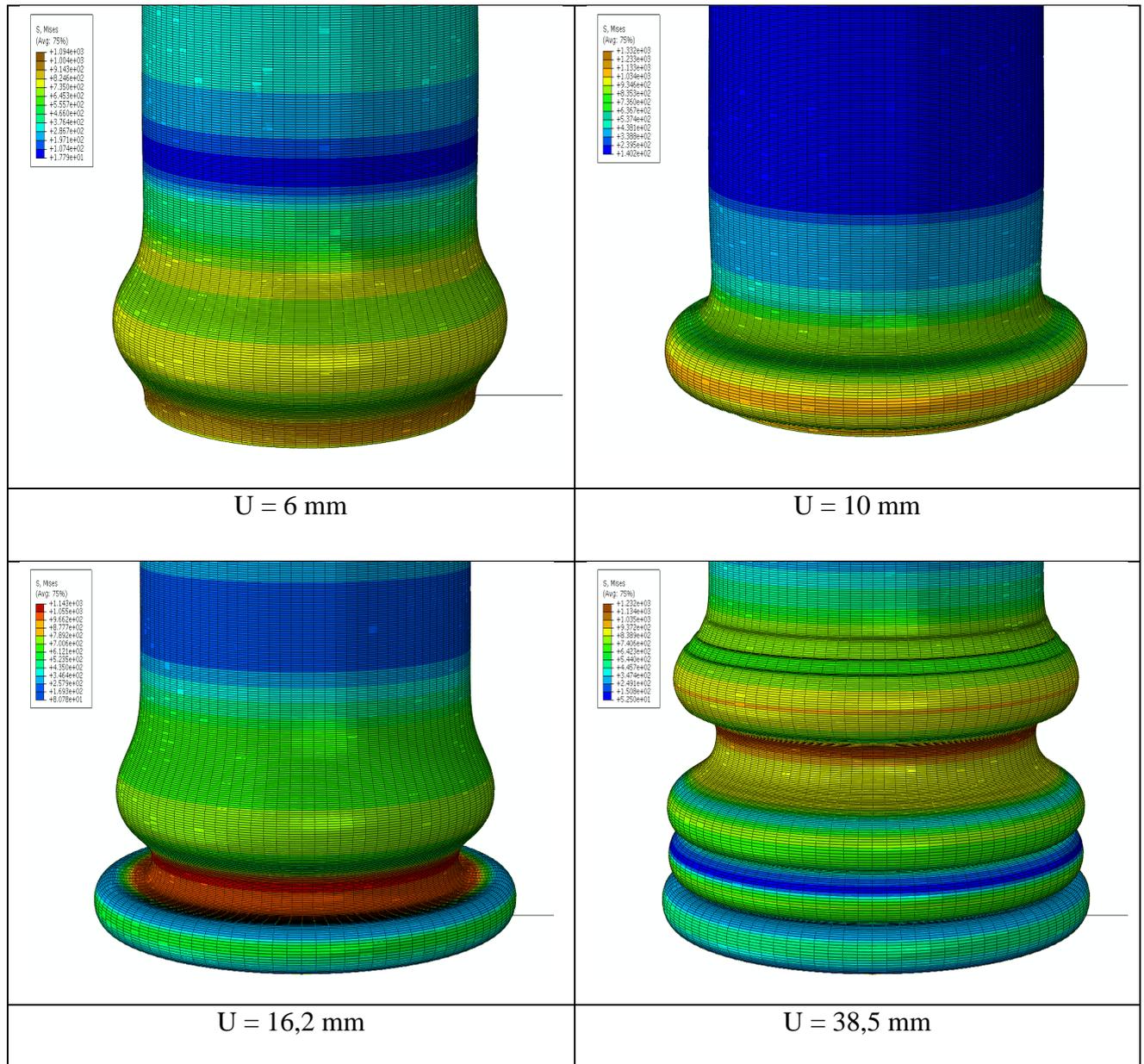


Figure III.20 : Répartition de la contrainte de Von Mises.

b) Répartition de la déformation plastique cumulée

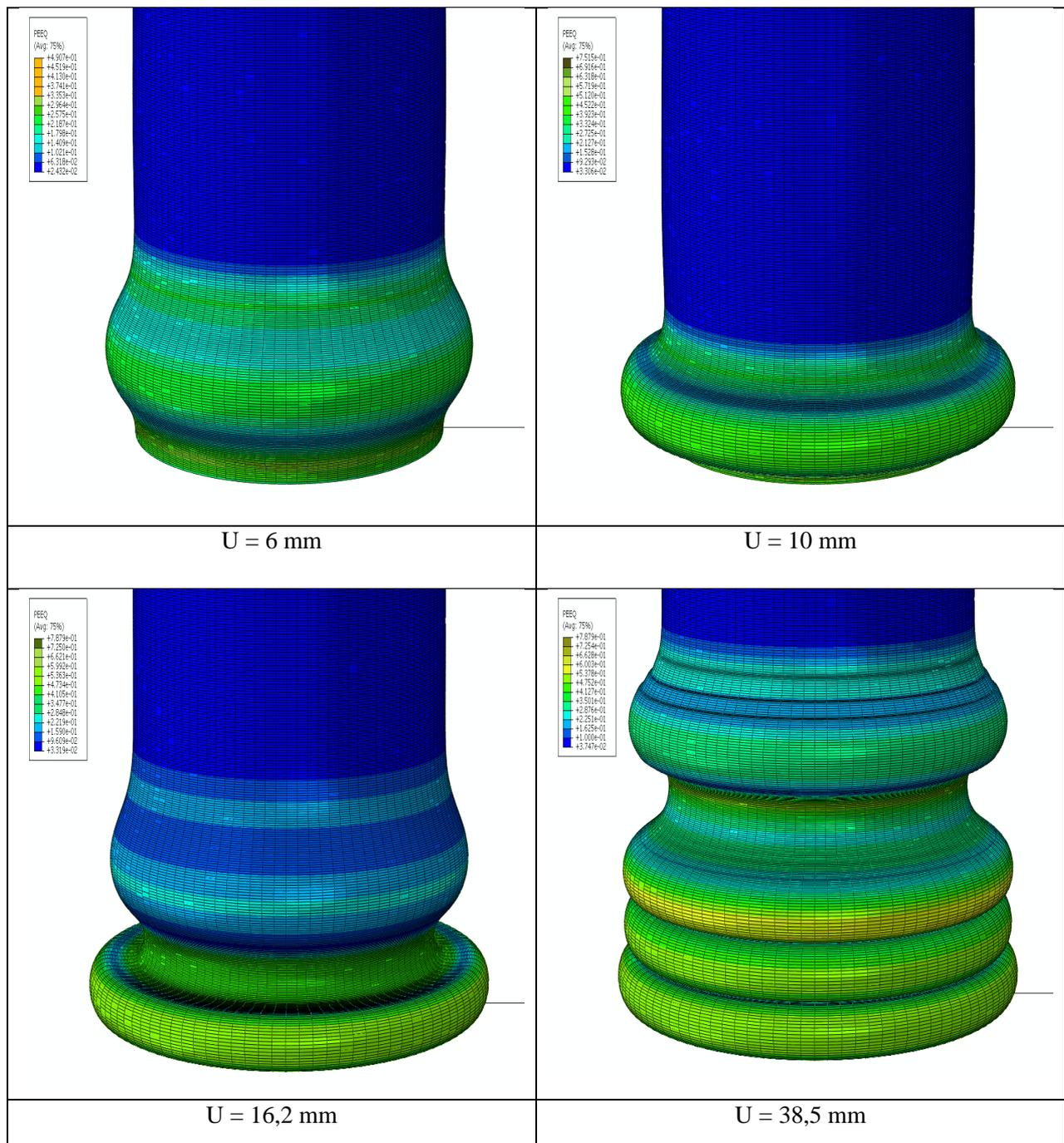


Figure III. 21 : Répartition de la déformation plastique cumulée.

c) Répartition de la vitesse de déformation

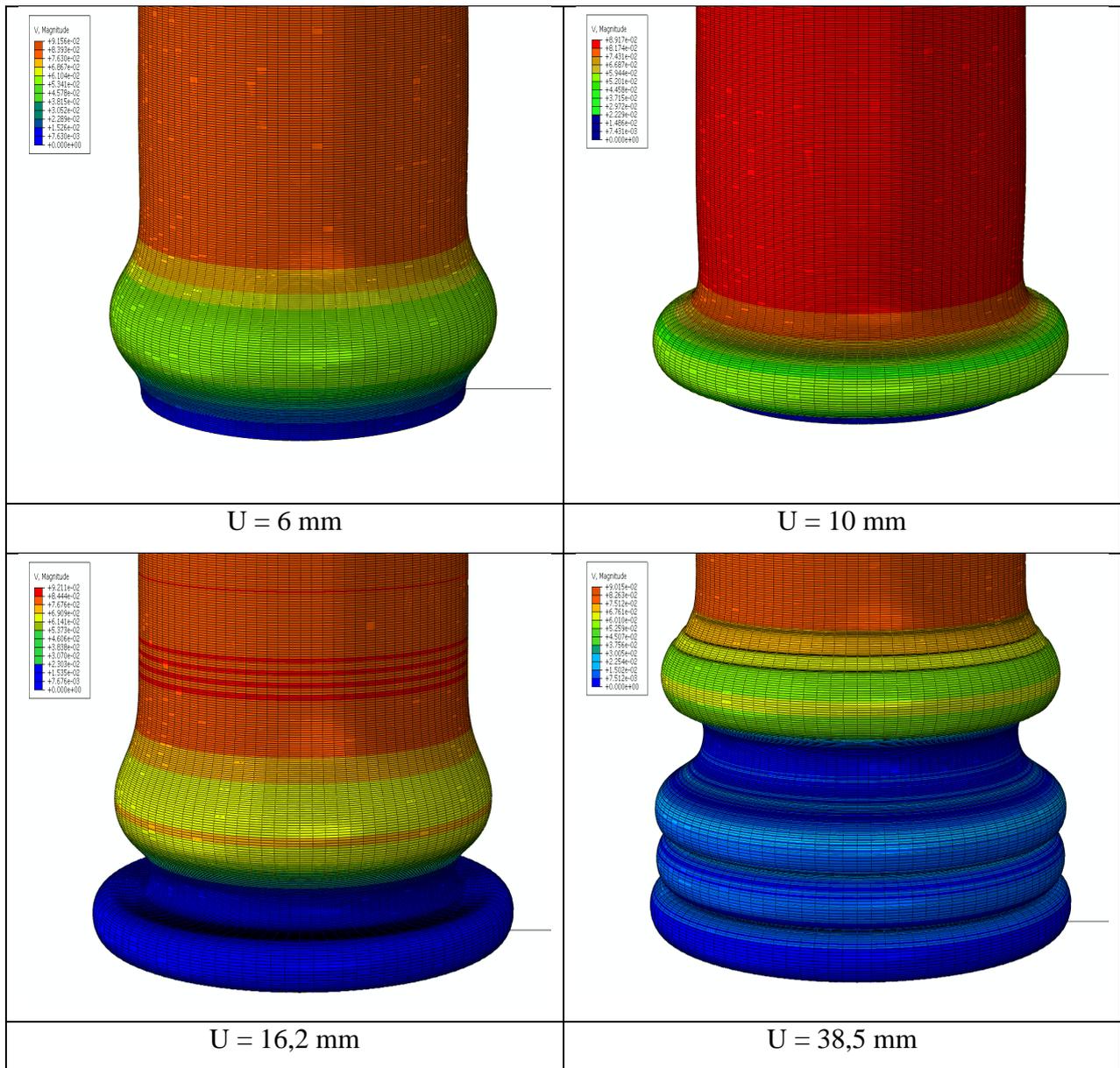


Figure III.22 : Répartition de la vitesse de déformation

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude sur le système d'absorption d'énergie utilisant les structures tubulaires. Cette étude a été menée moyennant la simulation numérique avec le code de calcul par éléments finis ABAQUS. La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques a montré la pertinence de notre démarche. Le traitement partiel de certaines parties des tubes a été correctement décrit numériquement. L'étude paramétrique a grandement contribué à la bonne simulation du comportement de ces structures. Des améliorations peuvent être obtenues en optimisant le maillage.

Conclusion générale

À la fin de ce travail on énonce ci-dessous quelques conclusions sur ce travail de master que nous avons réalisé. L'étude concerne le comportement au flambement de structures tubulaires à section circulaire soumises à un chargement uni axial sous régime quasi –statique et dynamique. Ce travail est effectué uniquement en numérique en utilisant le logiciel de calcul EF Abaqus. L'étude s'est concentrée sur une éprouvettes de structure tubulaire circulaire en acier doux E235 (nuance NFA est TU37b), traite seulement a deux anneaux (bandes cémente) et non traite (brut). Nous avons pu ainsi confirmé que le traitement partiel de certaines zones des tubes permet d'améliorer l'absorption d'énergie au cours de l'impact.

La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques a montré la pertinence de notre démarche que ce soit dans le cas de tubes partiellement traités ou non traités. L'étude paramétrique sur plusieurs paramètres matériels et de chargement a permis de nous rapprocher des résultats expérimentaux.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons des améliorations en optimisant le maillage même si cela augmentera considérablement les temps de calculs. Nous proposons aussi de s'intéresser à l'amortissement, notamment dans le cas de chargements dynamiques. Une autre perspective qui nous semble intéressante à réaliser est l'étude de structure tubulaire en faisant varier la surface traitée qui a été dans le cas actuel choisie d'environ 15% de la surface totale du tube.

Annexe

Annexe

I-Conception du dispositif de point tombant ACTP.

I.1 Introduction :

Dans cette partie un aperçu sur les composants de dispositif des essais de crash test sur l'éprouvette. L'appareil est composé de deux grandes parties mécaniques et électronique. Le schéma suivant est réalisé sur SOLID WORKS 2013.

II-Dispositif expérimental d'écrasement des éprouvettes cylindrique :

Le dispositif est composé de deux parties, mécanique et instrumentation.

II-1 La partie mécanique : (A) Socle et composante verticale, (B) Chariot-impacteur.

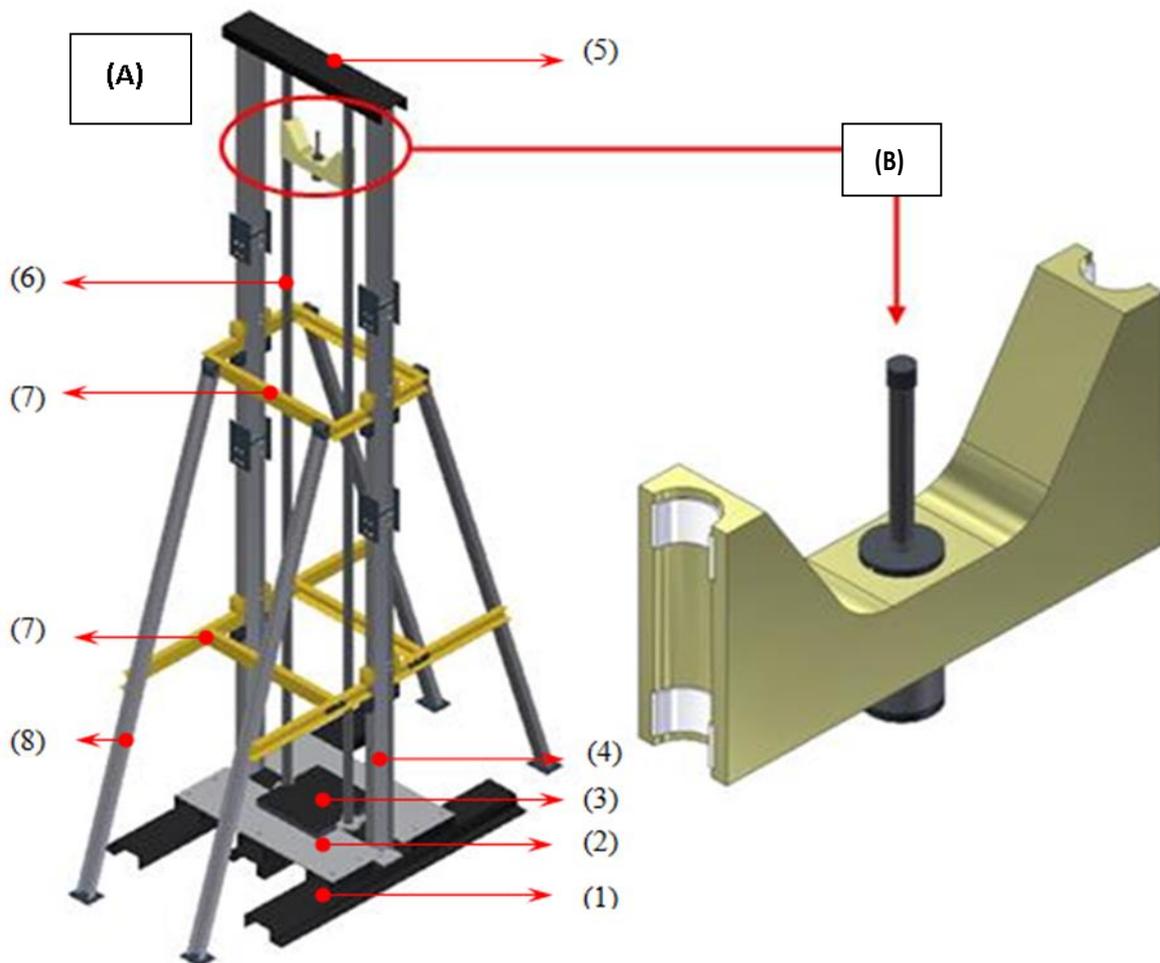


Figure2 : Socle et composante verticale

(B) Le chariot impacteur : Est une pièce en V et en polymère de hauteur de 260mm dont la partie inclinée à 170mm et la verticale a 90mm, sur chaque côté latéral est usinée un demi alésage de quatre demi coquilles semi cylindriques en téflon (antifriction).

Le premier entraxe est assuré à l'ordre de 500mm destiné à l'écrasement des structures de faible gabarit.

Le deuxième entraxe est à 900mm (grosse pièce).

Remarque: chaque entraxe est disposé de son chariot.

Remarque : le chariot nécessite un usinage spécifique d'une pièce rare.

II.1 Socle en H. Le socle :

Comprenant la zone d'impact et fixée au socle couverte d'une couche du plomb dont son rôle est l'amortissement des vibrations et du choc. le socle contiens trois poutres 220*90*10mm disposé en H 2*2met 1m. Reliées entre elles par une patte en fer boulonnées ci à dire cornière de dimensions 70*90*10mm et 2m de longueur (soudée latéralement avec huit perçages).

(2) Zone d'impact : ou la zone d'impact

Une zone d'impact posée sur H de dimensions 1000*1000*10mm plus une chape de plomb de ,500*500*50 est montée sur le fer plat est tenue en sandwich entre le planchait et une plaque en fer de 500*500*50mm avec épaisseur de planche de 0.4 mm.

(3) Plaque supérieure : la zone d'impact.

(4) Colonnes principales : ou l'arche (composantes verticale) deux colonnes de IPN de 220*90*10 fixées par boulons aux socles et coiffée d'une traverse supérieure UAP 220*90*10 hauteur total de cet arche est de 5.5m. Subdivisée en trois modules de 2*2*1.5 m(ces trois modules sont assemblés par mécano soudure.)

(5) Traverse supérieure : pour assemble les deux colonnes principale et la fixation de la partie motorisation

(6) Colonne de guidage cylindrique : deux colonnes verticales de 5m ont formé le tube cylindrique en acier laisse galvanisé.

(7) Ceintures horizontales inférieure et supérieure : pour mobilise le dispositif .

(8) Colonnes inclinées : des guides de la partie impacteur.

II-2 La mise on plan de la machine d'essai pour les teste dynamique (crash test).

Machine d'essai

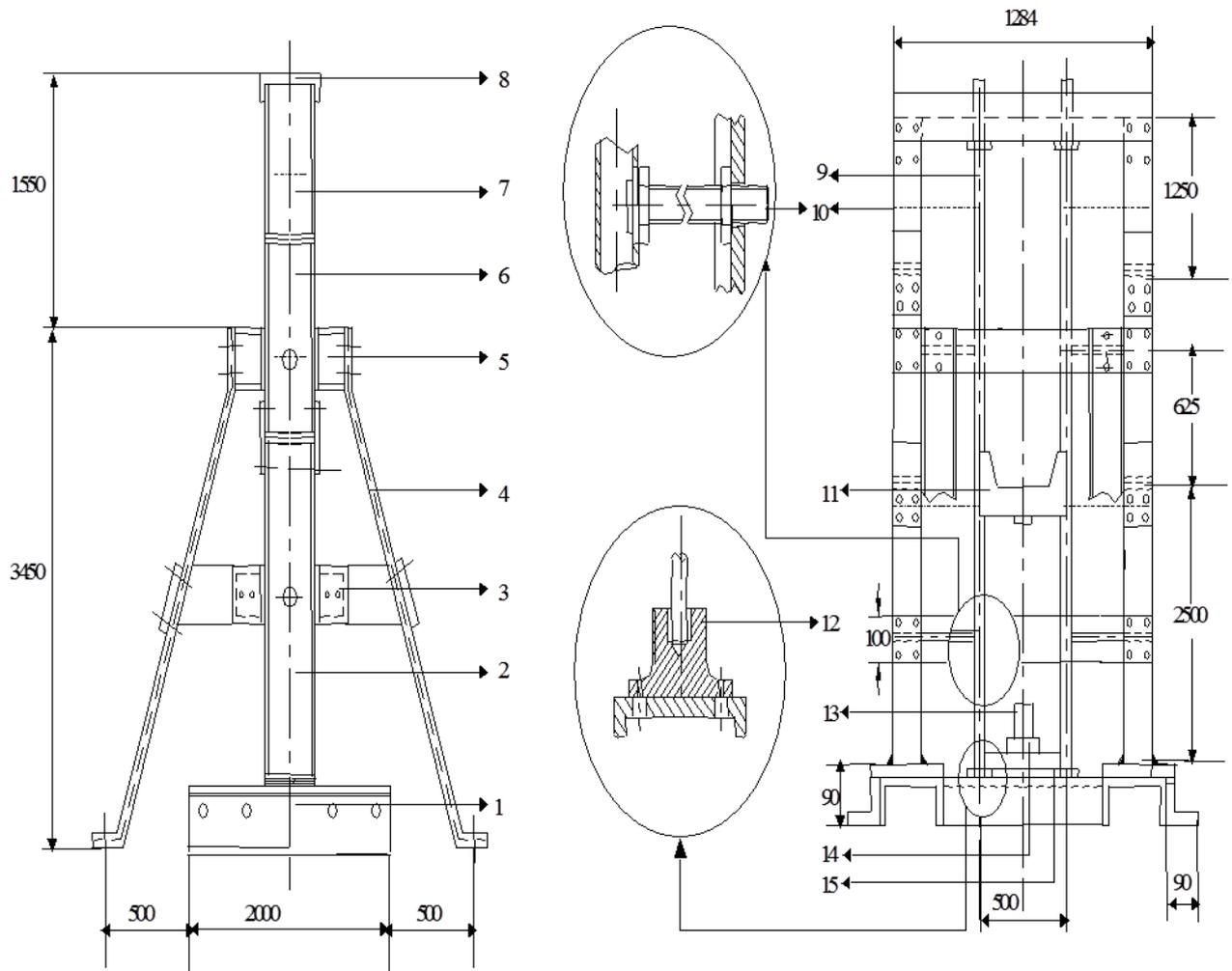


Figure 1 : Vue d'ensemble en 2D de la conception du crash-test : aperçu de la partie mécanique du poids tombant.

- | | |
|--|-------------------------------------|
| (1) Socle. | (9) colonnes de guidage. |
| (2) colonnes principales (premier module). | (10) tiges de réglage de l'entraxe. |
| (3) ceinture inférieure. | (11) chariot-impacteur. |
| (4) jambes en UAP. | (12) brides. |
| (5) ceinture supérieure. | (13) éprouvette ou ACTP. |

(6) colonnes principales (deuxième module).
dynamique.

(14) dispositif de la cellule de force

(7) colonnes principales (troisième module).
plomb.

(15) assise en fer plat + plaque de

(8) traverse supérieure.

(12) Les brides : deux brides une inférieure est fixée au socle H et la supérieure est solidaire de la traverse par liaison boulonnées.

II-03 Représentation schématique du dispositif pour les tests dynamique :

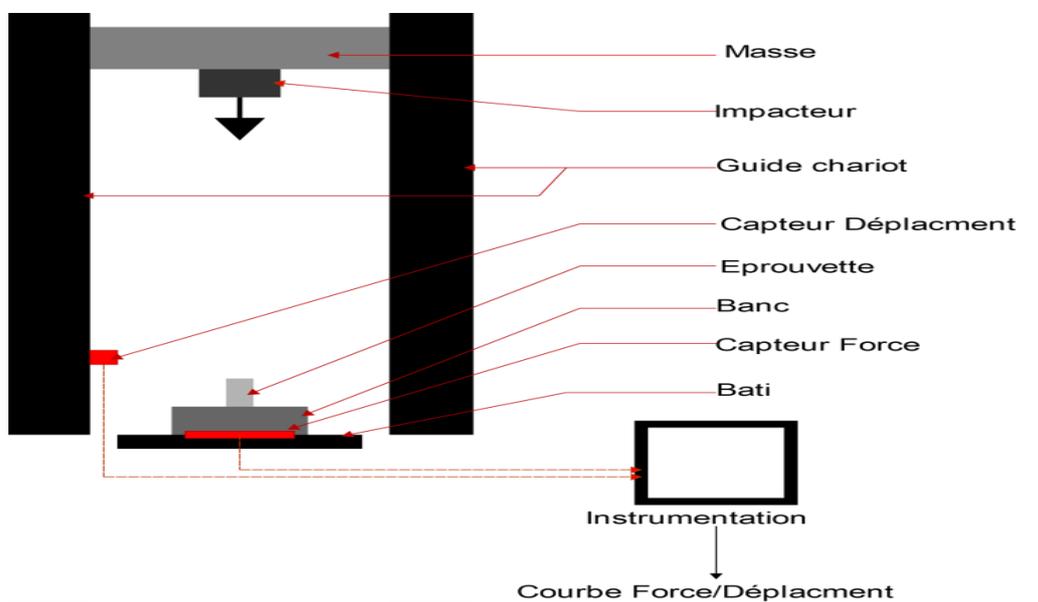


Figure : vu de l'ensemble instrumentation et la partie mécaniques

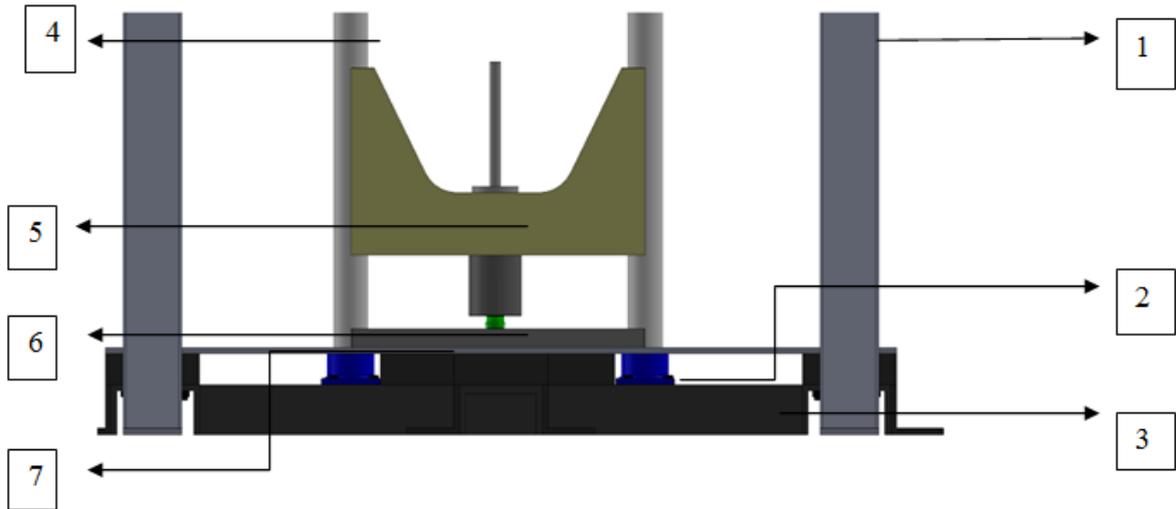


Figure : La partie mécanique de dispositif dynamique. (Crash test).

01) Colonnes principales

02) Brides.

03) Socle en H.

04) Colonne de guidage cylindrique.

05) Impacteur.

06) Éprouvette.

07) Plaque supérieure.



Figure : la partie mécanique.

01: plusieurs tiges filtrées (horizontal équidistante)

02 : impacteur à 500 mm.

III-La partie électronique du point tombant :

Le poids tombant est équipé de deux gammes d'équipement électroniques en vue de pouvoir suivre l'évolution des principales grandeurs physiques gouvernant le processus d'écrasement de la structure à tester. La première gamme comprend les instruments de captage en liaisons directe avec le poids tombant:

Une cellule de force dynamique

Un capteur de déplacement

Un accéléromètre

Un capteur optique

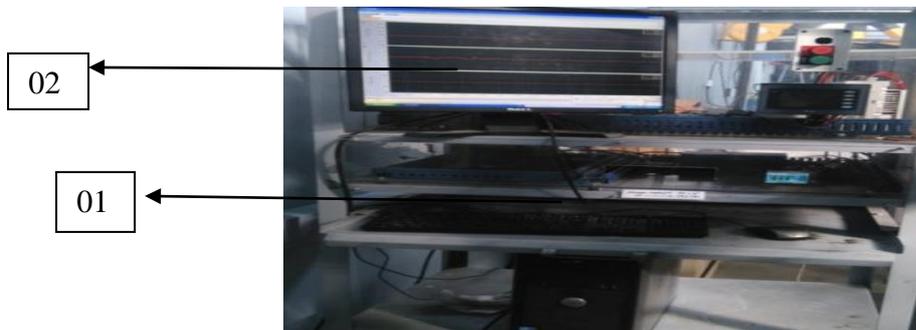


Figure : la partie instrumentation

01-Une chaine d'empette

02-Un micro-ordinateur

La deuxième partie regroupe les instruments de transfert, de stockage et d'enregistrement des données.

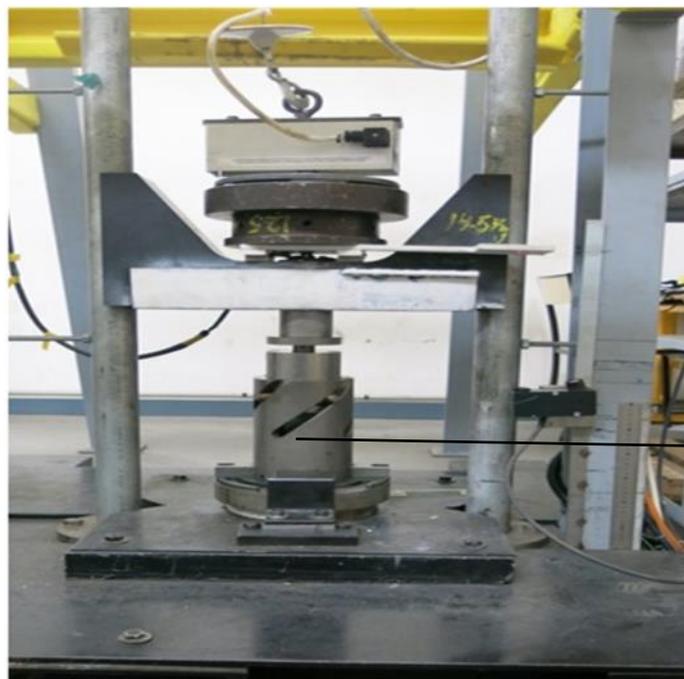


Figure : la partie de dispositif ACTP.

01 : ACTP (Absorption par Compression -Torsion-Plastique)

Une image représentant la disposition de l'éprouvette ou du l'ACTP (dans le cas de cette image c'est l'ACTP).

I-1Motorisation : le moteur qui remonte la partie l'impacteur



Figure : motorisation de dispositif crash-test

02: moteur électrique pour remonte la partie impacteur.

VI Les profils utilisés dans le dispositif :

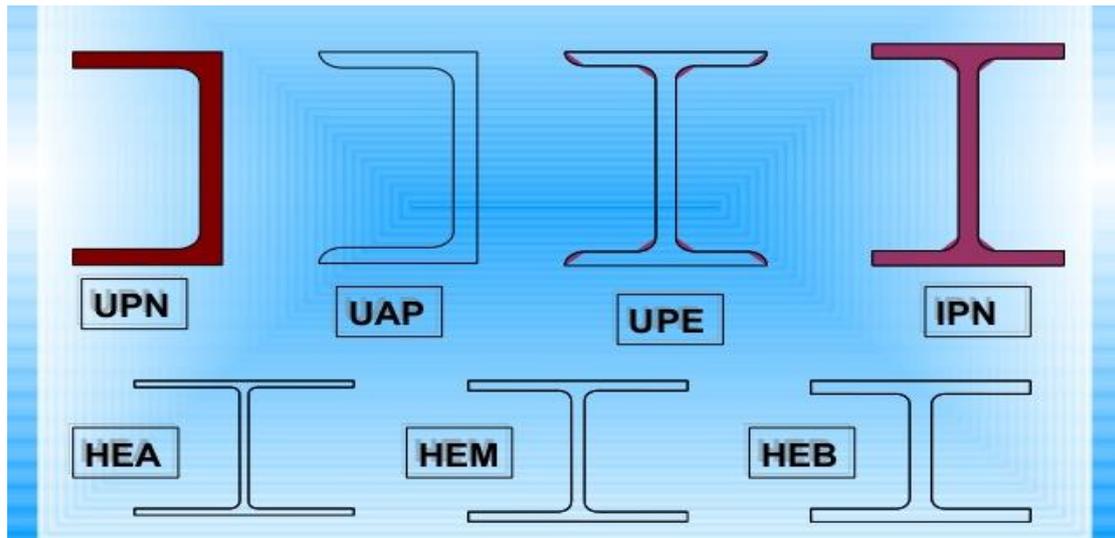


Figure : les profils utilisés dans le dispositif UAP et IPN

Pour le pied UAP

IV-01 Caractéristiques techniques des instruments [11].

01-1 La cellule de force

D'une capacité maximale de 20 tonnes, est un capteur de force à quartz sous forme de rondelle rigide. La force à mesurer agit par l'intermédiaire de couvercle et de la base en acier du boîtier du capteur, directement sur des disques en quartz. Sous charge mécanique le quartz engendre une charge électrique qui proportionnelle à la force. Cette charge est amenée sur une électrode à l'extérieur par un connecteur, transmise à l'atténuateur puis à l'amplificateur avant d'atteindre la chaîne d'acquisition.

Un amplificateur : c'est appareil à réglage numérique et possède un domaine de fréquence de 0 à 50 Hz, il utilise une tension de sortie ± 10 V. Cet appareil est sensé de convertir une charge électrique en tension.

Remarque: l'amplificateur est protégé contre les surcharges par des transistors et aussi contre les inversions de polarité.

01-2 Atténuateur de charge: un atténuateur de charge est couplé à cellule de force à chaque fois que la gamme est supérieure (la moins sensible) de l'amplificateur ne suffit pas. Du fait de l'importance de la longueur de la connexion (plus de 6 m), l'atténuateur est branché normalement entre le câble de connexion et le câble de rallonge.

01-3 Capteur optique: il est indispensable pour déclencher la mesure de la cellule de force instantanément. Pour une meilleure synchronisation de l'acquisition en raison de la courte durée de l'impact.

01-4 Accéléromètre: le model choisi est le2255B-1Isotron d'Endevco; du type piézoélectronique, miniature de faible poids et solidaire d'un bouchon vissé à l'intérieur du porte impacteur .En forme de vis de dimensions extérieurs 13*7.92mm, cet instrument est doté de large applications(grandes valeurs de g) et de haute sensibilité de 0.1mV/g.

01-5 Le conditionneur de signa: le model est Endevco model 133, équipé de trois canaux piézoélectrique, utilisable en deux modes manuel or programmable.il sera relié à un micro-Ordinateur muni du port standard RS-232 et d'une application software optionnelle, son mode normale de fonctionnement selon deux version avec ou sans surveillance.

V-LE DISPOSITIF PROPOSE. Réalise sur Solid Works version 2013

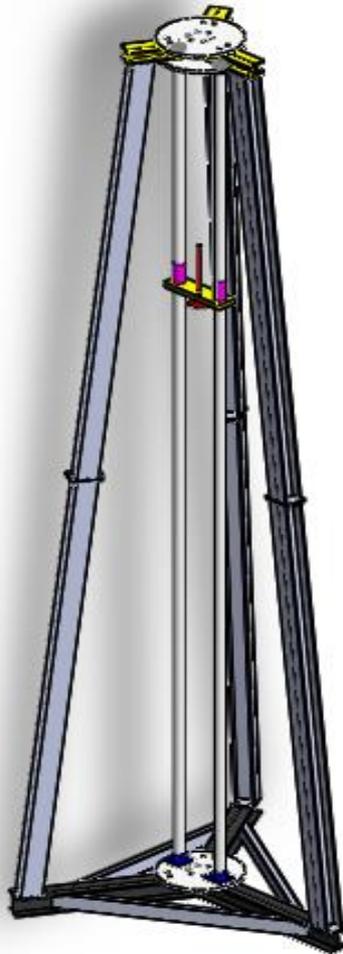


Figure : le dispositif de crash test.

Références bibliographiques

- [01] Abaqus 6.12 Abaqus/CAE User's Manuel.
- [02] Julien Briche. Thermomécanique .Introduction à la CAO sur le logiciel ABAQUS.
E-mail : julien.briche@laposte.net
- [03] Abaqus. Une brève introduction. ABAQUS/CAE 6.9.
- [04] GOUMGHAR Amirouche. Caractérisation expérimentale et simulation numérique du comportement mécanique de tubes renforcés soumis à un écrasement axial
promotion 2016/2017
- [05] HAOUCHINE Malik .Simulation de l'écrasement de tubes minces –Comparaison expérimental/numérique. Élaboré par Promotion 2015 / 2016.
- [06] A. ABDUL-LATIFA, A. AHMED-ALIA, R. BALEHA, M. OULD OUALI, Innovative solution for strength enhancement of metallic like-composite Tubular structures axially crushed used as energy dissipating devices .2017.
- [07] M. WANG XUGUANG. Comportement a l'écrasement de structures tubulaires en multi-matériaux. PHD thèses, École centrale de Lyon. Année 1991
- [08] CHAFA Ourida. Optimisation de l'absorption d'énergie des structures tubulaires.
PROMOTION 2013/2014.
- [09] MAHDI BEN FTIMA. Thèse UTILISATION DE LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS NON-LINÉAIRES POUR LA CONCEPTION DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ : APPLICATION AUX STRUCTURES MASSIVES. novembre 2013.
- [10] HAMITOUCHE Kahina. THEME. Endommagement ductile des métaux sous sollicitations dynamiques. 2014-2015.
- [11] CPGE PTSI/PT - Sciences Industrielles de l'Ingénieur Traitements thermiques des aciers
Lycée Jean Zay _ 21 rue Jean Zay _ 63300 Thiers _ Académie de Clermont-Ferrand
- [12] INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer,
75680 Paris cedex 14 Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du

travail, 2e trimestre 2001, n° 183 - ND 2147 - 2 400 ex. N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-1036-X.

[13] SAID BENSAADA TRAITEMENTS THERMIQUES, CLASSIFICATION ET DESIGNATION DES ACIERS ET FONTES.

[14] Pierre Renaud. Modélisation numérique du grenailage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2011. Français. <NNT : 2011ENAM0018>. <pastel-00606275>

[15] Olivier ANSART Fabien AVRILLAS Eric KREME Ibrahima NIANG

Karim ZANNIR / MNRV 2 / Projet scolaire .2004/2005.

[16] D.POLICE, H.CARRERE. Technologie des fabrications. Les Edition FOUCHER. 128, rue de Rivoli, paris.1983.

[17] Marc Blétry. Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux.2006 2007

[18] B. JACQUOT Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie

Société Francophone de Biomatériaux Dentaires. 2009-2010.

[19] T.THOMASSET. Tout sur les unités de mesure.1999.2018

[20] Dr. GHOMARI Fouad. SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION. Université ADOUBEKR BELKAID .faculté des sciences de l'ingénieur. Département de génie civil.

[21] RACHID Baleh. Flambage plastique quasi-statique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitations simple et complexe-système d'absorptions d'énergie-via un nouveau dispositif expérimental.2004