République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Spécialité:

Comportement et Mise en Forme des Matériaux

Présenté par : CHAFA Ourida

THEME :

Optimisation de l'absorption d'énergie des structures tubulaires

Proposé et dirigé par :

M r Ould Oual iMohand

Réalisé par :

Chafa Ourida

PROMOTION 2013/2014

REMERCIEMENT

Je remercie le bon dieu qui m'a donné la volonté pour faire ce travail

J'exprime mes plus vifs remerciements et ma profonde gratitude à

monsieur OULD OUALI qui a bien voulu diriger mon travail, sans sa

contribution ce travail ne sera pas achevé.

Je remercie également nos enseignants qui ont contribué à ma

formation.

Je remercie vivement les membres du jury qui' ont accepté d'évaluer ce

travail.

Je remercie vivement mon mari pour sa patience, sa compréhension et son aide

Pour que je puisse terminer ce travail dans les délais.

Ourida.

Dédicaces

Je dédié ce travail à

Mon très cher mari bien aimé SALEM

Mes petits enfants AYMEN , ANAYEL et ALAA qui

a à peine un mois .

Ma famille

Ma belle famille

Ma voisine Ania qui m'a soutenue pendant ces

moments de préparation

Tous mes amis surtout Nassima et Kahina

OURIDA

-Table des figures-

Figure (I-1) : Mode d'écrasement (a) stable, (b) instable……..3

Figure (I-2) : Mode élémentaire pour un élément (a) type I, (b) type II……....4

Figure (I-3) : Mode asymétrique entraînant un angle d'inclinaison……..5

Figure (I-4) : Type d'instabilité par point limite ABC, par bifurcation AB.(Bifurcation après le point maximum)…….....6

Figure (I-5) :Type d'instabilité par point limite OBAC, par bifurcation OBD.(Bifurcation avant le point maximum)…….…...7

Figure (I-6) : Mode de déformation lors d'écrasement maximal

Figure (I-7):Comportement charge déplacement (a)système d'absorption idéal, (b) système d'absorption réel……...09

Figure (I-8): Forme finale du tube (a) écrasé de diametre exterieur 60 et de l'epaisseu 1.5mm……...12

Figure (I-9) Rôle de chanfrein (a)sans chanfrein,(b) avec chanfrein…….....13

Figure (I.10): Définition des paramètres caractérisant la performance d'absorption d'énergie……....14

Figure (I-11) : Classification des phénomènes dynamiques en fonction d'un temps caractéristique de variation de chargement……...16

Figure (II-1) : L'interface d'Abaqus/Cae version 6.9…….....34

Figure (II-2) : Structure en équilibre……...35

Figure (II-3) *:* Organisation de résolution du schéma statique implicite…….....39

Figure (II-4) *:* Organigramme de résolution d'un problème mécanique en utilisant un schéma dynamique explicite……....41

Figure (II.5) : Assemblage constitué du tube déformable et deux corps rigides…….....44

Figure (II-6) : Corps rigide (indéformable)…….....44

Figure (II-7) : Tube déformable en acier…….....44

Figure (II-8) : Tube déformable en acier après déformation……...45

Figure (III-1) : Eprouvette tubulaire circulaire……..…..46

Figure (III-2) : Configuration géométrique cémentée…...……...47

Figure (III.3) : Courbe expérimentale d'énergie, déplacement de l'acier sans traité lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique……..49

Figure (III.4) : Courbe charge, déplacement de l'acier sans traité lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique……50

Figure (III.5) : Courbe numérique charge, déplacement de l'acier sans traité lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique……51

Figure (III.6) : Courbes énergie, déplacement de l'acier brut lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……51

Figure (III.7) : Comparaison de l'évolution des courbes énergie, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mm, et la courbe expérimentale lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique…….52

Figure (III.8) : Comparaison de l'évolution des courbes force, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mm, et la courbe expérimentale lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……52

Figure (III.9) : Courbe charge, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mmlors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique……53

Figure (III.10) : Courbe charge, déplacement de l'acier cémenté à 0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique…….54

Figure (III.11) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à0.1,0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique…….....……54

Figure (III.12) : Courbe énergie, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……..….55

Figure (III.13) : Courbe énergie, déplacement de l'acier cémenté à 0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……...56

Figure (III.14) : Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier brut et traité à0.1 et 0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.....56

Figure (III.15) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à0.1 avec 3V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……57

Figure (III.16) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à 0.1 avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……58

Figure (III.17) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à 0.2 avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……58

Figure (III.18) :Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à0.2 avec 4V et0.2mm avec4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……59

Figure (III.19) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à 0.1 avec la configuration 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……59

Figure (III.20) :Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à 0.2 avec la configuration 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……60

Figure (III.21.a) :Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à0.1 et 0.2mm avec la même configuration géométrique (3V)lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……..60

Figure (III.21.b) :Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à0.1 et 0.2mm avec la même configuration(4V) géométrique lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……..61

Figure (III.22) :Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2mm avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……61

Figure (III.23) :Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut S235 et traité à 0.1 et 0.2mm avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique…….....62

Figure (III.24) :Comparaison des Courbes énergies, déplacement de l'acier brut et traité à 0.1avec configuration de 3V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique…….63

Figure (III.25) :Comparaison des Courbes énergies, déplacement de l'acier brut et traité à 0.1avec configuration de 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……63

Figure (III.26) :Comparaison des Courbes énergies, déplacement de l'acier cémenté 0.2 avec deux configurations 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……...64

Figure (III.27) :Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2 avec la même configuration(3V) lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique…….64

Figure (III.28) :Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2 avec la même configuration(4V) lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique…….65

Figure (III.29) :Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2 avec différentes configurations (3V) et (4V) lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique……..65

Liste des symboles

β: Angle d'inclinaison

H : Longueur d'écrasement

E : Epaisseur du tube

R : Rayon de tube

F : Charge

F_{moy} : Charge moyenne

F_{max} : Charge maximale

η : Efficacité d'une force d'écrasement

ε : Déformation

$\dot{\varepsilon}$: Vitesse de déformation

L_0 : Longueur initiale

Δ : Longueur écrasée

Δm : Masse écrasée

P_i : Poinds par unité de longueur

E_s : Enérgie spécifique

E_{ab}: Enérgie absorbée

E^* : Enérgie spécifique modifiée

f : Fonction

σ : Force de contrainte

D : Coefficient de diffusion

D_0 : Facteur de fréquence

Q : Energie d'activation de diffusion de l'élément considéré

R : Constante des gaz

T : Température absolue

A : Acier ordinaire

N : Nombre définissant l'indice de qualité

A% : Allongement

R_i : Résistance

S : Soudable

M : Moulable

T_r : Température ambiante

T_m : Température de fusion

A : Contrainte d'écoulement

B :

C : Coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation

ε^{pl} : Déformation plastique

$\bar{\dot{\varepsilon}}^{pl}$: Vitesse de déformation plastique

$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$: Vitesse de référence

m : Coefficient de sensibilité à la température

D : Variable d'endommagement

D_c : Valeur critique d'endommagement

$\dot{D}$: Dérivée de l'endommagement

ε_f : Déformation de rupture

D_1- D_5 Constantes du matériau lié à l'endommagement

ε_d : Seuil d'endommagement

L : Longueur de l'éprouvette tubulaire

D : Diamètre extérieur de l'éprouvette tubulaire

d : Diamètre intérieur de l'éprouvette tubulaire

E: Module de Young

R_e : Limite d'élasticité

R_m : Limite à la rupture

- Table des matières -

INTRODUCTION GENERALE.....01

Chapitre I : Généralités sur le mémoire

I-1. Conception de l'écrasement ……..……03

I-1-1. Mode d'écrasement ……03

I-1-2. Stabilité de l'écrasement……...04

I-1-3. Phénomène du flambage des Structures Minces……...05

I-1-4. Différents Types de Flambage…….06

I-2. Compression axiale des tubes……..……...07

I-2-1. Flambement progressif des tubes……07

I-3. Critères propres au flambage plastique .....……09

. Charge maximale et moyenne de déformation……...09

I-4. Conditions de chargement……...09

I-5. Généralités sur les systèmes d'absorption d'énergie……10

I-5-1. Système d'absorption d'énergie par déformation élastique……..10

I-5-2. Système d'absorption d'énergie par déformation plastique……10

I-6. Effets Dynamiques……..11

I-7. Mécanismes d'Absorption d'Energie……..11

I-7-1. Matériaux métalliques…….11

I-7-2. Matériaux composites……...…12

I-8. Paramètres dévaluation de l'absorption d'énergie……...13

I-9. Définition du critère de la plasticité……..15

I-10. Sollicitation statique et dynamique…….15

. La durée de sollicitation…...……16

I-11. Traitements thermochimiques de l'acier……17

. La Cémentation……..…….18

I-12. Généralités sur l'acier doux……..19

I-12-1. Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique……...19

I-12-2. Caractéristiques physiques de l'acier doux…….20

I-12-3. Caractéristiques mécaniques……20

I-12-4.Domaine d'utilisation de l'acier doux…….21

Chapitre II Modélisation du comportement et de la rupture des métaux sous sollicitations statique et dynamique

II-1. Introduction……..22

II-2. Comportement et rupture des matériaux sous sollicitations dynamique…….22

II-3. Lois de comportement pour les grandes vitesses de déformations……..22

II-3-1. Lois phénoménologiques ……...23

II-3-2. Lois à base physique……...28

II-4. Modèles d'endommagement .....……29

II-5. Effet de la température et adoucissement……...31

II-6. Code de calcul Abaqus……...……..32

II-6-1. Introduction……32

II-6-2. Généralités sur Abaqus…….32

II-6-3. Présentation du logiciel Abaqus…….33

II-6-4.Discrétisation…….35

II-6-5. Schéma de résolution……..38

II-6-6. Comment créer un modèle dans Abaqus……..40

Chapitre III Résultats

III-1. Introduction……..46

III-2. Dimensions et nuances des tubes en acier doux utilisées……46

III-3. Identification des constants de loi de comportement de Johnson Cook……..49

3.1 Résultats expérimentaux.....49

3-2. Validation du modèle numérique.....….50

III-4. Optimisation de l'absorption d'énergie en variant l'épaisseur traitée et la configuration géométrique…….....…….53

III-4-1. L'épaisseur……..53

III-4-2. Configurations géométriques……57

III-5. Conclusion…….66

CONCLUSION GENERALE.....67

Références bibliographiques.....68

INTRODUCTION GENERALE

Le succès de toute conception mécanique dépende souvent de la sélection appropriée du matériau spécifique lié principalement à ses caractéristiques mécaniques et sa stabilité.Dans le cas de l'étude des chocs, la principale caractéristique est le système d'absorption d'énergie .Ce système a pour but de développer le concept sécuritaire préventif sur tous les moyens du transport .Cette étude est menée à l'optimisation d'absorption d'énergie afin de diminuer les souffrances humaines et les dégâts matériels.

Un nombre d'études bibliographiques représentants l'état de l'art de ce domaine de recherche comme Johnson et Reid 1978[6],Jones 1989[1]...De point de vue structural l'analyse de simple système d'absorption d'énergie condit à de sérieuse difficultés, en raisons de nombreux paramètres et phénomènes physiques intervenant dans le comportement de la structure et le domaine de la déformation de la mécanique de solide, il est nécessaire de prendre en compte des grandes déformations et la géométriques de la structure appelée à se déformer tel que l'écrouissage, compression ,flambement .

L'énergie dissipée durant la déformation plastique et la fondation la plus logique pour développer un outil traitant sous le comportement en grande déformation des éléments mécaniques (tôle, coque, tube).

Les premières investigations ont pour l'objectif de comprendre le mode de déformation plastique ousont-ils utilisés les cylindres à paroi mince. EN notre étude on se focalise sur l'essai d'écrasement d'un tube circulaire en acier doux sous un chargement bien déterminé.

Puis on le modélise afin de mettre en évidence tous les phénomènes possibles.Enfin nous comparonsle taux d’absorption d'énergie avec les précédents pour ça on consacre un logiciel de spécialité qui est Abaques explicite.

I-1. Conception de l'écrasement [1]

I-1-1. Mode d'écrasement

Deux types de mode d'écrasement en compression axiale peuvent se produire suivant la dimension géométrique et la propriété mécanique du matériau: le mode d'écrasement stable et le mode d'écrasement instable.

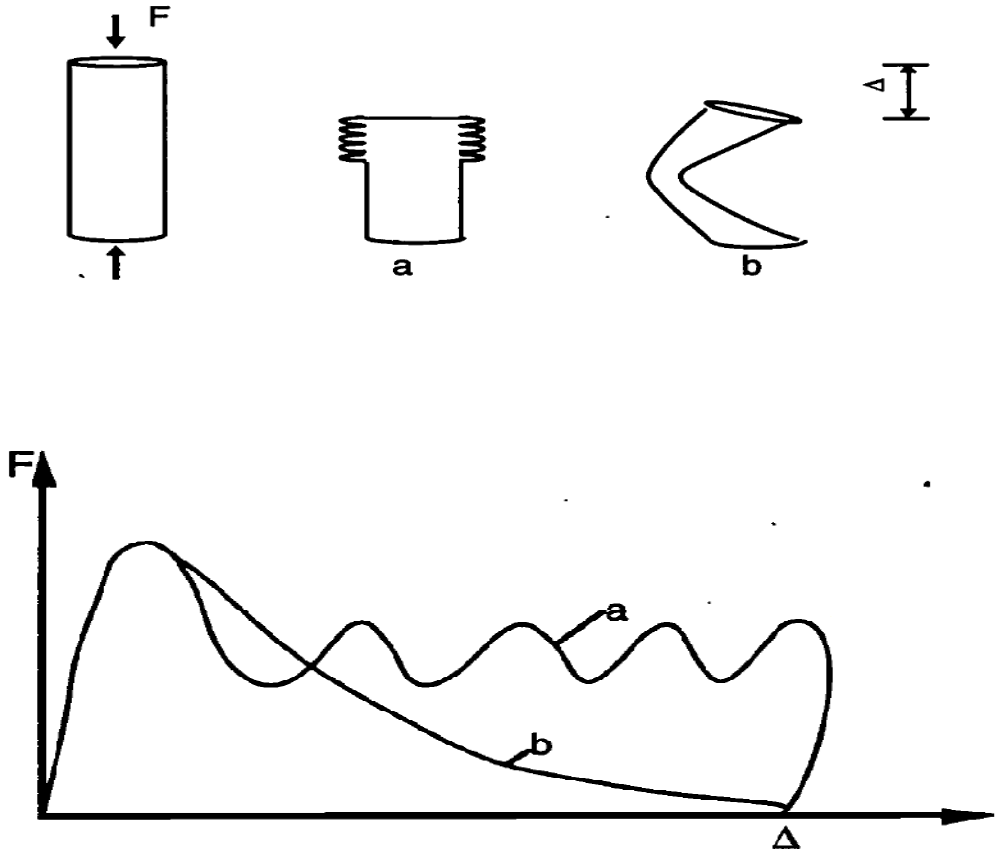


Figure (I-1) : Mode d'écrasement (a) stable, (b) instable

La caractéristique force-déplacement de ces deux types d'écrasement. Il est évident que l'énergie dissipée (l'aire de la courbe force-déplacement) est beaucoup plus petite lors de l'écrasement en mode instable que lors de l'écrasement en mode stable[2]. Le mode d'écrasement stable se caractérise par la formation de plis progressifs pour des structures en métal, et par la formation et la propagation de fissures pour des structures en matériaux composites. 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.

I-1-2. Stabilité de l'écrasement[1]

Le problème de la stabilité d'une structure consiste dans la plupart des cas à déterminer la charge maximale que la structure peut supporter avant la perte de la capacité de résistance. Mais la détermination de la charge maximale a peu d'importance pour une structure destinée à absorber de l'énergie d'impact. Ce qui est important du point de vue de l'absorption d'énergie, c'est d'avoir un processus d'écrasement stable progressif. L'instabilité entame un écrasement en mode de flexion et représente un mauvais comportement d'absorption d'énergie. La stabilité d'écrasement reste encore un problème mal compris jusqu'à présent.

Pour des tubes rectangulaires, les expériences d'ABRAMOVICZ et JONES ont montré qu'il existe deux types d'écrasement pour un élément (figure 1.2).

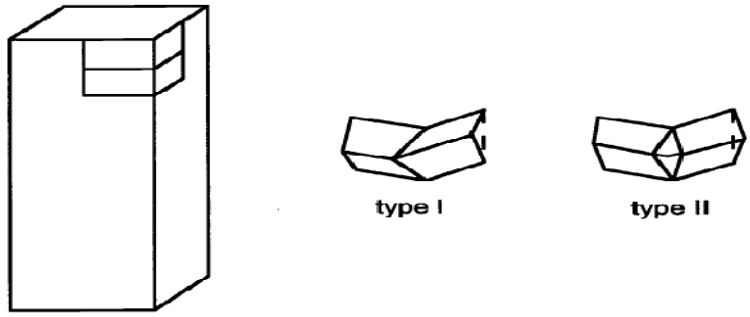


Figure (I-2) : Mode élémentaire pour un élément (a) type I, (b) type II .[1]

Un tube rectangulaire peut s'écraser soit en mode symétrique, qui implique que les 4 éléments ont le même type soit le type I ou II, soit en mode asymétrique, qui consiste en une combinaison de ces deux types élémentaires. Par une analyse qualitative, WIERZBICKI et BHAT(1986b) ont pu donner certaines explications sur les causes de l'instabilité d'écrasement. En raison de la différence de la longueur d'onde d'écrasement de ces deux types d'écrasement, le mode asymétrique est composé du type I d'un côté du tube et du type II de l'autre côté, ce qui peut causer un angle d'inclinaison (figure I-3).

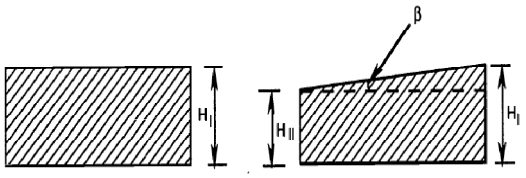


Figure (I-3) : Mode asymétrique entraînant un angle d'inclinaison[1]

A cause de cette inclinaison de la section droite, une force de cisaillement transversal V peut être créée par le frottement entre l'éprouvette et la presse. Ceci entraîne un déplacement transversal. Par accumulation de ce déplacement transversal, le moment agissant sur une section droite, créé par la force extérieure F, augmente. Le mode en flexion peut se produire à l'instant où ce moment externe nepeut plus être équilibré par le moment créé par le cisaillement.

Nous pouvons dire que la cause principale de l'instabilité d'écrasement est l'apparition du mode asymétrique. Le processus d'écrasement est difficile à contrôler pour éviter l'apparition du mode asymétrique. Les paramètres de contrôle pour un tube prismatique sont les suivants.

- rapport de la largeur sur l'épaisseur
- type de matériau
- condition de chargement
- La stabilité par le remplissage de la mousse ou outre traitement surfacique
- contrôle d'imperfection structurale.

Nous allons étudier le troisième point plus loin avec des structures tubulaires sous des différentes configurations géométriques subies un traitement thermochimique à l'aide d'un acier doux.

I-1-3. Phénomène du flambage des Structures Minces [3]

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. Si la structure est chargée de telle manière que la plupart de l'énergie de déformation est sous forme de compression de membrane, elle perd sa capacité de résistance d'une manière brutale au moment où l'énergie de membrane emmagasinée se transforme en l'énergie de flexion. Le processus de flambage se caractérise par l'échange de l'énergie de membrane à

l'énergie de flexion. La valeur de la sollicitation à partir de laquelle un accroissement de charge infiniment petite est défini comme étant la charge critique de la structure. Nous parlons de flambage élastique lorsque la charge critique conduit à des contraintes inférieures à la limite d'élasticité du matériau. Dans le cas contraire, il sera question de flambage plastique, obligeant à prendre en compte les forces d'inertie, le flambage est de type dynamique. Par contre, le flambage est dit statique si le processus de chargement est suffisamment lent et la structure puisse être considérée a tout moment en équilibre (négliger la vitesse et ses effets).

I-1-4. Différents Types de Flambage[1]

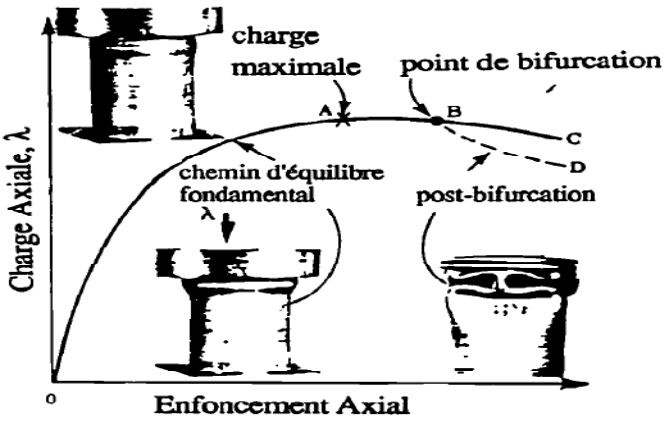


Figure (I-4) : Type d'instabilité par point limite ABC, par bifurcation ABD.(Bifurcation après le point maximum).[1]

Lorsque une structure élancée est soumise à une compression axiale, leflambage global ou de type Euler peut avoir lieu. Ce type de flambage se caractérise par la perte totale de sa capacité de résistance. Par conséquent, peu d'énergie peut être absorbée après le flambage. Dans le contexte de notre étude, ce type de flambage est exclu. Contrairement au flambage global, le flambage localisé se caractérise par la stabilisation du processus du post-flambage par formation de plis réguliers (voir la figure I.4). La capacité de résistance n'est pas perdue après le flambage. Nous distinguons encore deux types de flambage localisé : instabilité par point limite et instabilité par bifurcation. Ces deux types d'instabilité sont illustrés dans le cas d'untube circulaire sous compression axiale par les figures (I-4) et (I-5). Un tube cylindrique sous compression axiale se déforme suivant le chemin d'équilibre OAB en mode axisymétrique. Si le tube est suffisamment épais, le processus de déformation peut poursuivre le même chemin ABC. Dans le cas contraire, il est possible que le tube s'écrase

suivant un autre chemin ABD en mode de déformation non axisymétrique. 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. Dans ce cas, le point de bifurcation n a moins de signification pratique que la charge limite (maximum).

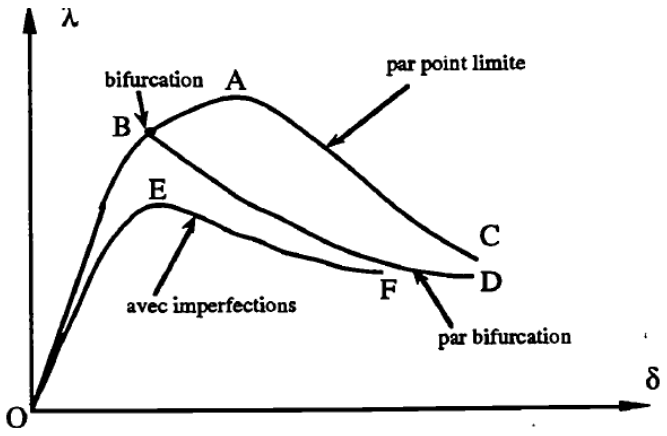


Figure (I-5) : Type d'instabilité par point limite OBAC, par bifurcation OBD.(Bifurcation avant le point maximum).

I-2. Compression axiale des tubes[2]

Un large éventuel mécanisme de déformation plastique des tubes soumis à des compressions axiales. Cette déformation donne 3 mécanisme importants deux flambage plastique axial progressif, l'aplatissement enrichirent beaucoup plus le domaine de grandes déformations le troisième qui est l'inversion à développer le mécanisme d'absorption d'énergie.

D'après Reid (1985), un même tube circulaire soumis à un flambage plastique axial possède une capacité d'absorption 10% supérieure qu'en compression latérale.

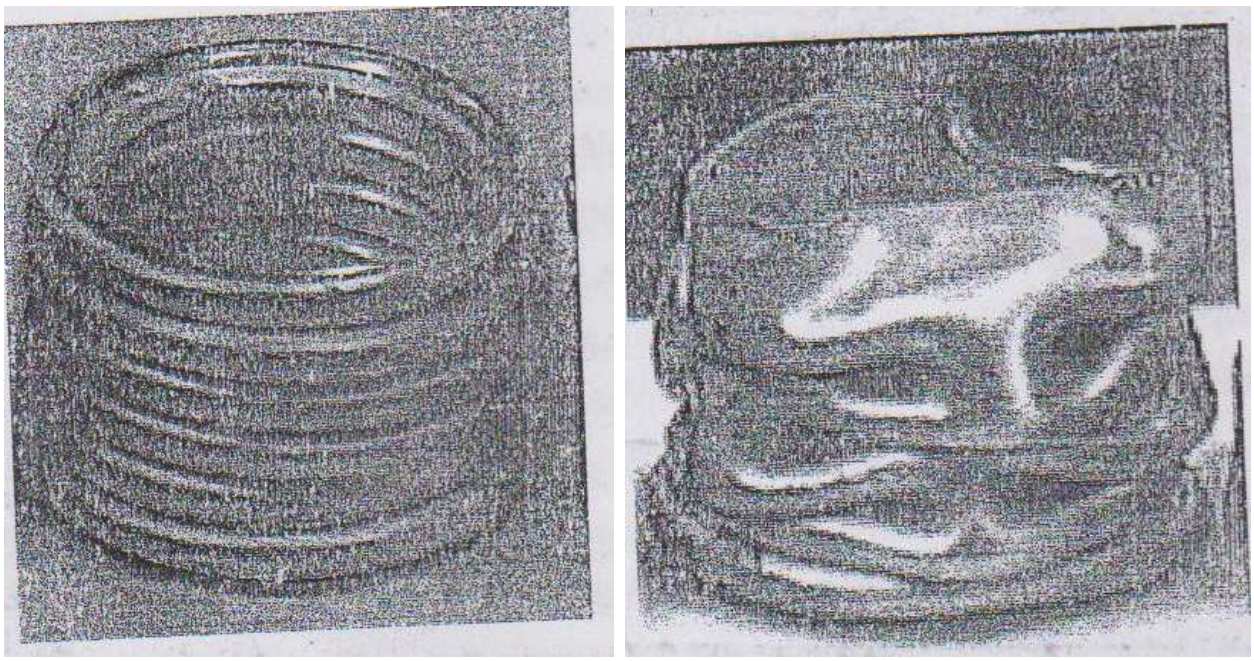
I-2-1. Flambement progressif des tubes

Le mécanisme d'absorption dans le cadre des cylindres à parois minces t/R□10ou la majorité des études faites sur le changement statique que dynamique et l'absorption d'énergie

dépend de la section, les études profondes ont prouvée l'absorption est maximale dans les sections circulaire que d'autres(carrés ,triangulaires ,hexagonales).

La déformation plastique s'opère d'une manière succincte, suivant l'un des modes de déformation proposés selon la classification d'Andrews :

- Mode eulérien.
- Mode axisymétrique dit concertina.
- Mode non-axisymétrique (diamant).
- Mode mixte concertina-diamant.



Figure(I-6):Modes de déformation lors d'écrasement uniaxia

I-3. Critères propres au flambage plastique [2]

- **Charge maximale et moyenne de déformation**

Contrairement à la définition relatée précédemment, l'expression a prouvé qu'en réalité la réponse charge-déplacement du tube suit une évolution de nature oscillatoire; à l'image de la figure (I.7).la courbe présente un pic initial ou charge maximale F_{max}**,** dépassant la valeur

de la charge moyenne F_{moy}, induisant un accroissement de l'accélération, qui est un danger potentiel pour la structure. F_{moy} équivaut mathématiquement au quotient de l'air sous la courbe charge-déplacement, obtenue par intégration par la course d'écrasement du tube.

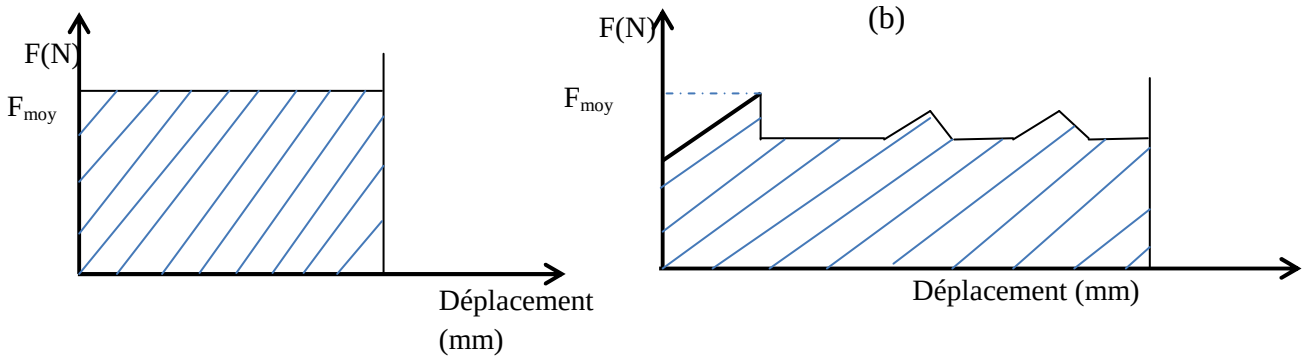


Figure (I-7) : Comportement charge déplacement (a)système d'absorption idéal, (b) système d'absorption réel

Remarque : Par ailleurs, on exprime l'efficacité d'une force d'écrasement par le rapport de la force moyenne sur la force maximale de l'écrasement. Par définition, un système d'absorption d'énergie idéal (théorique) présente une efficacité optimale=1

$$\frac{F_{moy}}{F_{max}} = \eta$$

I-4. Conditions de chargement [2]

Nous allons étudier ces deux derniers points en détail plus loin. Par nos expériences, nous avons découvert que le processus d'écrasement peut être également stabilisé par un renforcement externe à l'aide de matériaux composites ou par traitement thermo-chique proportionnelle avec différentes formes (voir le chapitre 2).

Remarque : Il est préférable d'usiner la pièce avant tout traitement thermochimique et par précaution on laisse 0.5mm

I-5. Généralités sur les systèmes d'absorption d'énergie [4]

Pour tout système donne, la capacité de d'absorption d'énergie dépend de forme géométrique principalement et de propriétés mécaniques du matériau composant la structure.

Les systèmes d'absorption d'énergie selon leur fonctionnement sont repartis en deux catégories:

- les systèmes qui se basent dans leur fonctionnement sur le frottement tel que les freins et les dynamos.
- les systèmes dont l'absorption d'énergie est la conséquence d'une déformation élastique ou élastoplastique.

La vitesse de déformation ε représente un des paramètres fondamentaux dont dépend le mode déformation (capacité d'absorption)dont l'apparition de deux régimes intéressant dans notre étude.

Régime quasi statique et régime dynamique, le premier régime comporte des vitesses du $\dot{\varepsilon} = 10^{-5}...10^{-2}$.

le deuxième régime sa vitesse de déformation est de 1/s à 10^2/s(pare-choc de véhicule)(intermédiaire) en réalité le comportement dynamique sa gamme de vitesse de déformation est balistique 10^2/s-10^4/s.

I-5-1. Système d'absorption d'énergie par déformation élastique.[5]

On parle des systèmes d'absorption d'énergie réversible exemple le cas des ressorts qui jouent un rôle d'éviter la transmissibilité des chocs.

I-5-2. Système d'absorption d'énergie par déformation plastique[5]

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 mécanique utilises à cet effet. Initialement utilisé en traction, outre une reproductibilité facile, cette structure à l'avantage de s'adapter à toutes les autres configurations de sollicitation, en vue d'une meilleure efficacité d'absorption. Pour cela, divers mécanismes de dissipation d'énergie sont associés à ce type de structure.

I-6. Effets Dynamiques [1]

Généralement la capacité d'absorption d'énergie des structures métalliques augmente avec la vitesse d'impact. La figure 1.5 montre cette tendance pour des tubes circulaires en différents types d'acier.

Les études expérimentales et théoriques sur les tubes circulaires et rectangulaires confirment cette tendance.

Quant aux tubes en matériaux composites, les expériences de THORNTON sur des tubes en fibres de verre/époxy et en fibres de carbone/époxy montrent qu'il y a peu de dépendance entre l'énergie spécifique et la vitesse d'impact (figure 1.6).

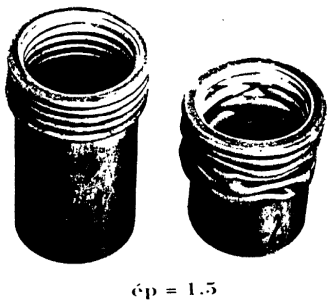
Puisque l'effet dynamique améliore le comportement d'écrasement des structures métalliques et les structures composites sont généralement insensibles à la vitesse d'impact, nous limiterons notre revue au comportement à l'écrasement quasi statique et dynamique des structures tubulaires.

I-7. Mécanismes d'Absorption d'Energie[5]

I-7-1. 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 l'acier doux et des 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 de la déformation augmente. L'apparition de fissures est possible dans ce cas. La figure montre la forme finale des tubes écrasés en acier.



ép = 1.5

(a)

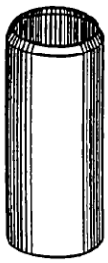
Figure (I.8):Forme finale du tube (a) écrasé de diametre exterieur 60 et de l'epaisseu 1.5mm.

I-7-2. Matériaux composites[2]

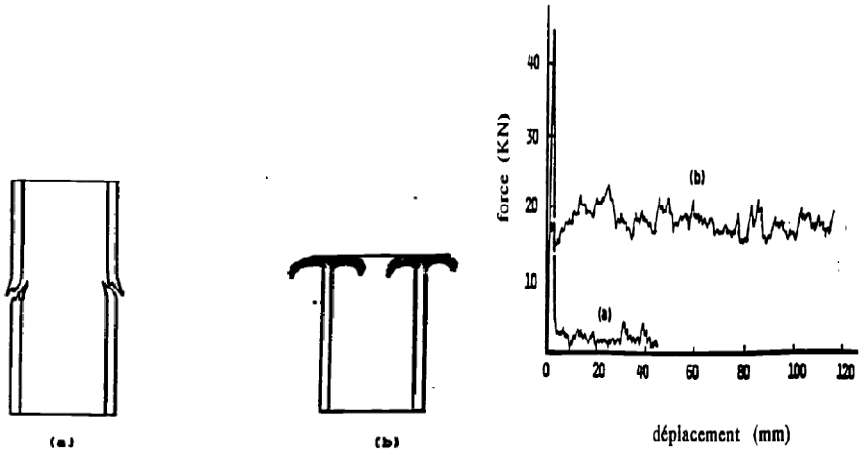
Par comparaison, les matériaux composites sont extrêmement fragiles, car ils ne présentent presque pas de déformation plastique. Par exemple, les résines époxydes et polyester utilisés pour des structures composites ont une déformation à la rupture en traction située entre 1 % et 3% d'allongement. Les fibres à haute résistance, comme la fibre de verre et la fibre de carbone, ont aussi une déformation de même grandeur.

Cependant, certains composites sont très résistants à la propagation de fissures, car ils peuvent créer une grande zone d'endommagement autour d'une fissure. Cette zone présente une haute densité de microfissures. C'est la formation et la propagation de ces microfissures qui absorbent l'énergie. Dans ce processus d'absorption d'énergie, différents types de mécanismes peuvent intervenir, comme le micro-flambage des fibres, le délaminage-cisaillement des couches, la micro-fragmentation, etc...

Mais si un chanfrein est utilisé sur une extrémité du tube pour initier le processus d'écrasement, il est possible de créer une zone d'endommagement localisée, comportant une multitude de microfissures qui se propagent le long du tube. Donc, une large quantité d'énergie est absorbée. La figure 1.8montre le rôle du chanfrein dans le processus d'écrasement d'un tube en matériaux composites (fibresde verre/polyester, DMC).



chanfrein à 45°



Figure(I-9) : Rôle de chanfrein (a)sans chanfrein,(b) avec chanfrein.

I-8. Paramètres dévaluation de l'absorption d’énergie [1]

A partir de la courbe force-déplacement d'une structure soumise à une compression axiale F, et ayant un déplacement ε dans la direction de cette force, certains paramètres sont utilisés pour évaluer la performance en matière d'absorption d'énergie de cette structure. La figure(1-9)illustre la définition de ces paramètres.

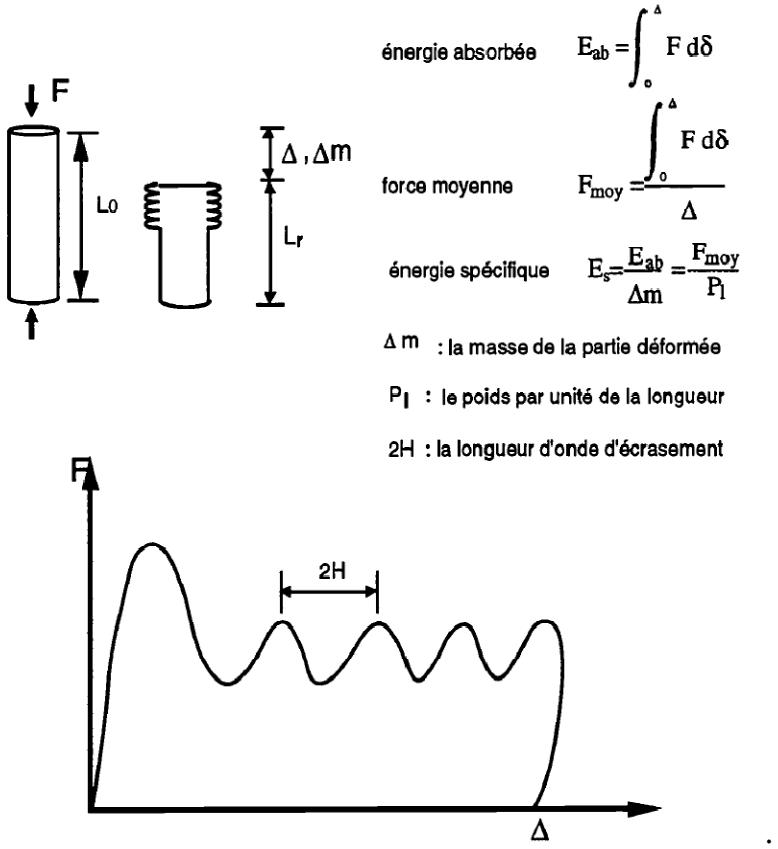


Figure (1-10) : Définition des paramètres caractérisant la performance d'absorption d'énergie.

L'énergie d'absorption spécifique de masse ou simplement l'énergie spécifique, est un paramètre important qui permet de comparer la capacité d'absorption d'énergie de différents matériaux pour une structure donnée. Elle permet aussi de comparer la capacité d'absorption d'énergie de différentes structures pour un matériau donné. Ce paramètre indique grossièrement le rapport entre l'énergie absorbée par écrasement d'une structure et le poids de cette structure. Pour un mode d'écrasement instable, par exemple du type Euler, ce paramètre perd sa signification.[5]

Dans ce cas, il peut avoir la même grandeur que pour un mode d'écrasement stable, bien que la capacité d'absorption d'énergie en mode instable soit plus petite qu'en mode stable. C'est la raison pour laquelle l'énergie spécifique modifiée E définie par :

$$E_S^* = E_s \frac{\Delta}{L_0}$$

I-9. Définition du critère de la plasticité [31]

Le comportement plastique du solide est réagi par une fonction f permettant de déterminer si l'´état actuel d'un point matériel est ´élastique ou plastique. Cette fonction ´évolue au travers des variables d'´hérédité. Elle prend la forme générique suivante :

$$f = f\ \sigma \tag{I-1}$$

La valeur du critère permet de définir le comportement du matériau :

- **f < 0 le matériau est dans un ´état ´élastique ;**
- **f = 0 le matériau est dans un ´état plastique ;**
- **f > 0 le comportement est non physique (zone interdite).**

La fonction peut être vue comme la différence entre deux grandeurs

I-10. Sollicitation statique et dynamique[4]

Pour décrire le comportement dynamique des matériaux métalliques, il est important d'utiliser des lois qui tiennent compte de la vitesse de déformation plastique équivalente $\dot{\varepsilon}$ mais aussi de la température. Les modèles les plus couramment utilisés sont les modèles thermo-elastoplastiques.

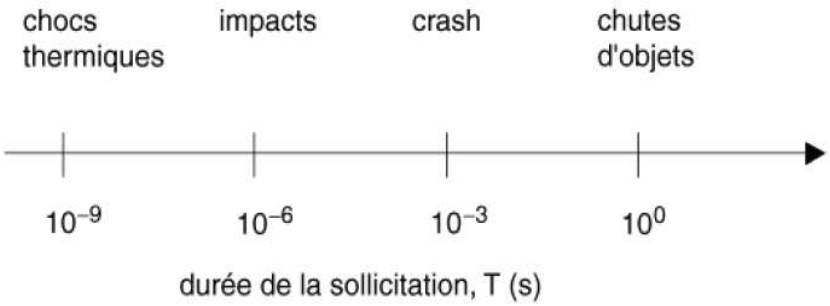
Dans la seconde partie, nous donnerons ensuite quelques modèles dynamiques en distinguant les modèles phénoménologiques et les modèles élaborés à partir des considérations microphysiques (les modèles prenant en compte la microstructure du matériau).

On a constaté une remarquable augmentation de la demande d'analyses thermomécaniques sous sollicitations rapides .divers régimes dynamiques en fonction de l'importance des effets inertiels ont été mise en évidence.

La nature dynamique des phénomènes est régit par plusieurs degrés de complexité : propagation des ondes, échauffement et influence de la température sur le comportement, phénoménologie dépendant de la vitesse de sollicitation, hétérogénéité des chargements, sont des effets à considérer.

- **La durée de sollicitation[7]**

L'étude des sollicitations lentes, appelées « quasi-statiques », appliquées à l'échelle de la minute, de la seconde, l'étude des sollicitations rapides, appliquées à l'échelle de la milli- ou de la microseconde, voire (Figure 11). Ce cloisonnement tend actuellement à s'estomper sous l'impulsion de nouvelles problématiques quelques exemples de telles applications, par ordre croissant de rapidité on peut trouver que dans certains cas, plus un phénomène est rapide, plus son intensité est élevée.



Figure(I-11) : Classification des phénomènes dynamiques en fonction d'un temps caractéristique de variation de chargement **.[6]**

Certaines applications industrielles exploitent de plus en plus des phénomènes rapides ; abattage de roches par explosif, exploitation pétrolière, usinage à grande vitesse, mise en forme, placage ou soudure par explosif, destruction de calculs rénaux ou biliaires par impacts laser, etc.

Les sollicitations rapides sont dit « dynamiques », lorsque les effets d'inertie ne peuvent plus être négligés, et que l'énergie cinétique n'est plus négligeable par rapport à l'énergie de déformation[6]. Le dimensionnement des structures est plus difficile à effectuer.

Tout processus de déformation qui invoque des vitesses de chargement supérieure à $1s^{-1}$ sont dynamiques, et ces derniers se composent de trois régimes, le dynamique lent, dynamique moyen, et pour finir le régime dynamique rapide.

- **Le régime dynamique lent :** entre 1et 10 s^{-1} on peut l'approcher avec les mêmesoutils que le processus quasi-statique.Ces vitesses de sollicitation correspondent aux capacités maximales des moyens d'essais classiques et de leur instrumentation.

- **Le régime dynamique moyen** : entre 10 et 1000s^{-1} ce régime possède une échelle temporelle de l'ordre de la milliseconde, le phénomène de crash est situé dans cette partie.
- **Le régime dynamique rapide** : au-delà de 10^4 s^{-1} il utilise le chargement transitoire par essence qui est la mise en œuvre de pressions et de taux de tr axialités très élevés le temps caractéristique de cette gamme peut atteindre la nanoseconde et elle est décrite comme étant hydrodynamique, elle représente des phénomènes d'une extrême violence.Ce régime est caractérisé par le phénomène de propagation d'ondes mécaniques, et en particulier d'ondes de choc.

I-11. Traitements thermochimiques de l'acier[30]

Le nom de traitement thermochimique est donné à la saturation superficielle de l'acier en tel ou tel élément (par exemple : carbone, azote, aluminium, chrome etc.), par sa diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée, c'est à dire, dans le cas où l'on aura besoin d'une dureté superficielle encore plus élevée et une ductilité au cœur encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques. Les traitements thermochimiques s'effectuent avec changement de la composition chimique d'une certaine épaisseur de la couche superficielle. Outre cela le changement de la composition chimique de la couche superficielle qui s'effectue à l'état solide n'est possible que par diffusion. Pour enrichir la couche superficielle d'un métal par des atomes d'un autre élément métallique, on doit créer des conditions à la surface du métal qui doivent assurer le transport de ces atomes à partir de cette surface ou bien vers cette surface. Le problème d'enrichir la couche superficielle d'un métal A par un autre métal B, nécessite que certaines conditions doivent être remplies. Avant tout il est nécessaire que le métal B doit être soluble dans le métal A à l'état solide, c'est à dire, il y a formation de cristaux mixtes.

Remarque: Le pouvoir de diffusion d'un élément est caractérisé par son coefficient de diffusion et dépend essentiellement de la température[29] :

$$D = D_0 e^{\frac{-Q}{RT}}$$

- D : coefficient de diffusion.

- D_0 : facteur de fréquence (dépend du matériau).
- Q : énergie d'activation de diffusion de l'élément considéré.
- R : constante des gaz.
- T : température absolue.

- **La cémentation[29]**

La cémentation est un processus de saturation en carbone de la couche superficielle de l'acier et ayant pour but principal, l'obtention d'une surface dure et résistance à l'usure pas enrichissement de la couche superficielle en carbone jusqu'à une concentration de 0,8 à 1,2% C et par trempe ultérieure suivie d'un revenu à basse température. Ce procédé accroît également la limite de fatigue.

La cémentation est appliquée aux aciers à faible teneur en carbone (0,5 à 0,02 % C)pour les grosses pièces jusqu'à 0,3 % C. Le choix de la nuance d'acier est nécessaire pour quele cœur de la pièce garde sa ductilité. Il existe trois modes essentiels de cémentation :

- ✓ Par agents solides contenant du carbone.
- ✓ Par gaz.
- ✓ Par agents liquides.

Généralement la profondeur maximum de pénétration est de 2 mm, donc il est exigéque les différentes opérations d'usinage doivent être réalisées avant le traitement de cémentation, c'est à dire, les pièces à cémenter sont fournies après l'usinage qui doit prévoiralors une surépaisseur de rectification de 0,05 à 0,1 mm, ou après finition.

Remarque:

- o Dans le cas où la cémentation ne porte que sur une partie de la pièce, alors les autres parties doivent être protégées par un dépôt électrolytique de cuivre (0,02 à 0,01 mm) on par des enrobages spéciaux (argile réfractaire, sable, amiante pétrie avec du verre soluble)[26].
- o La diffusion du carbone est difficile dans la ferrite que l'austénite, vue sa solubilité alors la cémentation est maximale dans le domaine austénitique[8].

I-12. Généralités sur l'acier doux[31]

I-12-1. Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique[10] et[31]]

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. Ils sont obtenus dans les convertisseurs, fours martin. Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser les valeurs limites comme le montre le tableau ci-dessous.

Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Deux solutions se présentent pour les désigner :

- **La lettre A :** est utilisée pour les aciers de constructions mécaniques .Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction Rm exprimée en daN/mm², éventuellement suivie des chiffres 1, 2, 3 ou 4 (indice de qualité des propriétés mécaniques).Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée. On utilise ces chiffres car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différents[12].

Exemple : A 60 – 3

A : Acier ordinaire.
60 : Résistance minimale à la rupture à la traction 60 daN/mm².
3 : Indice de qualité.
Leur désignation peut être aussi des indices d'utilisation comme :
S : soudable
M : moulable
L'indice de qualité est définit selon l'expression suivante :
N = 2,5 A + R
N : nombre définissant l'indice de qualité.
A : allongement en %.
R : résistance en hbar.

Exemple de nuances normalisées : A33, A34 , A50, A52, A60, etc.

- **La lettre E :** est utilisée pour désigner les aciers destinés à la construction métallique. Cette muance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2 3 ou 4.[11]

Exemple : E 24 – 2

E : Acier ordinaire.
24 : limite d'élasticité minimale de 24 daN/mm².
2 : Indice de qualité.
La catégorie de certains aciers retenus par la norme AFNOR sont :

E 24 – 1 E 26 – 2 E 36 – 2

E 24 – 2 E 26 – 3 E 36 – 3

E 24 – 3 E 30 – 3

Pour distinguer la pureté chimique en soufre et en phosphore des aciers, leur désignation peut être éventuellement suivie d'une lettre minuscule indiquant la pureté en P et S comme indiqué sur le tableau ci-dessous.

Symbole	a	b	c	d	e	f	g	h	k	m
P + S	0,140	0,120	0,100	0,090	0,070	0,065	0,060	0,055	0,045	0,035

I-12-2. Caractéristiques physiques de l'acier doux[28]

L'acier doux est un fer allié à une quantité de carbone comprise entre 0,05 et 2 %, de densité 7,85, obtenu par affinage de la fonte (abaissement de la teneur en carbone). Il possède de bonnes caractéristiques mécaniques (résistance à la traction allant de 200 a 2 000 MPa) mais est sensible à la corrosion par oxydation. Il est caractérisé par sa nuance, correspondant à une limite élastique exprimée en N/mm, ou MPa.

I-12-3. Caractéristiques mécaniques[22]

Notre étude se concentre sur l'acier S235 dont ses caractéristiques mécaniques se résument dans ce tableau ci-dessous.

Nuances normalisées	Module d'élasticité E	Coeficient de Poisson	Masse volumique	Résistance à la rupture à la traction Rr	Limite élastique à la traction Re
	(Mpa)	(sans Dim)	(Kg/m3)	(MPa)	(MPa)
Aciers d'usage général - structures minces (tôles et profilés)					
S 235	*205000*	*0.3*	*7800*	*340*	*235*
S335	*205000*	*0.3*	*7800*	*490*	*355*
Aciers de constrution mécanique					
E295	*205000*	*0.3*	*7800*	*470*	*295*
S355	*205000*	*0.3*	*7800*	*490*	*355*

I-12-4. Domaine d'utilisation de l'acier doux[31]

Terme générique désignant l'acier utilisé comme armature dans le béton armé et comme armature passive dans le béton précontraint. Surtout en construction tubulaire (machine, grue, ponts..), usinage des pièces mécaniques diverses pour toute industries (automobile, mécanique, pétrolière...), réalisation des conduites et des appareils à pression.

II-1. Introduction

Nous allons fait le point sur quelques modèles utilisés pour rendre compte du comportement des tubes en acier doux. Nous avons en effet signalé que ce comportement fait intervenir des grandes déformations plastiques qui doivent être décrites dans le cadre d'une modélisation en grande déformation.

Les paragraphes qui suivent présentent quelques lois de comportement utilisées pour modéliser le comportement plastique des aciers à usage générale ou tôle mince.

Ce chapitre sera accompagné d'une présentation globale du logiciel utilisé dans notre étude (applications module ...).

II-2. Comportement et rupture des matériaux sous sollicitations[6] dynamique

La prise en compte de la dépendance du comportement par rapport à la température et de la dissipation mécanique dans l'équation de la chaleur est indispensable pour l'étude de l'adiabacité des phénomènes rapides. Cela devient d'autant plus difficile dans le domaine dynamique moyen.

Il existe quelque phénomène de chargements rapides qui se produisent sous forme localisée.), l'adoucissement thermique associé à l'échauffement adiabatique par dissipation provoque une génération de bandes de cisaillement ultra fines, prévoit à des ruptures catastrophiques. Ou des zones à grandes traction triaxiale très localisées se développent par croisement d'ondes de détente consécutives à des impacts ou des explosions. Le phénomène, très rapide, n'autorise pas de fissuration macroscopique, trop lente, et on assiste à la germination, croissance et coalescence de microcavités ou de microfissures. Sachant que tel matériau, connu par sa ductilité en quasi-statique, peut relever d'un endommagement quasi-fragile par microfissuration en dynamique, prenant le polycarbonate soumis à un impact : la dégradation fait apparaître, un réseau de microfissures absent aux faibles vitesses, lorsque la vitesse du projectile est suffisante.

II-3. Lois de comportement pour les grandes vitesses de déformations [10]

Il existe deux grandes familles de lois constitutives, les modèles à base physique et les modèles phénoménologiques ou empiriques.

- **La modélisation phénoménologique** :

  Elle ne prend pas directement en considération la microstructure du matériau, mais se basant sur des considérations mathématiques qui exigent une bonne compréhension des phénomènes physiques.

- **La modélisation physique :**

  Prend en considération les mécanismes physiques microscopiques se produisant dans le matériau, la classe de matériaux considérée, ou la structure analysée. Ses capacités d'extrapolation devraient théoriquement être meilleures que celles de l'approche phénoménologique. La formulation tridimensionnelle nécessite des hypothèses fortes. Ces choix se posent à chaque étape de la démarche précédente.

  Dans le cadre de l'étude de dynamique rapide la vitesse de déformation est prise en compte dans l'évolution de la limite élastique. Une étude de différent type de lois incluant la vitesse de déformation est réalisée par Lagrange et al.

II-3-1. Lois phénoménologiques [29]et[6]

Obtenus par une procédure expérimentale dont la formulation est plus ou moins complexe.

- ***Modèle de Johnson Cook (1983)***

La loi empirique multiplicative de type Johnson-Cook est la plus répandue, elle permet de représenter l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation équivalente, de la vitesse de déformation et de la température. G. R. Johnson et W. H. Cook [JC83] ont montré expérimentalement, sur une classe très large des alliages métalliques, que l'on peut écrire cette loi de comportement sous la forme multiplicative de l'équation (33) tant que la température du matériau n'a pas atteint une température de transition Troom. Au-delà de cette température l'adoucissement thermique n'est plus négligeable et doit être pris en compte pour d´écrire le comportement du matériau. La loi de comportement s'écrit alors comme le présente l'équation (34).

La loi de Johnson-Cook s'´écrit donc

- $T \leq T_{room}$

$$\sigma(\bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}, T) = \left(A + B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\right)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right) \qquad \text{(II-1)}$$

Le premier facteur de l'expression représente la dépendance de la limite élastique à la déformation plastique, le deuxième facteur représente la sensibilité à la vitesse de déformation et le troisième facteur modélise l'adoucissement thermique dûà l'élévation de la température résultant de la déformation, cette approche ne tiens pas en compte des effets dus à l'histoire de la vitesse de déformation et de la température.

- $T_{melt} \geq T \geq T_{room}$

$$\sigma(\bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}, T) = \left(A + B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\right)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)\left(1 - \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^{m} \quad \text{(II-2)}$$

Avec la déformation équivalente de Von Mises.

L'équation (II-1) se décompose en trois termes : le premier correspond à l'écrouissage, le second au durcissement dynamique, et le dernier terme correspond à l'adoucissement thermique :

- **Le terme d'écrouissage compte trois coefficients (A, B et n):**

  A : est la contrainte d'écoulement à déformation plastique nulle, c'est-à-dire quand le matériau n'a pas déjà été sollicité dans le domaine plastique. Les deux autres paramètres correspondent respectivement à la partie linéaire et à la partie non linéaire de l'écrouissage. Ces trois paramètres seront identifiés à partir d'un test de traction en quasi-statique et à température ambiante.

- **Le terme de durcissement dynamique compte deux paramètres (Cet $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$) :**

  C : est un coefficient permettant de mettre en évidence la sensibilité du matériau à la vitesse de déformation qui présente une forme logarithmique. Si la vitesse de déformation est inférieure à la vitesse de référence, alors le terme n'est pas pris en compte Ce terme a pour effet d'élever la courbe déformation- contrainte et $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ est la vitesse de déformation de référence. Le paramètre C est obtenu grâce à des tests mécaniques de compression à différentes vitesses de déformation.

- **Le dernier terme correspond à l'adoucissement thermique**.

  Il comporte 3 paramètres : m montrant la sensibilité du matériau à l'élévation de la température, T_{room} la température de transition à partir de laquelle

l'adoucissement thermique est pris en compte, et T_{fusion} la température de fusion du matériau, température pour laquelle la contrainte d'écoulement est nulle. Le paramètre m est déterminé à l'aide d'essais de traction à différentes températures et en général en quasi-statique.

Ce modèle est le plus utiliser vu sa simplicité, sa capacité de décrire avec précision le comportement du matériau et la disponibilité des paramètres pour différents matériaux.

Plusieurs extensions ont été proposées vu l'insuffisance de la loi de Johnson Cook pour des vitesses de déformations supérieures à 1000 s^{-1}.

- ***Modèle de Holmquist et Johnson (1991)[31]***

Cette extension propose une loi de type puissance en la vitesse de déformation, la limite élastique augmente plus rapidement avec la vitesse de déformation au dela de 1000 s^{-1}pour les matériaux ductiles.

$$\sigma_{crit} = \left(\mathrm{A} + \mathrm{B}\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n}}\right)\left(\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{c}}\left(1 - \mathrm{T}^{*\mathrm{m}}\right) \qquad \text{(II-3)}$$

- ***Modèle de Rules et Jones***

$$1 + C_3 ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}} + \mathrm{C}_4\left(\frac{1}{\mathrm{C}_5 - \ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}}} - \frac{1}{\mathrm{C}_5}\right) \leq \mathrm{C}_6 \qquad \text{(II-4)}$$

C_6 : nouveau paramètre de précision du comportement du matériau en grand déformation supérieur à 1000s^{-1}.

Rules et Jones remarquent un accroissement très important de la limite élastique pour des vitesses de déformations supérieures à 1000 s^{-1}.

C_3, C_4, C_5représentent les paramètres matériaux.

$\frac{1}{(\mathrm{C}_5 - \ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}})} - \frac{1}{\mathrm{C}_5}$ Ce terme représente la vitesse de déformation.

- ***Modèle de Kang et Kuh(2000)***

Kang et Kuh utilisent une forme quadratique en logarithme de la vitesse de déformation pour un meilleur ajustement de la variation de la limite élastique par rapport à la vitesse de déformation.

$$\sigma_{crit} = \left(\mathrm{A} + \mathrm{B}\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n}}\right)\left(1 + C ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}} + \mathrm{C}_2(ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}})^2\right)(1 - \mathrm{T}^{*\mathrm{m}}) \qquad \text{(II-5)}$$

L'intérêt de ce modèle est d'augmenter la sensibilité à la vitesse de déformation.

- ***Modèle de Khan et al(2007)[13]***

$$\sigma_{crit} = \left(\mathrm{A} + \mathrm{B}\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n}_0}\left(1 - \frac{ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}}{lnD_0^{\mathrm{pl}}}\right)^{n1}\right)(\dot{\bar{\varepsilon}}^{*\mathrm{pl}})^{\mathrm{c}}(1 - \mathrm{T}^{*\mathrm{m}}) \qquad \text{(II-6)}$$

Khan et al ajoutent un terme en viscosité au facteur d'écrouissage. L'avantage de ce modèle est d'ajouter une plus grande dépendance par rapportà la vitesse de déformation du taux d'écrouissage.

$n_1\ et D_0^{pl}$: sont les paramètres matériaux.

- ***Modèle de Cowper-Symonds (1957)***

Cette loi est très utilisé dans la littérature, elle consiste à multiplier la limite élastique dites statique par un facteur dépendant de la puissance de la vitesse de déformation plastique, elle ne dépend pas de la température.

$$\sigma_{crit} = \sigma_{stat}\left(1 + \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}}{D}\right)^{\frac{1}{P}}\right) \qquad \text{(II-7)}$$

σ_{stat} : est la limite élastique non visqueuse, D et P sont des paramètres matériaux.

- ***Jones et al***

$$\sigma_{crit} = \sigma_{stat}\left(1 + \left(\frac{(\varepsilon_u - \varepsilon_{\mathrm{y}})\dot{\bar{\varepsilon}}}{(\varepsilon - \varepsilon_{\mathrm{y}})D_u + (\varepsilon_u - \varepsilon)D_y}\right)^{\frac{1}{P}}\right) \qquad \text{(II-8)}$$

$\varepsilon_{\mathrm{y}} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$,$\varepsilon_{\mathrm{y}}$ et ε_u sont respectivement les déformations correspondant au seuil de plasticité et à la rupture.D_u,D_y et P sont des paramètres matériau. Cette formulation présente le désavantage d'un grand nombre de paramètres, et également le fait que lescoefficients de la

vitesse de déformation plastique sont dépendants de la déformation totale,ce qui rend difficile son extension à trois dimensions.

- **Alvez**

  Il a généralisé la relation de *Cowper-Symonds* sous la forme suivante :

$$\sigma_{crit} = \sigma_{stat} + \sigma_{ref}\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}}{D}\right)^{\frac{1}{P}} \qquad \text{(II-9)}$$

Autres lois :[6]

Nous illustrons quelques lois de comportement dynamiques les moins répandus.

- ✓ Khobayashi et Dodd, Sheik-Ahmad et Twomey, Lee et al utilisent cette forme :

$$\sigma_{crit} = \sigma_0\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^n (\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}})^{\mathrm{m}}(1-\beta\Delta T) \qquad \text{(II-10)}$$

- ✓ Daridon et al, Batra et Chen, Klopp et al utilisent cette forme :

$$\sigma_{crit} = \sigma_0\left(\frac{\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}}{\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}{}_0}\right)^n\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}{}_0}\right)^{\mathrm{m}}\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\nu} \qquad \text{(II-11)}$$

- ✓ Le modèle de Zhao permet de prendre en compte l'évolution de l'écrouissage et le frottement visqueux, il et sous la forme suivante :

$$\sigma_{crit} = \left(A + B\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right) + (C + D\left(\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}\right)^m)ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right) + \mathrm{E}\left(\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}\right)^k\right)(1-\mu\Delta T \qquad \text{(II-12)}$$

- ✓ Rusinek et Klepaczko proposent un modèle phénoménologique qui est de cette forme :

$$\sigma_{crit} = \frac{E(T)}{E_0}\left(\sigma_\mu\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}, \dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}, \mathrm{T}\right) + \sigma^*\left(\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}, \mathrm{T}\right)\right) \qquad \text{(II-13)}$$

- ✓ Modèle de Teodosiu et étendu par Uenishi est de la forme :

$$\sigma_{crit} = Y_0 + R + f \parallel S \parallel \qquad \text{(II-14)}$$

Auteur(s)	$\sigma_{yield}\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)$	$G\left(\bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}\right)$	Paramètres
Cowper-Symonds [61]	Courbe analytique/ linéaire par morceaux	$1+\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{D}\right)^{\frac{1}{p}}$	D, p
Johnson-Cook [123]	$\left(A+B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\right)\left(1-T^{*m}\right)$	$\left(1+C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$	A, B, n, m, C
Jones [125]	Courbe analytique/ linéaire par morceaux	$1+\left(\frac{(\varepsilon_u-\varepsilon_y)\dot{\varepsilon}}{(\varepsilon-\varepsilon_y)D_u+(\varepsilon_u-\varepsilon)D_y}\right)^{\frac{1}{p}}$	$D_u, D_y, \varepsilon_u, \varepsilon_y, m$
Molinari [182]	$\sigma_0\left(\frac{\bar{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0^{pl}}\right)^{n}\left(\frac{T}{T_o}\right)^{\nu}$	$\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0^{pl}}\right)^{m}$	σ_0, m, n, ν
Kobayashi [137]	$\sigma_0\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\left(1-\beta\Delta T\right)$	$\left(\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}\right)^{m}$	σ_0, n, m, β

Lois constitutives prenant en compte la vitesse de déformation **[JEU08]**.

II-3-2. Lois a base physique[8]

Prenant en compte des phénomènes macroscopiques tel que (la taille des grains, la structure cristalline ou la structure des dislocations).

- ***Modèle de Zerilli-Armstrong (1987)***

Cette loi représente l'évolution de la limite élastique pour un métal cubique à faces centrées CFC.Cette loi est largement utilisée, elle n'est pas une loi empirique mais repose sur les mécanismes microscopiques de dislocation dans les métaux. Les effets de l'écrouissage visqueux et non visqueux ainsi que l'adoucissement thermique sont basés sur l'analyse de l'activation thermique et ont été intégrés de cette façon à la loi constitutive.

$$\sigma_{crit} = \sigma_0 + C_2\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n2}}\exp\left(\mathrm{C_3T} + \mathrm{C_4Tln}\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}\right) \qquad \text{(II-15)}$$

Pour un métal cubique centré le modèle de Zerilli-Armstrong s'écrit comme suit :

$$\sigma_{crit} = \sigma_0 + C_5\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n1}} + C_2\exp\left(-\mathrm{C_3T} + \mathrm{C_4Tln}\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}}\right) \qquad \text{(II-16)}$$

Ou σ_0 est la limite élastique initiale et C_2,$\mathrm{C_3}$,$\mathrm{C_4}$,C_5, $\mathrm{n_1}$ et $\mathrm{n_2}$ sont des paramètres matériaux.

Extensions du modèle de Zerilli-Armstrong :

- ✓ Voyiadjis et Abed proposent deux formules :

Pour un matriau CFC

$$\sigma_{crit} = \sigma_0 + C_2\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n2}} + \left[1-(\mathrm{C_3T} + \mathrm{C_4T}\ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}})^{\frac{1}{\mathrm{q}}}\right]^{\frac{1}{\mathrm{p}}} \quad \text{(II-17)}$$

P et q sont des paramètres du matériau.

Pour un matériau CC

$$\sigma_{crit} = \sigma_0 + C_5\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n1}} + \mathrm{C_2}\left[1-(\mathrm{C_3T} + \mathrm{C_4T}\ln\dot{\bar{\varepsilon}}^{\mathrm{pl}})^{\frac{1}{\mathrm{q}}}\right]^{\frac{1}{\mathrm{p}}} \quad \text{(II-18)}$$

Revue bibliographique des modèles d'endommagement continu

II-4. Modèles d'endommagement [6] et [8].

- ➢ ***Le modèle de Johnson-Cook***

Le modèle d'endommagement proposé par Johnson et Cook [124], utilisé entre autres dans Pantalé et al et Singh et al, définit la variable d'endommagement D variant de 0 à 1, avec D = 0 pour le matériau vierge et D = 1 pour le matériau rompu. Le critère de rupture est donc :

$$D = D_c = 1$$

L'évolution de la variable d'endommagement D est décrite par l'équation suivante :

$$\dot{D} = \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\varepsilon_f} \quad \text{(II-19)}$$

$\varepsilon_f$est la valeur de la déformation plastique de rupture. Johnson et Cook ont proposé l'expression suivante pour la déformation plastique de la rupture :

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2\exp\ D_3(\sigma^*))\left(1 + D_4\ln\left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)\right)\left(1 - D_5\frac{T-T_{room}}{T_{melt}-T_{room}}\right) \quad \text{(II-20)}$$

D_1àD_5 sont les constantes du matériau liées à l'endommagement.

- ***Le modèle de Langseth***

Ce modèle a été proposé par Børvik et al, Il est basé sur la loi constitutive de Johnson-Cook.

L'´évolution de la variable d'endommagement est reliée aux déformations plastiques.

De plus, l'expérience montre que l'endommagement ne reste nul au début de la déformation plastique. Il existe donc une valeur seuil de la déformation plastique équivalente ε_d au-delà de laquelle l'endommagement est initié. L'´évolution de la variable d'endommagement prend alors la forme :

$$\dot{D} = \begin{cases} 0 & si \quad \bar{\varepsilon}^{pl} < \varepsilon_d \\ \frac{D_C}{\varepsilon_f - \varepsilon_d}\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl} & si \quad \bar{\varepsilon}^{pl} \geq \varepsilon_d \end{cases} \qquad \text{(II-21)}$$

D_C est la valeur critique d'endommagement, ε_d est le seuil d'endommagement et ε_f est une déformation de rupture dépendant de la triaxialité des contraintes, de la vitesse de déformation et de la température. L'expression de la valeur de la déformation plastique de rupture est une variante de la loi proposée par Johnson et Cook.

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp\ D_3(\sigma^*)) \left(1 + \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)^{D_4} \left(1 - D_5 \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right) \qquad \text{(II-22)}$$

D_1etD_5 sont des paramètres matériau li´es à l'endommagement.

- ***Le modèle à effet retard de Suffis et Combescure. [9].***

Ce modèle a été présenté par Allix et Deu pour des matériaux composites sous-sol licitations dynamiques. Il est essentiellement utilisé pour des matériaux au comportement élastique (voir entre autres Ladevèze et al. Suffis et Combescure ou encore Allix et al. Mais il a été étendu aux matériaux au comportement viscoplastique dans Suffis et Combescure.

Dans ce modèle, la loi d'évolution de la variable d'endommagement D est définie àpartir du taux de restitution d'énergie élastique Y et est linéaire entre une valeur seuil Y_d et une valeur critique Y_C . L'endommagement est supposé évoluer seulement en traction. La loi d'évolution de l'endommagement est donnée par :

$$\dot{D} = \frac{1}{\tau_c}(1 - \exp\langle(-af(Y) - D\rangle))\text{si} \qquad D < 1 \tag{II-23}$$

$D = 1$: La fonction $f$prend la forme suivante selon que l'on considère un modèle élastique ou élastoplastique.

$$f(Y) = \frac{\sqrt{Y} - \sqrt{Y_d}}{\sqrt{Y_c} - \sqrt{Y_d}} \qquad pour\ un\ matériau\ élastique$$

$$f(\bar{\varepsilon}^{pl}) = \frac{\sqrt{\bar{\varepsilon}^{pl}} - \sqrt{\bar{\varepsilon}_d^{pl}}}{\sqrt{\bar{\varepsilon}_c^{pl}} - \sqrt{\bar{\varepsilon}_d^{pl}}} \qquad pour\ un\ matériau\ élastoplastique$$

$\sqrt{\bar{\varepsilon}_d^{pl}}et\sqrt{\bar{\varepsilon}_c^{pl}}$sont respectivement les déformations plastiques équivalentes seuil et limite.

Les lois présentées déférent l'une de l'autre par la loi d'évolution dela variable d'endommagement D, Dans le cadre de ce travail nous avons opté pour Le modèle d'endommagement de Johnson Cook pour les applications dynamiques.

II-5. Effet de la température.[7]

L'acier de construction est sensible à l'adoucissement thermique statique ou cyclique. Celui-ci est lié à des changements microstructuraux qui peuvent influencer le comportement du matériau lors de sollicitations mécaniques. La dureté du matériau est l'indicateur privilégié des changements qui interviennent dans un matériau sous température.

Sur le principe d'adoucissement thermique entre 750 et 960°C basé sur l'augmentation de la dureté surfacique jusqu'à 750HV. Les coefficients de ce modèle ont été affinés la relation :

$$\sigma = \left(\mathrm{A} + \mathrm{B}\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{\mathrm{n}}\right) \tag{II-24}$$

Le temps et la température sont respectivement en seconde et Kelvin. La dureté est exprimée en Vickers ; la valeur de 60 est la valeur minimale de dureté pour l'E24.

II-6. *Code de calcul Abaqus[17]*

II-6-1. Introduction

Le développement de l'ingénierie simultanée propulsée par des exigences de réduction du cout et du temps de fabrication a poussé les industriels à s'intéresser de plus en plus à la simulation numérique. La généralisation de l'utilisation des outils virtuels pour l'optimisation des pièces mécaniques a été possible grâce à l'apparition de logiciels performants et flexibles. Cette partie est consacrée à la présentation des aspects numériques lies a l'identification des constantes du loi Johnson Cook à partir d'un graphe fourni dans des conditions du tempérament ambiants modèle dans le code de calcul Abaqus. En effet, Abaqus offre la possibilité de visualiser la reproduction numérique d'une étude donnée puis comparer les résultats obtenus de lois de comportement dépendent du schéma de résolution choisi : La subroutine Umat lors de sa simulation avec le schéma statique implicite (SI) alors que la subroutine Vumat est employé avec le schéma dynamique Explicite (D.E).Notre cas est purement mécanique donc on utilise la dynamique explicite.

II-6-2. Généralités sur Abaqus [9]et [17]

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS) (devenue ABAQUS) depuis 1978 a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'a ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005. En cette année même, Abaqus/Inc a été acquis par Dassault Systèmes et est devenu SIMULIA. ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problème non linéaires. A partir d'un fichier de données (caractérisé par l'extension .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier d'extension .odb. Deux tâches à accomplir :

- générer le fichier de données : cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement, exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques,

les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc.…, suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le prétraitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module ABAQUS CAE,interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation

- ✓ la génération du fichier de données,
- ✓ le lancement du calcul proprement dit
- ✓ L'exploitation des résultats.

La simulation numérique par éléments finis des procédés de mise en forme est aujourd'hui une réalité industrielle .Elle permet de mettre au point, des produits tout en évitant de recourir à la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur-correction qui est beaucoup plus couteuse. Ainsi. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement la mise en forme d'un matériau et de jouer sur certains paramètres(géométriques, rhéologiques…) afin d'en optimiser le procédé. La simulation de l'endommagement dans les procédés de mise en forme a pour but de prédire ou /et quand un endommagement significatif apparait. Pour ce faire, les principaux phénomènes et leurs interactions doivent être correctement pris en compte.

II-6-3. *Présentation du logiciel Abaqus [17]*

Abaqus est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécanique. Il se compose de trois produits : Abaqus /Standard, Abaqus /Explicit et Abaqus /Cae.

- ➢ **Abaqus /CAE** constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisationpour les dits solveurs.
- ➢ **Le solveur Abaqus /Standard** est un solveur généraliste qui recourt à un schématraditionnel d'intégration implicite.
- ➢ **Le solveur Abaqus /Explicit** emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non-linéaires.

Chacun de ces produits est complété par des produits additionnels ou/et optionnels, spécifiques à certaines applications.

En raison du large spectre de ces capacités d'analyse et sa bonne ergonomie il est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. Il se prête bien pour l'analyse des comportements non-linéaires.il possède une vaste gamme de lois de comportement. En 2005, Abaqus/Inc a été acquis par Dassault Systèmes et est devenu SIMULIA.

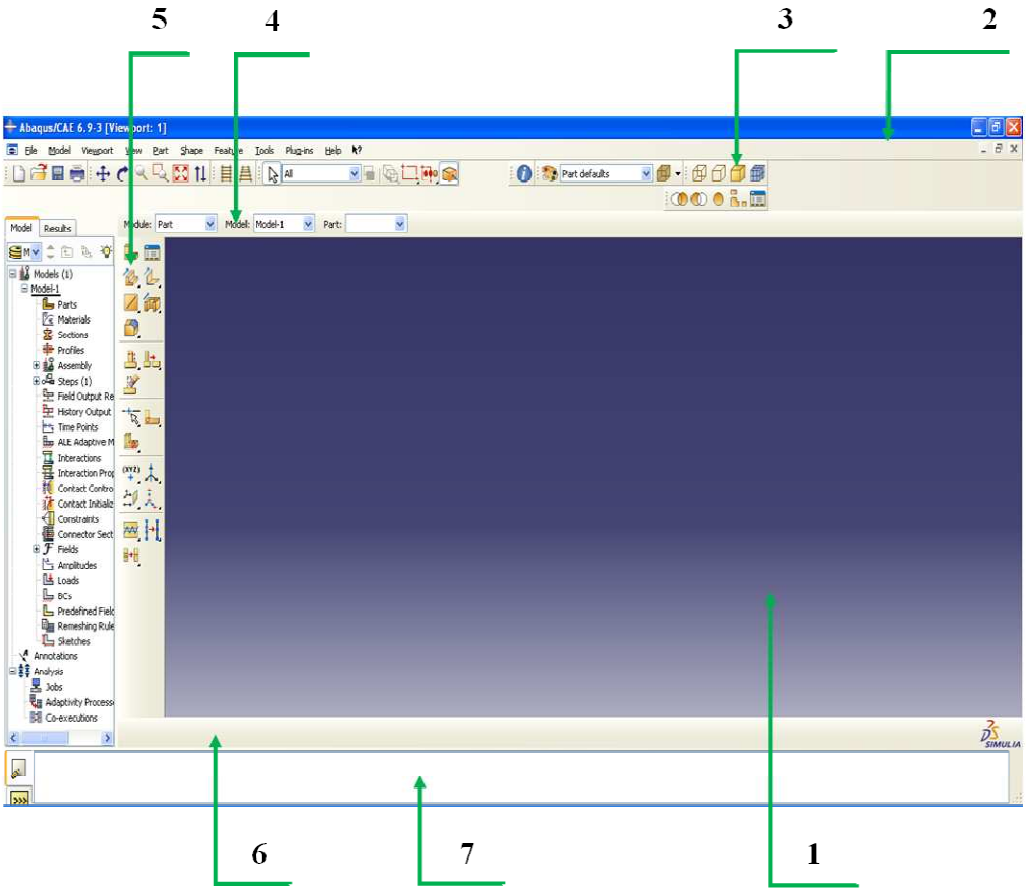


Figure (II-1) : L'interface d'Abaqus/Cae version 6.9

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivant :

1 : la fenêtre d'affichage graphique.

2 : une première barre de menus en haut, ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve.

3 : une deuxième barre horizontale d'outils, y sont disposées les icones correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom,rotations, etc.).

4 : une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou désélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

5 : on dispose a gauche d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.

6 :l'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel Abaqus vous parle : les messages affichées à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vousavez entreprise.

7 : enfin, une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

II-6-4.Discrétisation [9]

Une description de la discrétisation spatiale par EF employée dans le code de calculAbaqus est présenté en premier lieu, ainsi que les schémas de résolution Statique Implicite(Abaqus standard) et Dynamique Explicite (Abaqus Explicite) dans le cas d'un problèmemécanique. La méthode, utilise pour résoudre le problème mécanique ; est basée sur latechnique de différences finies centrées. Si la réponse du système est fortement non-linéaire,cette méthode doit être employée avec un incrément variable de temps. Cette méthodeconsistea calculer une solution a l'instant t +Δt en fonction des quantités connues à l'instant t.

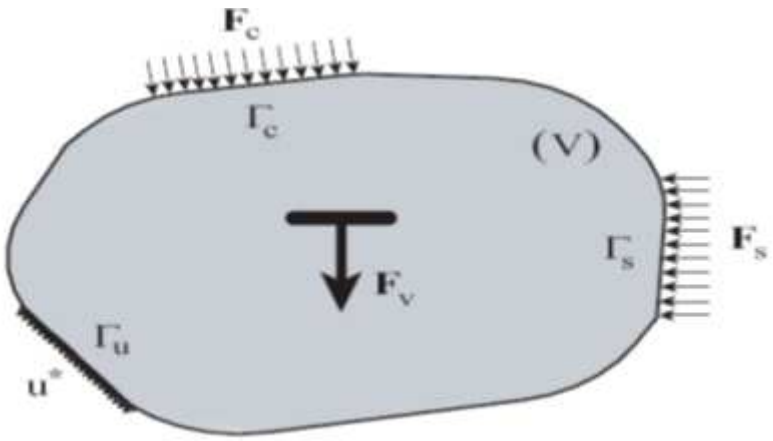


Figure (II-2) : Structure en équilibre

- ***Problème mécanique, Principe des puissances virtuelles[9]***

Soit un solide de volume V de frontière Γ en équilibre à un instant donné, comme le montre la figure (II-2) soumis à des forces volumiques Fv, et surfaciques Fs, qui s'appliquent sur le domaine Γu et de Γ sont imposées Les conditions aux limites en déplacement

$U=U^*$

imposées au solide sur le domaine La résolution d'un problème mécanique, consiste à déterminer les champs de contraintes σ(x,y) du déplacement U (problème dynamique) à tout instant t et en tout point xdu solide en connaissant les conditions initiales et les conditions aux limites qui s'écrivent.

Conditions aux limites en déplacement.

$U=U^*$ sur Γu

- Conditions aux limites portant sur les efforts.

$$\sum . n = F_s \qquad sur \quad \Gamma_s \qquad \text{(II-25)}$$
$$\sum . n = F_c \qquad sur \quad \Gamma_c$$

Les champs mécaniques et variables d'état doivent vérifier en chaque point du solide V.

Le principe des puissances virtuelles s'écrit :

$$-\int_V \sigma : \delta D \, dV + \int_V F_V \delta u \, dV + \int_{\Gamma_s} F_s \delta u \, d\Gamma_s + \int_{\Gamma_c} F_c \delta u \, d\Gamma_c = \int \rho \, \ddot{u} \delta \dot{u} \, dV \qquad \text{(II-26)}$$

Ou :

$\dot{u}$: est le vitesse et $\ddot{u}$: est l'accélération.

D : est le tenseur Eulérien des vitesses de déformation

$$D = \frac{1}{2}[grad \, \dot{u} + (grad \, \dot{u})^T] \qquad \text{(II-27)}$$

La base d'une formulation élément finis en déplacement est l'introduction d'approximation spatiale de la solution.

La fonctionnelle (II-26) est une équation non linéaire qui doit être résolue par une méthode itérative. En utilisant, la méthode des éléments finis.

Les déplacements réels et virtuels de tout point du solide V sont reliés aux déplacements des nœuds adjacents par des fonctions appropriées.

$$u^e = N_n u_n^e \qquad \text{(II-28)}$$
$$\delta u^e = N_n \, \delta u_n^e$$

N_n : sont les fonctions d'interpolation nodales sur l'élément (e).

u_n^e : désigne le vecteur contenant les déplacements de chaque nœud de l'élément.

Les vitesses réelles et virtuelles ainsi que l'accélération sont interpolées en dérivant les équations précédentes.

$$\dot{u}^e = N_n \dot{u}_n^e \qquad \text{(II-29)}$$
$$\delta \dot{u}^e = N_n \, \delta \dot{u}_n^e$$
$$\ddot{u}^e = N_n \ddot{u}_n^e$$

En introduisant les approximations (II-28) (II-29) dans l'équation (II-27), la fonctionnelle élémentaire prend la forme.

$$I_e = (M^e \ddot{u}^e + F_{int}^e - F_{ext}^e) \delta \dot{u}^e = 0 \qquad \text{(II-30)}$$

$$M^e = \int_V \rho^T N_n N_n \, dV \qquad \text{(II-31)}$$

$$F_{int}^e = \int_{V^e} \rho^T B_n^e \, \sigma \, dV$$

$$F_{ext}^e = \int_{V^e} \rho^T N_n F_v \, dV + \int_{\Gamma_s^e} \rho^T N_n F_s \, d\Gamma_s + \int_{\Gamma_s^e} \rho^T N_n F_c \, d\Gamma_c$$

Où M^{e}est la matrice masse élémentaire cohérente, F_{int}^evecteur élémentaire des effortsinternes, F_{ext}^evecteur élémentaire des efforts externes.

Et B_n^e la matrice d'interpolation de déformation-déplacement ; s'écrit comme suit :

$$B_n^e = \frac{\partial N_n}{\partial X_n} \qquad \text{(II-32)}$$

L'équilibre du système global obtenu en assemblant les fonctionnelles élémentaires I$_e$sur toute la structure est de la forme :

$$I = \sum I_e = [\sum (M^e \ddot{u}^e + F_{int}^e - F_{ext}^e)]\, \delta \ddot{u}^e = 0 \quad \text{(II-33)}$$

Ou encore:

$$I = (M^e \ddot{u}^e + F_{int}^e - F_{ext}^e) = 0 \quad \text{(II-34)}$$

En introduisant :

$$R = \|F_{int} - F_{ext}\|$$

Nous écrivons :

$$\left[M^{ki}\right]\ddot{u}^i + \left[R^k u^i\right] = 0 \quad \text{(II-35)}$$

Le système algébrique précédant est non linéaire, il exprime l'équilibre dynamique de la structure sa résolution incrémentale par linéarisation sur chaque incrément de temps peut être envisagée par plusieurs méthodes statique implicite ou bien dynamique explicite.

II-6-5. Schéma de résolution[17]

- ***Schéma Statistique Implicite (problème mécanique)***

Le schéma Statistique Implicite correspond à la situation ou le terme d'inertie qui apparait dans l'équation (II-34) peut être négligé.

$$R_{n+1} = (F_{int})_{n+1} - (F_{ext})_{n+1} \quad \text{(II-36)}$$

Où Rn+1 est le résidu d'équilibre statique a l'instant n+1. La résolution de cette équation dans le cadre de package Standard est effectué par la méthode itérative de Newton Raphson modifié. Ce résidu Rn+1 est linéarisé en utilisant un développement limité de Taylor d'ordre 1.

$$R_{n+1}^{iter+1} = R_n^{inter} + \left(\frac{\partial R_n}{\partial u_{n+1}}\right)^{iter} \delta U_n + \cdots = 0 \quad \text{(II-37)}$$

$\delta U_n = U_{n+1}^{iter+1} - U_n^{iter}$: est l'incrément de déplacement entre les itérations successives (iter) et (iter+1). Ce processus itératif continu jusqu'à la convergence du système.

$$(|R_{n+1}| < \epsilon)$$

L'équation (II-37) fait apparaitre l'expression de la matrice tangente a l'interaction (iter)

$$\left[K_T^{iter}(U_n)\right] = -\left(\frac{\partial R_n}{\partial u_{n+1}}\right)^{iter} \quad \text{(II-38)}$$

$K_T^{iter}(U_n)$joue un rôle central dans la vitesse de convergence de ce schéma itératif. La détermination de cet opérateur se fait par le calcul du résidu R_n. Après développement, nous obtenons :

$$[K_T^e(U_n)] = \int B_n^e : \frac{\partial \sigma}{\partial D} : B_n^e J_{\Gamma^e}\, dV_e^0 - \int N_n^e \frac{\partial F_e}{\partial U_n} J_s d\Gamma_e^0 \quad \text{(II-39)}$$

$$K_T = \left[\frac{\partial R}{\partial u}\right]$$

L'équation (II-39) fait apparaitre l'operateur tangent K_T. Ce dernier dépend de la loi de comportement à travers les variables d'état qui interviennent dans le calcul de la contrainte σ_{n+1} à chaque itération.

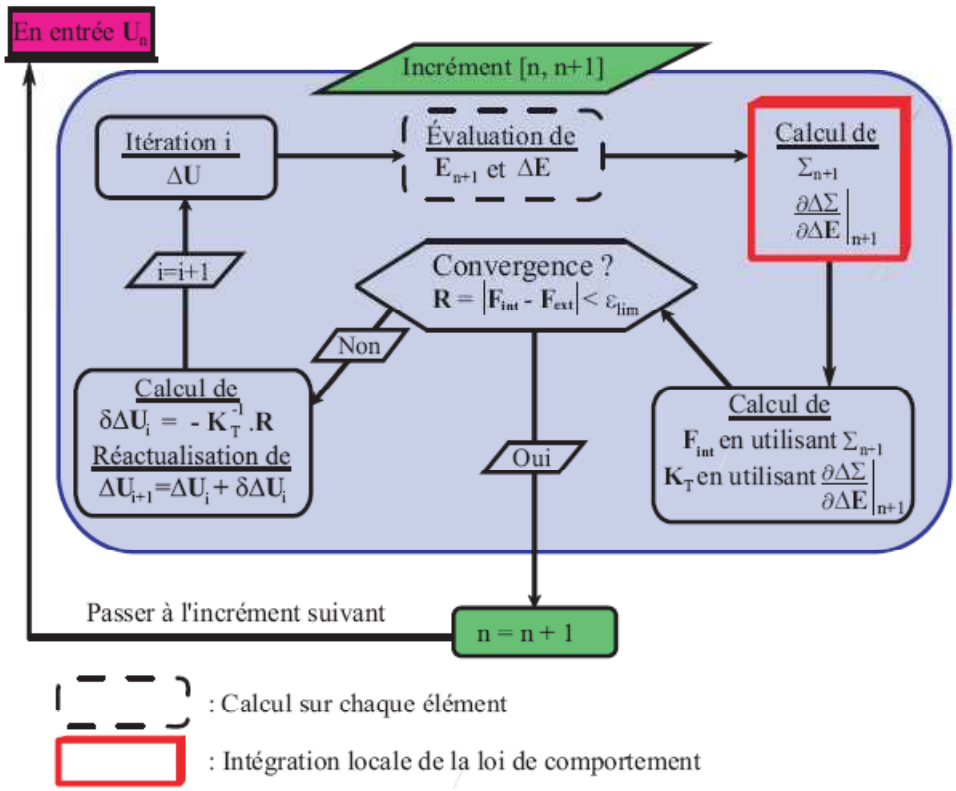


Figure (II-3) : Organisation de résolution du schéma statique implicite

Les principales étapes de résolution d'un problème mécanique dans le cas du schéma statique sont données sur la figure (II-3).

- ***Schéma dynamique explicite[9]***

A l'opposé de la méthode implicite le schéma de résolution explicite n'est pas itératif, il consiste en une résolution explicite de l'équation du mouvement. De plus cet algorithme ne nécessite pas le calcul de la matrice tangente qui peut s'avérer une tâche ardue pour certaines modèles de comportement. Cette procédure est souvent utilisée pour des forts non linéarités géométrique (déformation complexe).

L'équation (II-34) s'écrit dans le cadre d'une analyse dynamique explicite sous la forme

$$M\ddot{U} + R = 0 \tag{II-40}$$

La recherche de la solution de l'équation (II-40) dans le cadre de ce schéma dynamique utilise la méthode des différences centrées.

$$\begin{aligned} \ddot{U}_n &= M_n^{-1} R_n \\ \dot{U}_{n+\frac{1}{2}} &= \dot{U}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t_{n+1} + \Delta t_n}{2} \ddot{U}_n \\ U_{n+1} &= U_n + \Delta t_{n+1} + \dot{U}_{n+\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{II-41}$$

Il apparait des relations (II-41) que la résolution de l'équation (II-34) par Abaqus. Cette dernière peut être avantageusement diagonalisée pour optimiser le temps de calcul. La stabilité et la précision de la résolution dépendent fortement du pas de temps Δt. Une bonne estimation est proposé dans Abaqus:D t $\leq \frac{2}{Wmax}$

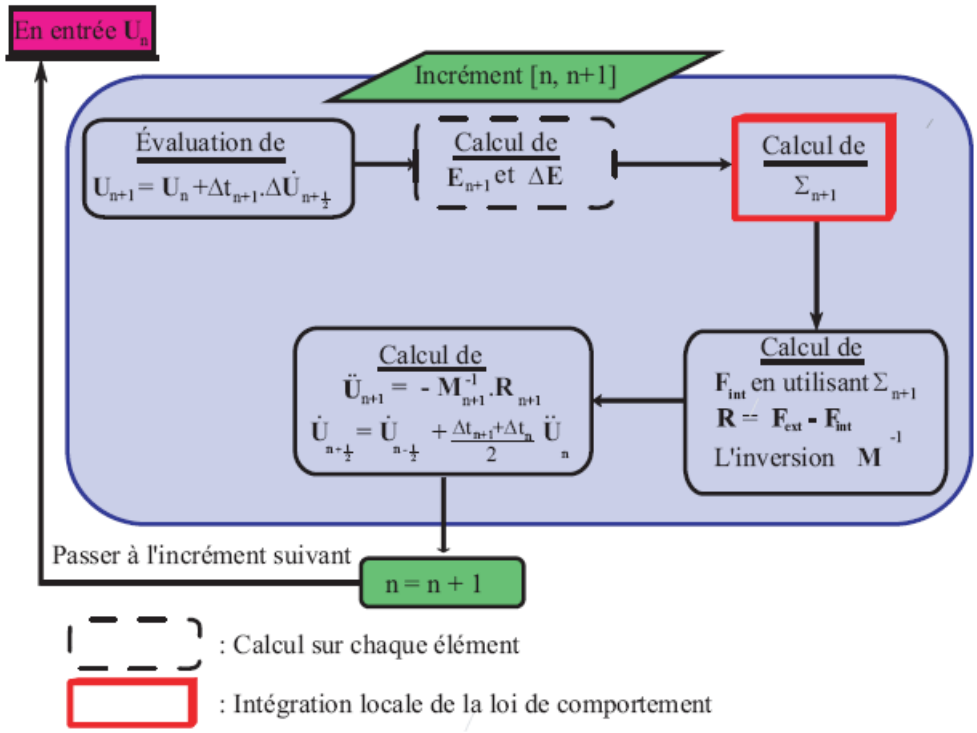


Figure (II-4) : Organigramme de résolution d'un problème mécanique en utilisant un schéma dynamique explicite

II-6-6. Comment créer un modèle dans Abaqus [25]

- **Dessiner le modèle :** le module **PART** permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans AbaqusCae, soit en les important d'un autre logiciel de dessin.
  - Dessiner le profil 2D de la forme voulue
  - Le développé en 3D
  - Rajouter les détails manquants.
- **Affecter les propriétés matériau à l'objet :** le module **PROPERTY** permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
  - Créer le matériau
  - Créer les sections sur lesquelles appliquer es matériaux
  - Affecter les matériaux aux sections correspondantes

- **Assembler le modèle :** le module **ASSEMBLY** permet d'assembler les différents objets géométriques crées dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.
  - créer les instances
  - les positionné dans le repère général
- **Définir les pas d'analyse :** le module **STEP** permet de définir toutes les requêtes pour le post traitement. Notamment le (temps) à partir duquel une force est appliqué et jusqu'a quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent a des moments données.
- **Créer les interactions entre les instances:** le module **INTERACTION** permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle ,elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, l aproximité géométrique n'étant pas suffisantes.
  - Créer les surfaces
  - Définir les types de contacts
  - Associer des surfaces avec des types de contact

- **Appliquer les conditions aux limites et les chargements :** le module **LOAD**permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il fautque les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.
  - Définir les pas d'application
  - Définir les types de CL ou chargement
- **Mailler le modèle :** le module **MESH** contient tous les outils nécessaires pourgénérer un maillage éléments finis sur un assemblage.
  - Partitionner le modèle
  - Choisir les techniques de maillage
  - Choisir les types de maille (éléments)
  - Discrétiser le modèle
  - Mailler le modèle
- **Créer et lancer un calcul :** une fois que toutes les taches de définition du modèleont été réalisées, il faut utiliser le modèle **JOB** pour analyser ce modèle.

Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post traites les résultats demandés.

- **Visualiser les résultats :** le module **VISUALIZATION** permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations…
- **Le module « SKETCH » :** ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associes à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

II-6-7. Implémentation d'une loi de comportement dans Abaqus/Explicit

- **La Vumat**

Abaqus /Explicite offre la possibilité d'implémenter des lois de comportement en utilisant la subroutine (sous-programme) appelée Vumat (User MATerial). Nous donnons dans ce qui suit la définition de quelques grandeurs (Arguments) que nous avons utilisé.

- **Système étudié**

Notre système est un assemblage formé d'un tube déformable et deux corps rigides (3D Analyti crigidshell) l'un comme appui encastré le second étant une force d'impact ; il fait subir au tube une compression axiale. On exerce un chargement de 62.5% dans bien sur le module load puis attribuer le maillage au corps déformable(tube) ,dans job on lance les calcules qui vont être visualiser en graphes dans le chapitre suivant.

L'image ci-dessous le montre.

Remarque:

Le corps analyticrigid ne se mesh pas car il se déforme jamais, comme il est préférable de mailler le corps déformable séparément .

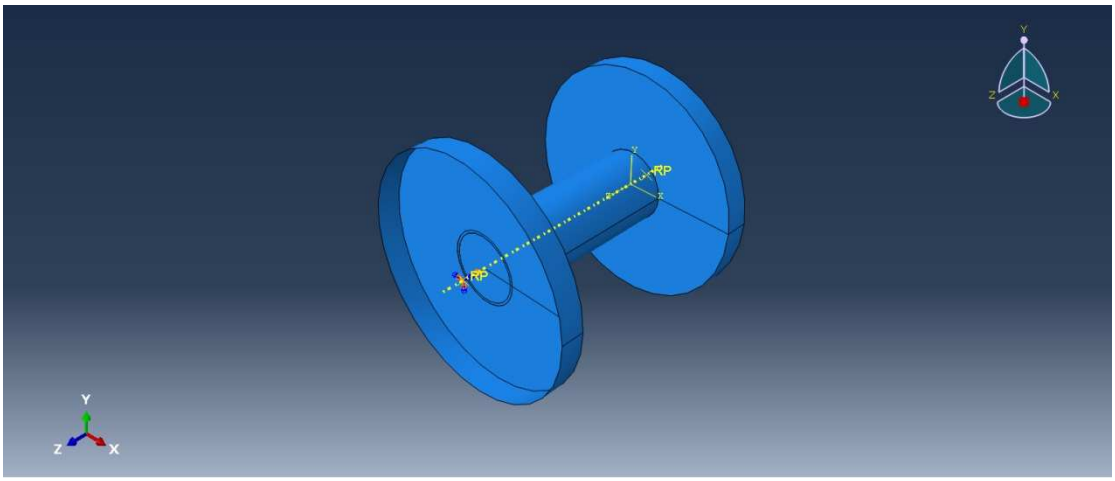


Figure (II.5) : Assemblage constitué du tube déformable et deux corps rigides.

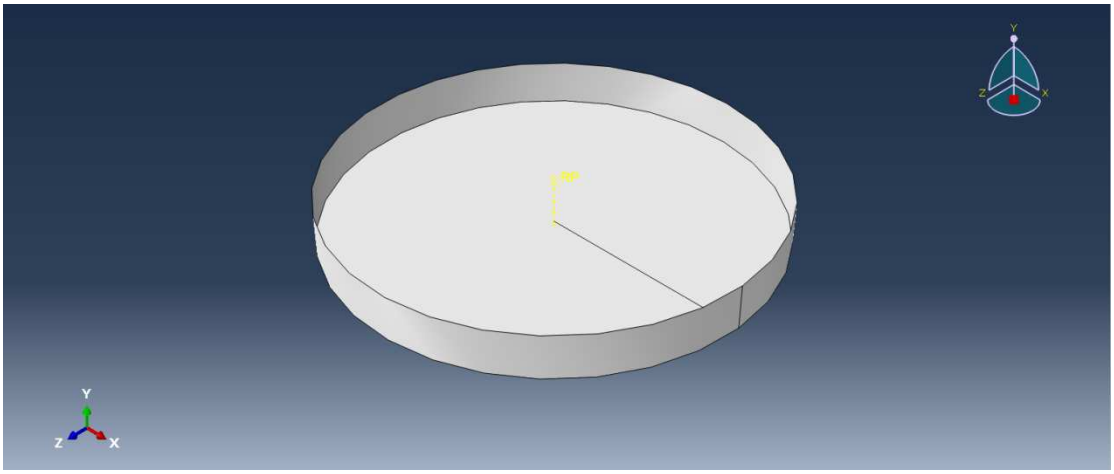


Figure (II-6) : Corps rigide (indéformable).

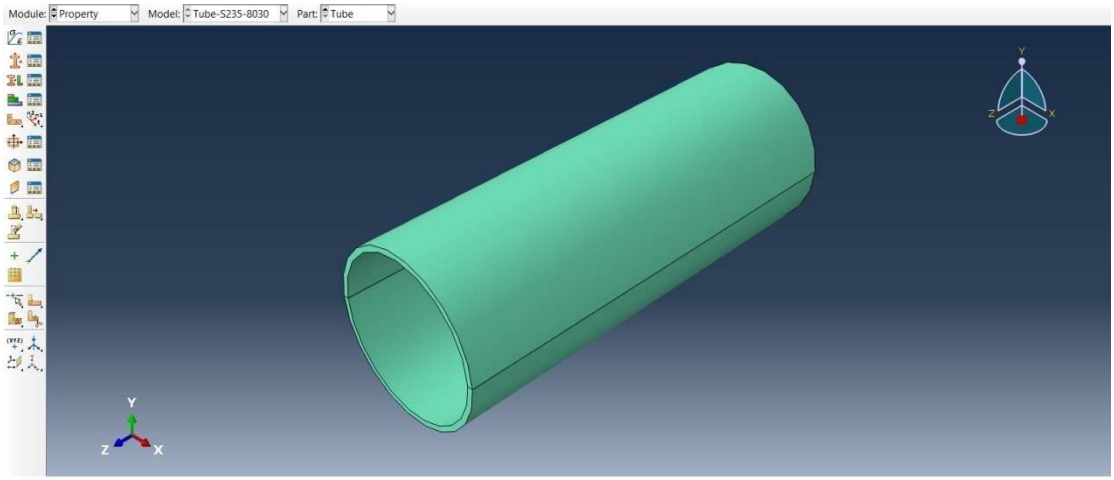


Figure (II-7) : Tube déformable en acier.

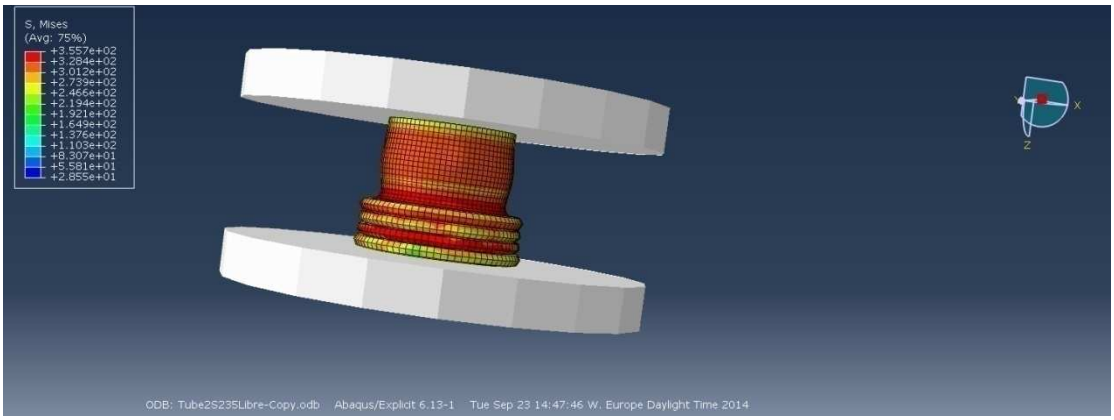


Figure (II-8) : Tube déformable en acier après déformation.

III-1. Introduction

Nous traitons dans ce chapitre l'étude numérique de la réponse des structures tubulaires en acier doux. Les simulations numériques sont réalisées en utilisant la loi de comportement de Johnson Cook.
Cette modélisation nécessite l'introduction des coefficients et des constantes propres à loi de comportement cela ne peut pas se réaliser qu'après connaissance des propriétés mécaniques de chaque phase de cet acier (acier traité).

Notre matériau se décompose en deux couches totalement différentes au niveau des propriétés mécanique et composition chimique la première couche cémentée (surfacique) à différentes épaisseurs et la deuxième est l'acier doux S235. Différentes configurations géométriques sont considérées dans cette étude.

L'analyse des résultats nous permettra d'évaluer les limites de cette approche expérience/numérique de l'absorption d'énergie dans le butde proposer des perspectives pour son amélioration afin de focaliser son utilisation soit dans la carrosserie ou autre.

L'analyse des résultats nous permettra d'évaluer les limites de ce modèle dans le butde proposer des perspectives pour son amélioration afin de focaliser son utilisation soit dans la carrosserie ou autre.

III-2. Dimensions et nuances des tubes en acier doux utilisées

Eprouvette tubulaire circulaire en acier doux E235 (TU37b)
Longueur : L = 80 mm
Diamètre extérieur : D = 30 mm
Diamètre intérieur : d = 28 mm
Epaisseur : e = 1 mm

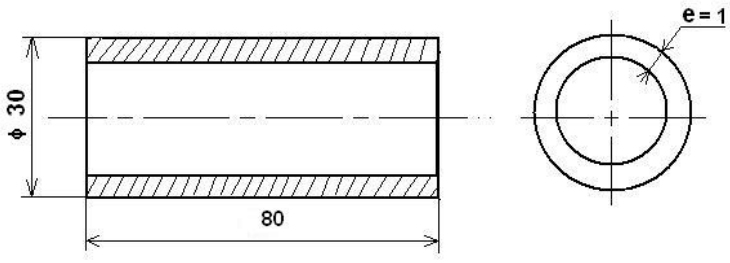


Figure (III-1) :Eprouvette tubulaire circulaire

- **Configurations géométriques utilisées**

On a utilisé quatre configurations pour chaque épaisseur donnée c'est-à-dire ; les tubes cémentés à 0.1mm on aura besoin 04 tubes

- ✓ Le premier est libre sans traitement (compression axiale).
- ✓ Le deuxième cémenté à 0.1mm sur la totalité de la surface du tube.
- ✓ Le troisième sera cémenté verticalement avec de trois bandes de largeur 4.71mm
- ✓ Le dernier sera cémenté de la même manière que troisième mais avec quatre bandes de largeur 3.53mm.

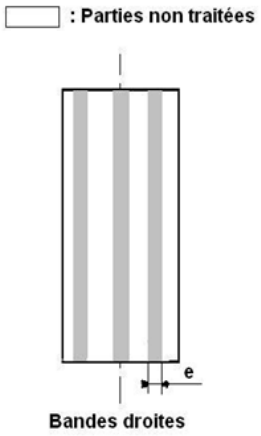


Figure (III-2) : Configuration géométrique cémentée

- **La composition chimique de cet acier:**

C	Mn	Si	S	P
≤ 0,17	≤ 1,20	≤ 0,35	≤ 0,035	≤ 0,030

- **La norme suivie :**

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

EN 10297-1	E 235
Ancienne désignation	TUE 220A / TU 37 B (NFA 49-112) St 37.0 (DIN 1629 / 2448)
EN 10210-1	S 235 JRH

- **Caractéristiques mécaniques:**

Epaisseur 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

- **Tolérance**:

EN10297-1

$$\emptyset_{extérieure} : \pm 1\% \ (mini \ \pm 0.5mm)$$

- **Propriétés mécaniques de différents stades du matériau étudié :**

a- S235

On a opté pour cet acier qui est connu avec le module de Young suivant E= 205 000MPa, la limite élastique de 270MPa et la limite à la rupture est de 470MPa avec l'allongement de 26%.

b-S235 cémenté à 0.1mmd'épaisseur.

Dans ce cas on constate l'augmentation du module de Young E=215 250MPa ainsi la limite d'élasticité R_e=364.5MPa et la diminution de la limite à la rupture R_m= 449.15PMa et aussi l'allongement A% =21%.

c- S235 cémenté à 0.2mmd'épaisseur.

Dans ce cas on déduit l'augmentation de toutes propriétés mais à part l'allongement qui continue la diminution A%=17%. R_e=485.5MPa,R_m= 810PMaet E=235 750MPa.

D'où A=490 ;B=768 ;n=0.55.

L'introduction de ces paramètres dans le code du calcul dans Abaqus nous permet de voir les résultats suivants :

III-3. Identification des constantes de loi de comportement de Johnson Cook

En comparant les résultats numérique avec ceux obtenus expérimentalement puis on déduit les paramètres lié à l'écrouissage A,B et n en température ambiante sur un essai quasi statique, sous un chargement lent .L'aspect de viscosité est une fonction logarithmique de la vitesse de déformation pour la gamme rapide.

En supposant $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl} = 1$ d'ou li nous reste just l'écrouissage

$$\sigma(\bar{\varepsilon}^{pl}, \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}, T) = \left(A + B\left(\bar{\varepsilon}^{pl}\right)^{n}\right)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_{0}}\right)$$

3.1Résultats expérimentaux.

- **Energie**

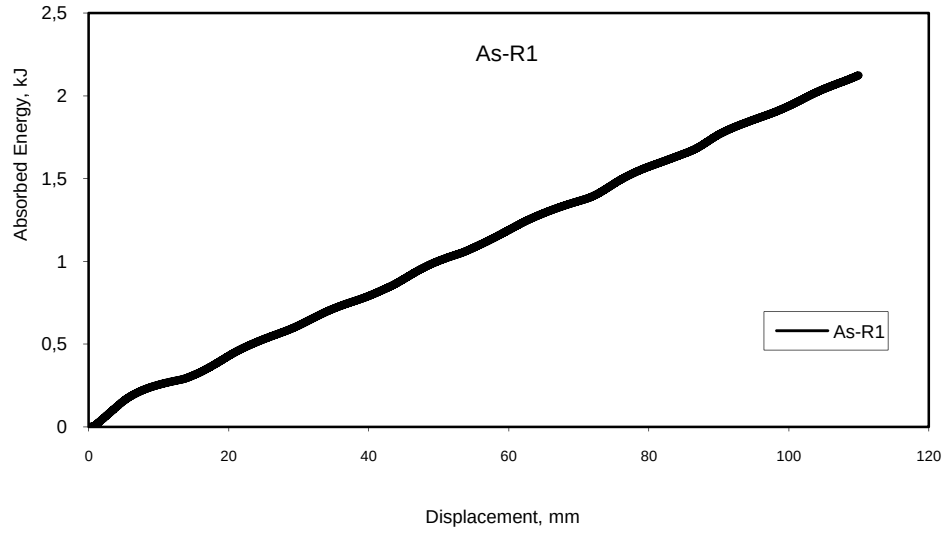


Figure (III.3) : Courbe expérimentale d'énergie, déplacement de l'acier sans traité lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique.

- **Force.**

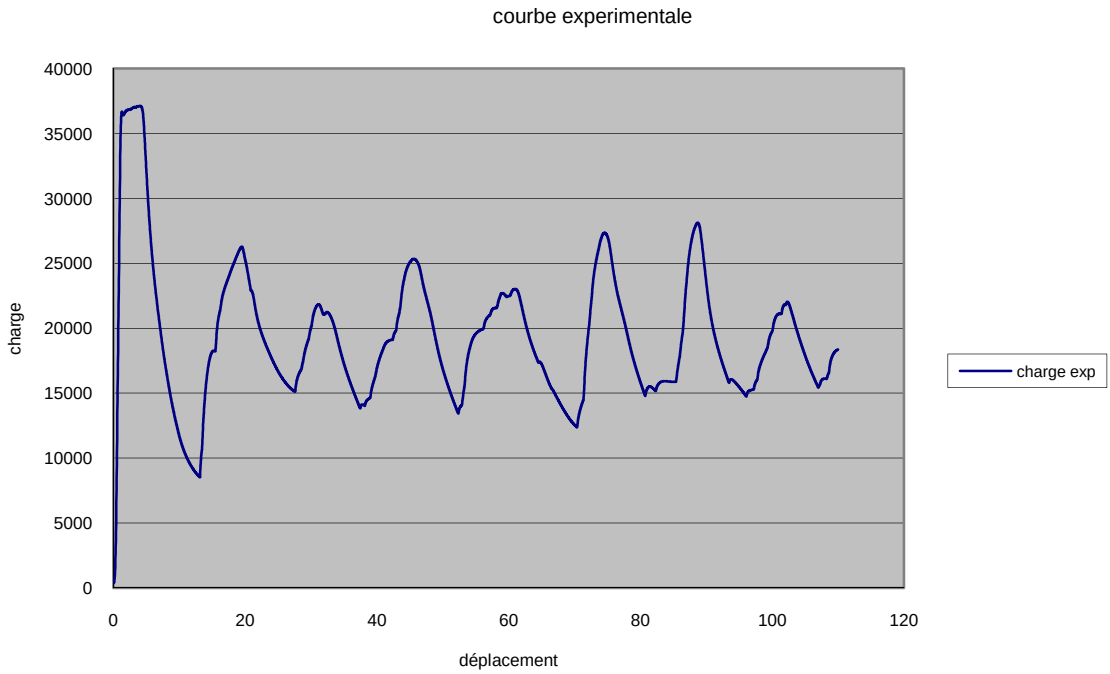


Figure (III.4) : Courbe charge, déplacement de l'acier sans traité lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique.

3-2. Validation du modèle numérique.

. S235 (acier brute)

Nous allons débuter ce chapitre de résultats avec la présentation des courbes de force et de l'énergie obtenus numériquement. Puis on fera une comparaison avec ceux expérimentaux.

Premièrement on fait subir à un tube mince(R /e)=15mm une compression axiale de 62.5% suivant u_3 le résultat se traduit selon les courbes de force et de l'énergie ci-dessous :

- **Force:**

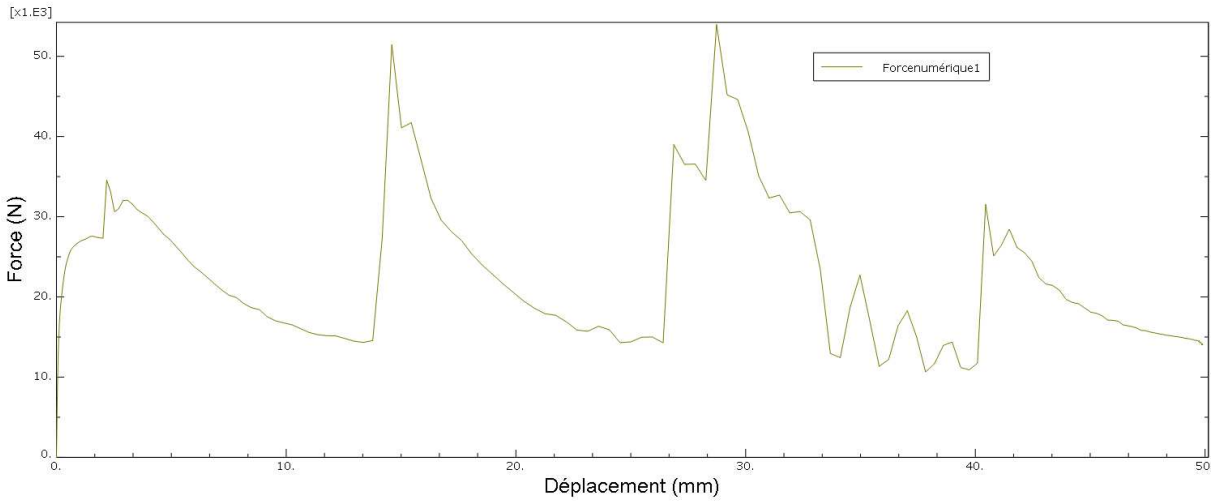


Figure (III.5) : Courbe numérique charge, déplacement de l'acier sans traité lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique.

- **Energie**

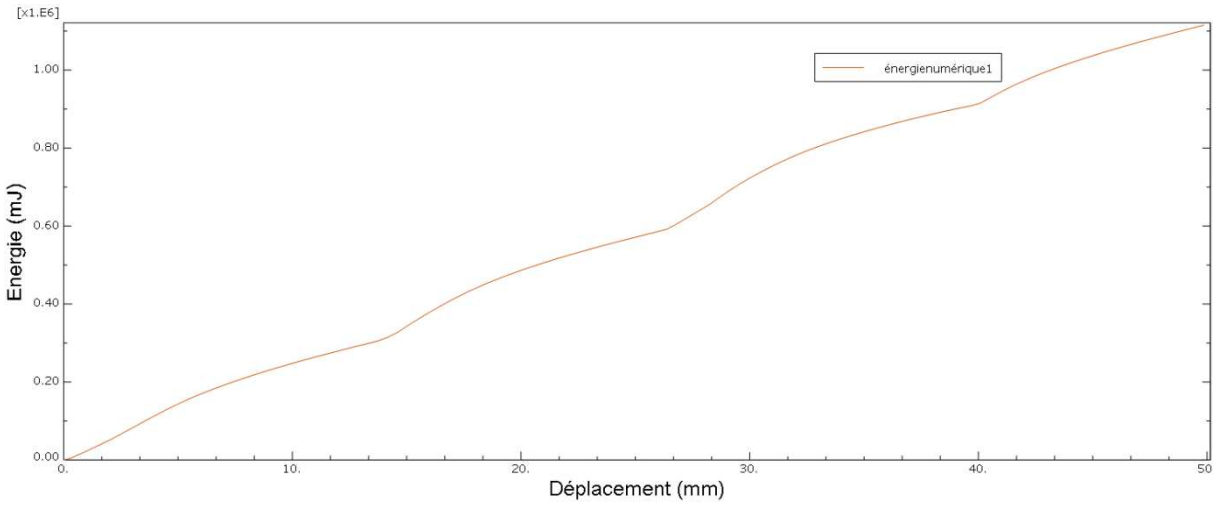


Figure (III.6) : Courbes énergie, déplacement de l'acier brut lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

- **Energie**

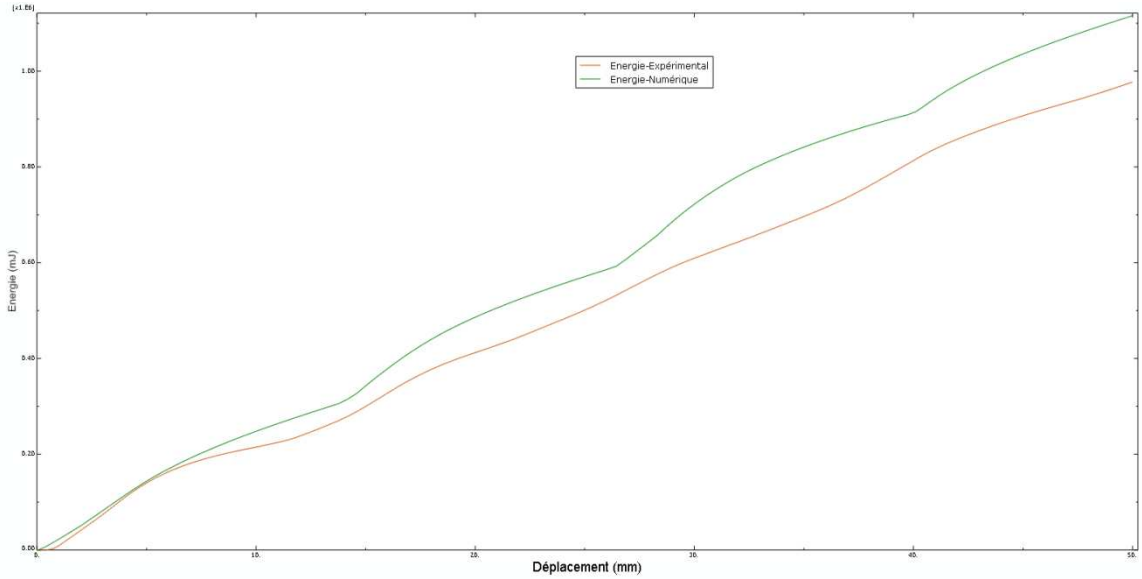


Figure (III.7) : Comparaison de l'évolution des courbes énergie, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mm, et la courbe expérimentale lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique

- **Force**

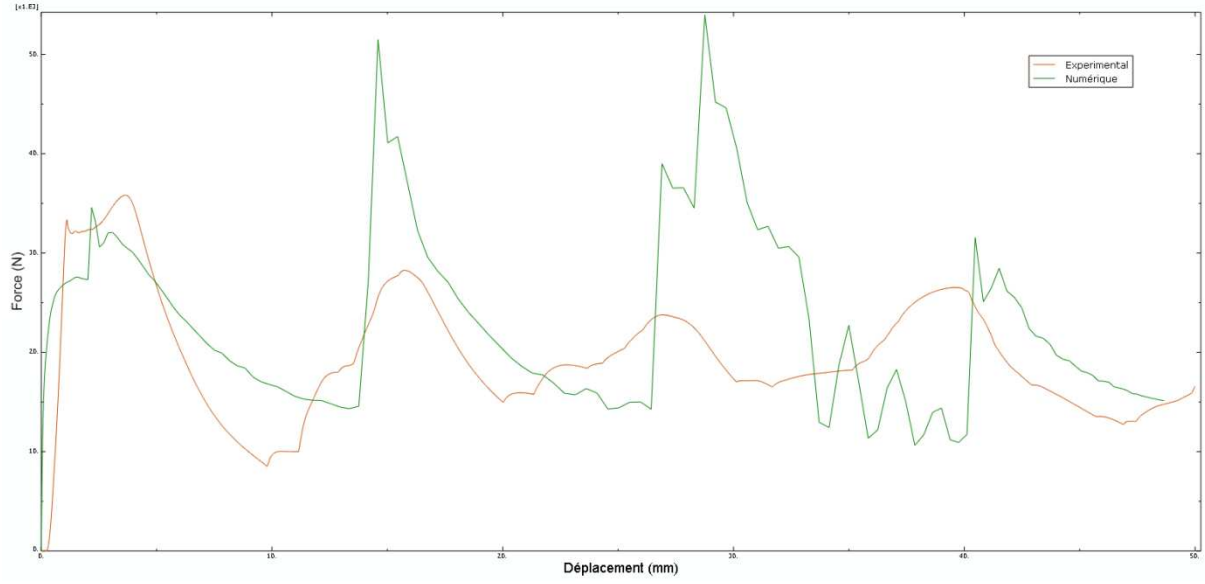


Figure (III.8) : Comparaison de l'évolution des courbes force, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mm, et la courbe expérimentale lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

Discussion:

L'allure numérique est de nature oscillatoire comme l'expérimentale au début, elle manifeste les propriétés mécaniques inferieur à celle de l'expérimentale avec A=370,B=522 et n=0.31 on remarque clairement l'augmentation de la capacité d'énergie absorbée qui l'air balayé par chaque courbe.

III-4. Optimisation de l'absorption d'énergie en variant l'épaisseur traitée et la configuration géométrique.

III-4-1. L'épaisseur

Dans ce contexte ,on maintiens les tubes dans des bain afin de stimuler la diffusion du carbone en respectant bien la température qui 'est de 600 à 960C°(cémentation)après avoir déterminer le temps qu'il faut pour atteindre 0.1mm et 0.2mm de et puis on compare l'énergie et la force du chargement avec de l'acier brut .

- **Force**

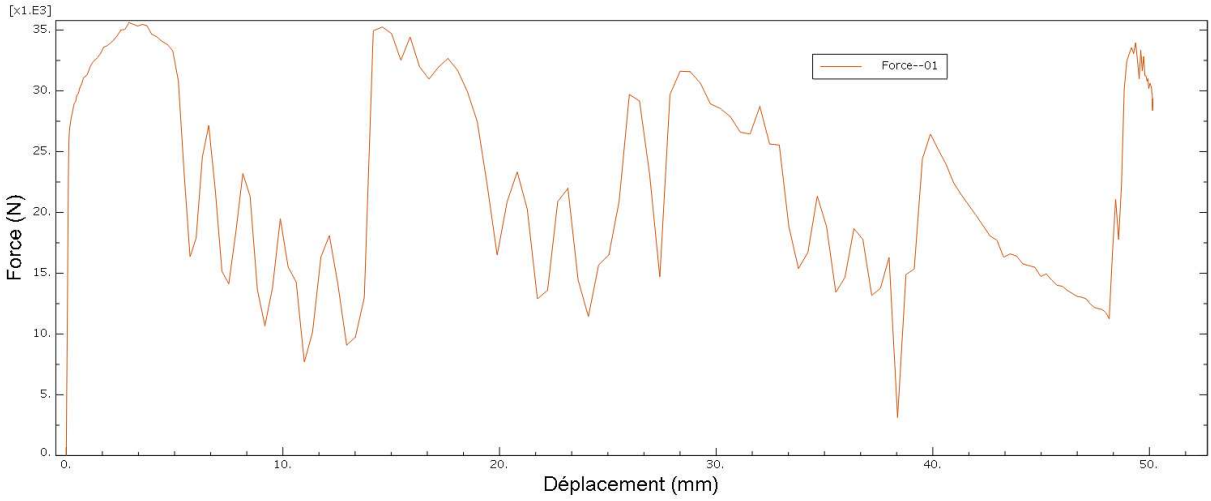


Figure (III.9) : Courbe charge, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mmlors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique.

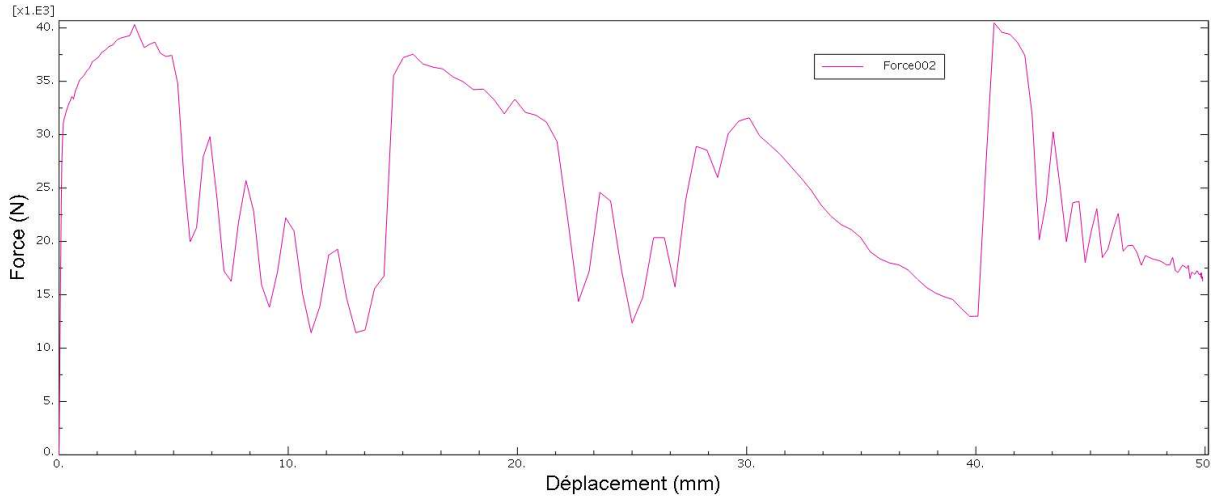


Figure (III.10) : Courbe charge, déplacement de l'acier cémenté à 0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique.

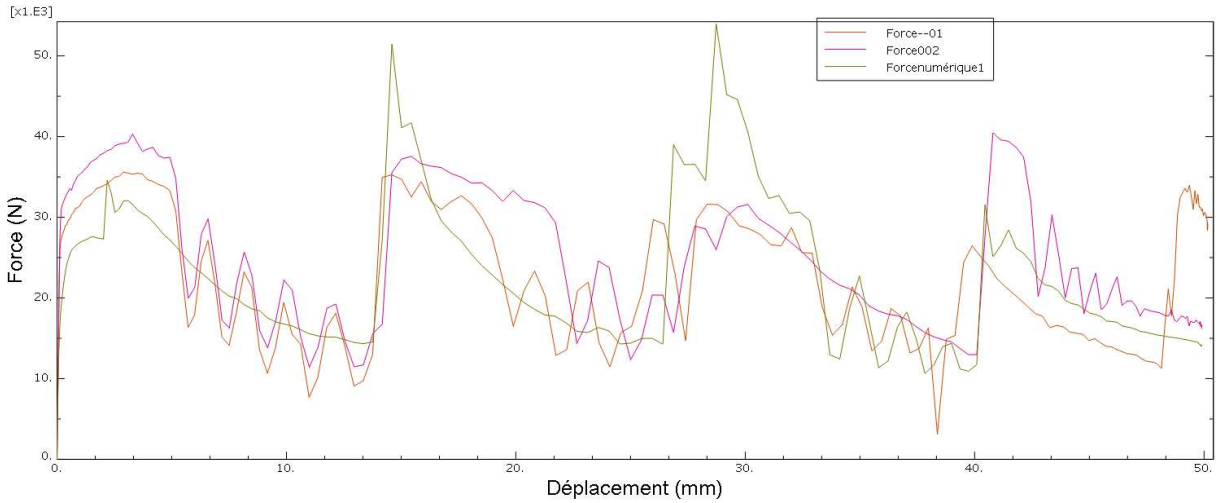


Figure (III.11) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à0.1,0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique sous mode axisymétrique.

Discussion des résultats:

L'allure de l'ensemble des graphes charge déplacement enregistrés est conforme aux observations expérimentales obtenus auparavant.

En analysant nos résultats numériques; nous constatons l'évolution de nature oscillatoire due à l'instabilité plastique. Aussi présentation de deux phases; la première est linéaires qui caractérise le comportement élastique du matériau terminé par un pic .La deuxième phase débute par la diminution prononcée de la charge décrivant l'entrée en plasticité du tube, ce parcours caractérise le premier pli (pliage de la paroi)du tube lors d'écrasement.

Au sujet de l'énergie absorbée, les courbes de charge en fonction de la longueur écrasée nous montrent clairement l'évolution de cette énergie selon l'épaisseur traitée c'est à dire tant que l'épaisseur traitée est grande l'énergie absorbée est importante ça se confirme par l'aire balayée par la courbe charge déplacement.

Jusqu'à maintenant l tube de 0.2 mm cémenté nous confie le meilleur résultat qui va être confirmé par la courbe d'énergie en bas.

L'épaisseur est un paramètre important dans l'absorption des énergies.

- **Energie:**

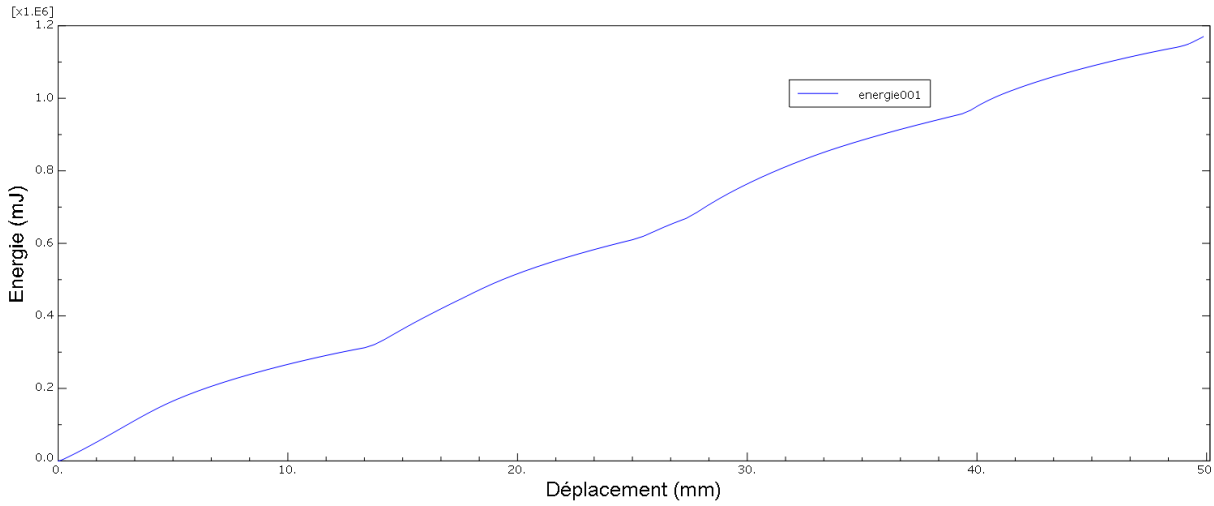


Figure (III.12) : Courbe énergie, déplacement de l'acier cémenté à 0.1mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

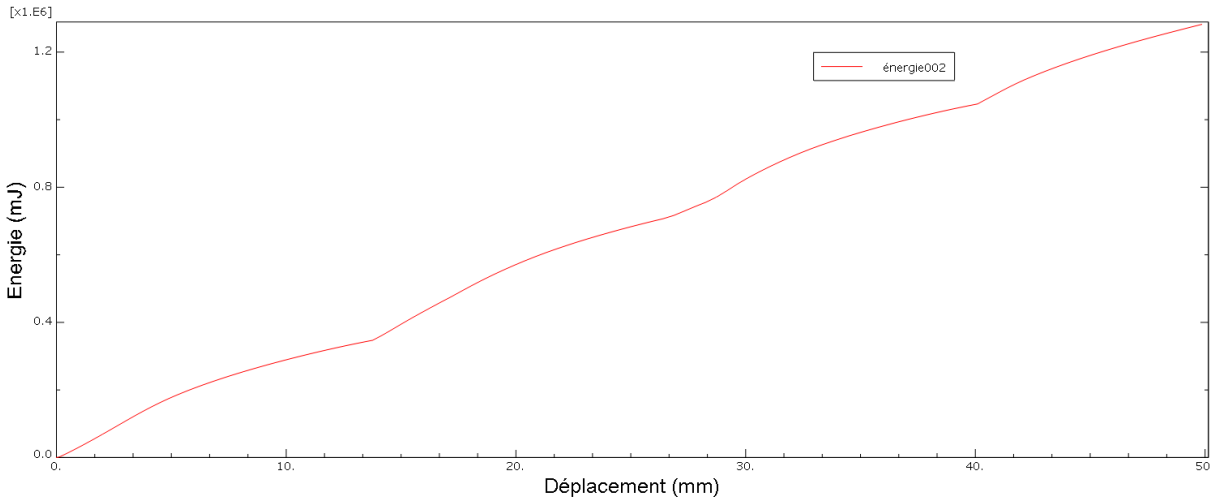


Figure (III.13) : Courbe énergie, déplacement de l'acier cémenté à 0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

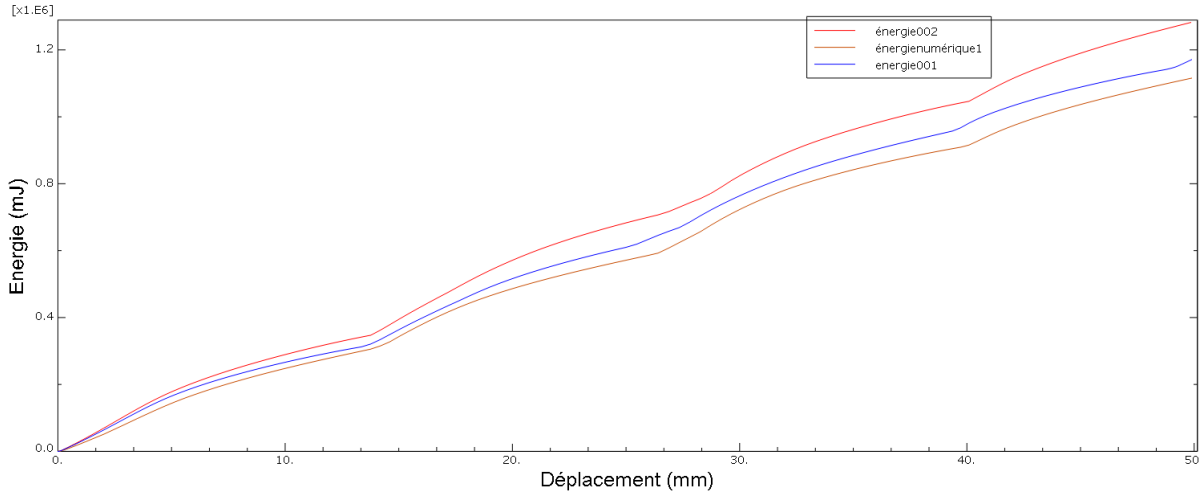


Figure (III.14) : Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier brut et traité à0.1 et 0.2mm lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique**.**

Commentaire:

Le critère tiré en haut à propos de l'épaisseur dans la figure (III.11) est confirmée par la figure (III.15) d'où les parois cémentées à 0.2mm nous offre l'augmentation d'absorption de presque 20% au brut selon la courbe en haut.

III-4-2. Configurations géométriques

On va attribuer à des tubes cémentés deux configurations géométriques distinctes grâce aux dépôts électrolytiques de cuivre or enrobages spéciaux; ils ont réalisé 3 bandes verticales pour et le second 4bandes verticales.les résultats numériques de ces géométries seront présentés graphiquement.

- **Force**

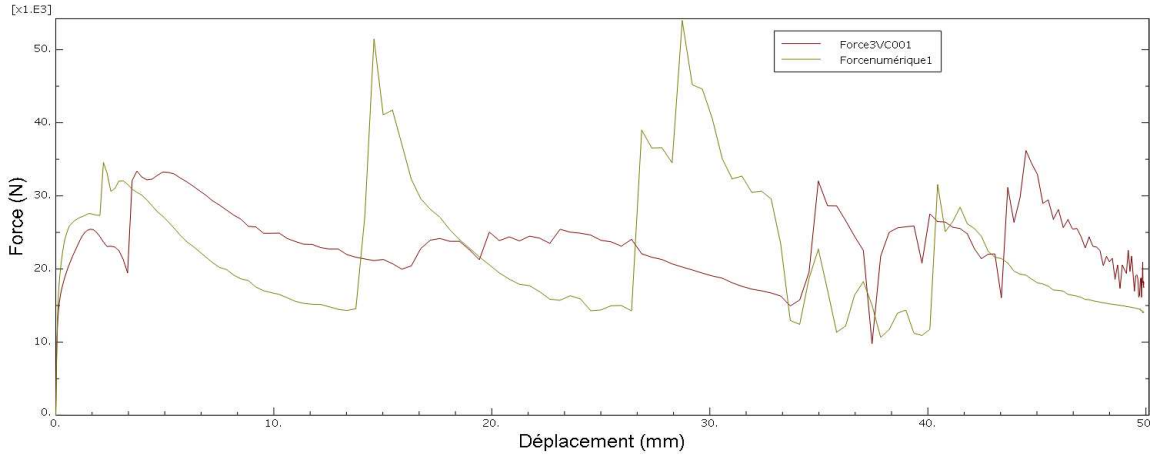


Figure (III.15) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à0.1 avec 3V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

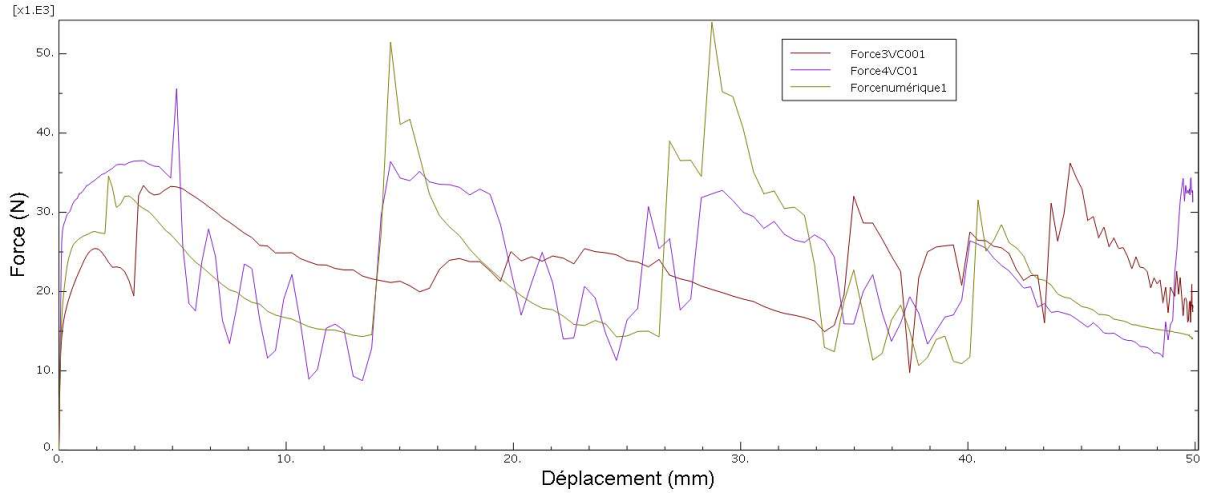


Figure (III.16) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à 0.1 avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

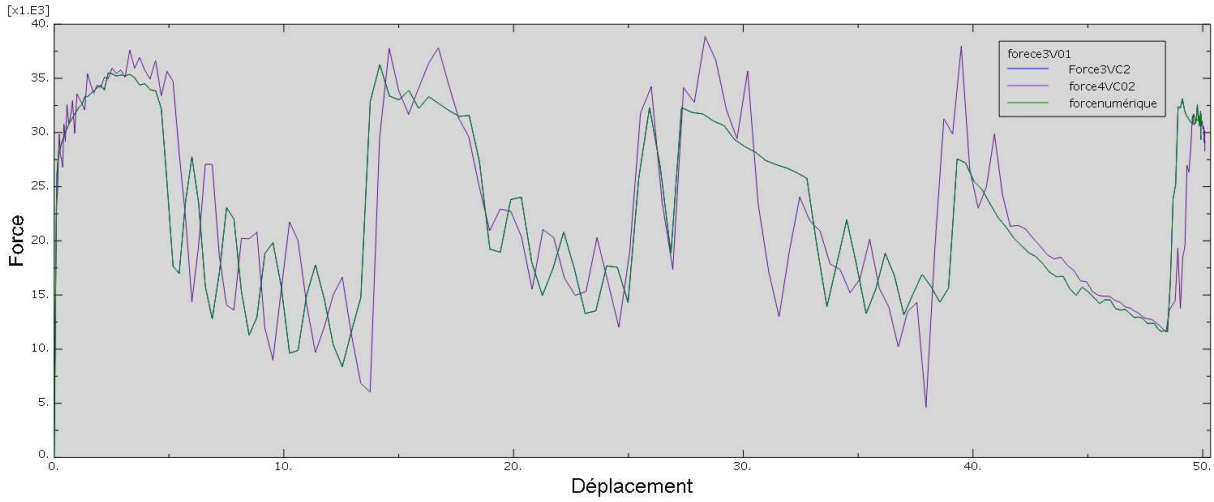


Figure (III.17) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à 0.2 avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique

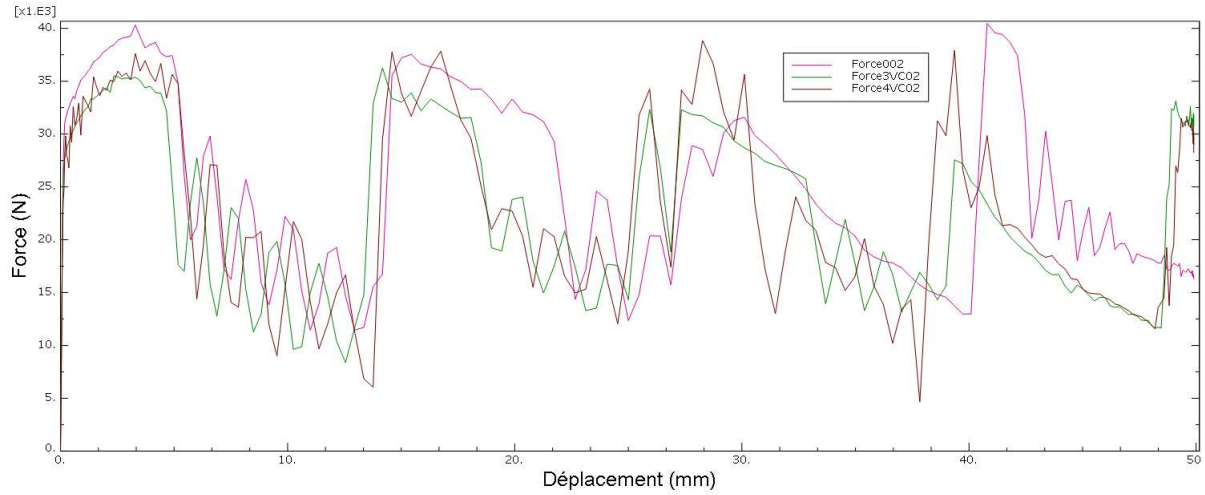


Figure (III.18) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut et traité à 0.2 avec 4V et0.2mm avec 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

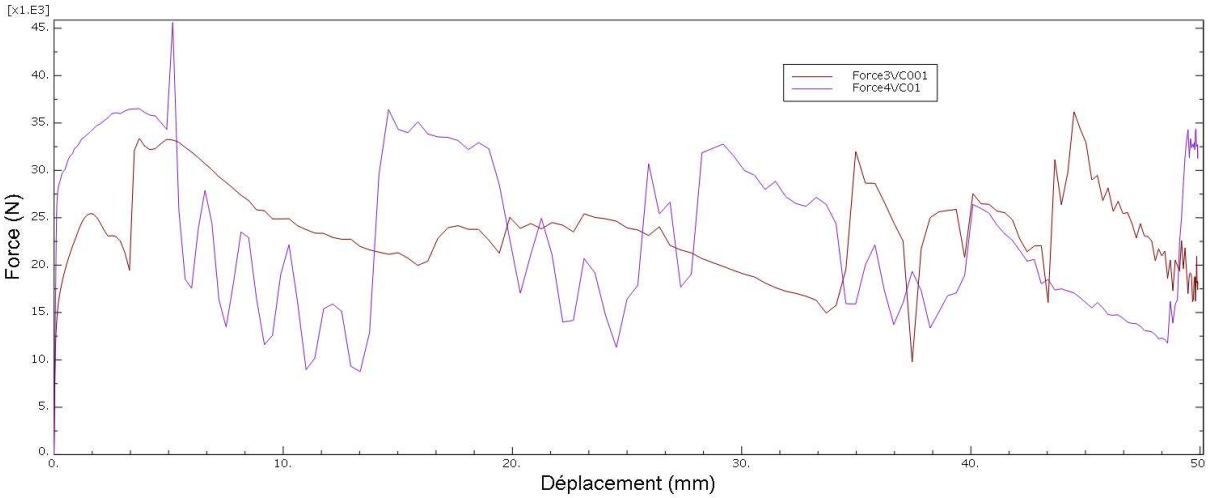


Figure (III.19) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à 0.1 avec la configuration 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

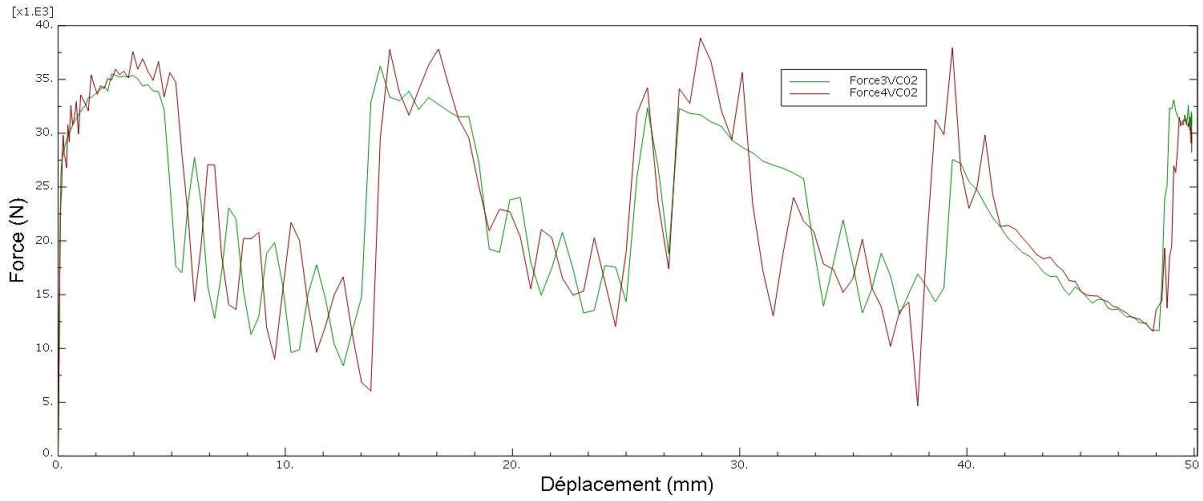


Figure (III.20) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à 0.2 avec la configuration 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

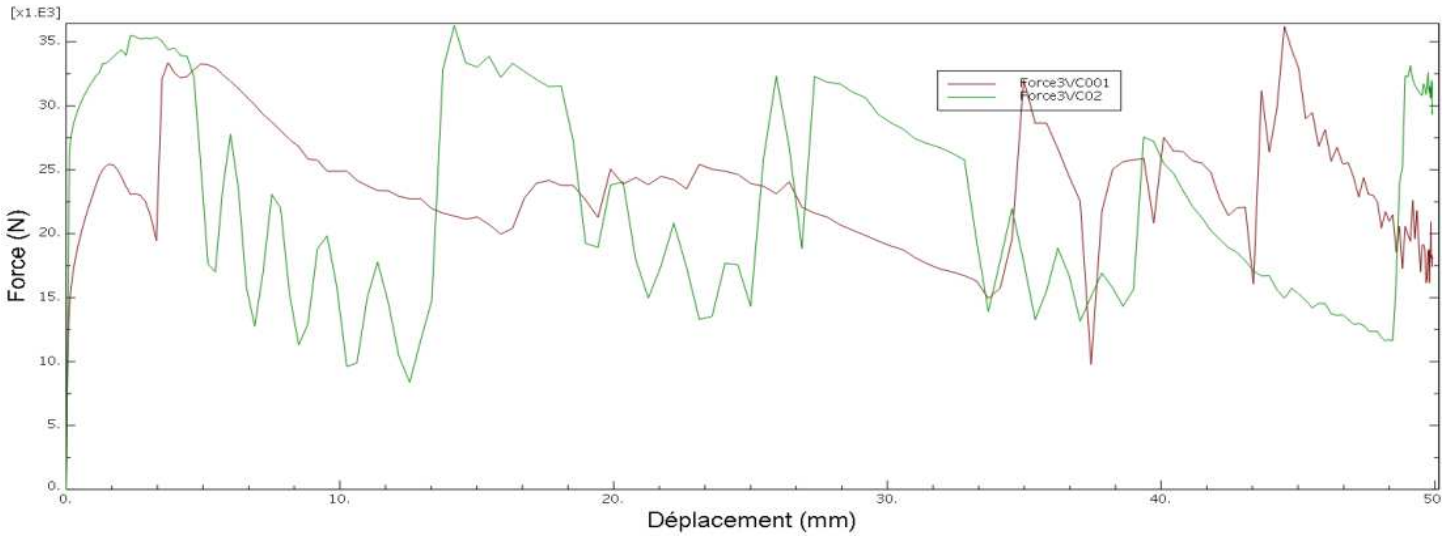


Figure (III.21.a) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à0.1 et 0.2mm avec la même configuration géométrique (3V)lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

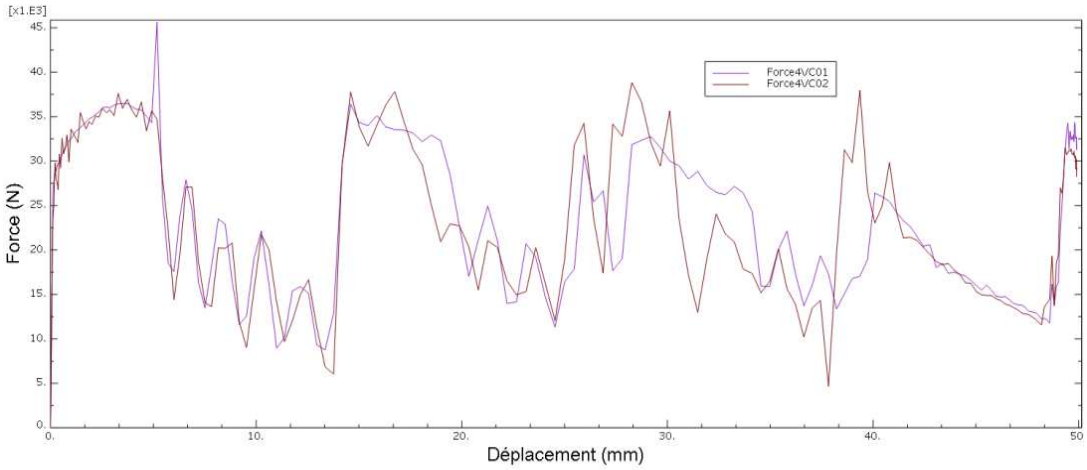


Figure (III.21.b) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à0.1 et 0.2mm avec la même configuration(4V) géométrique lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

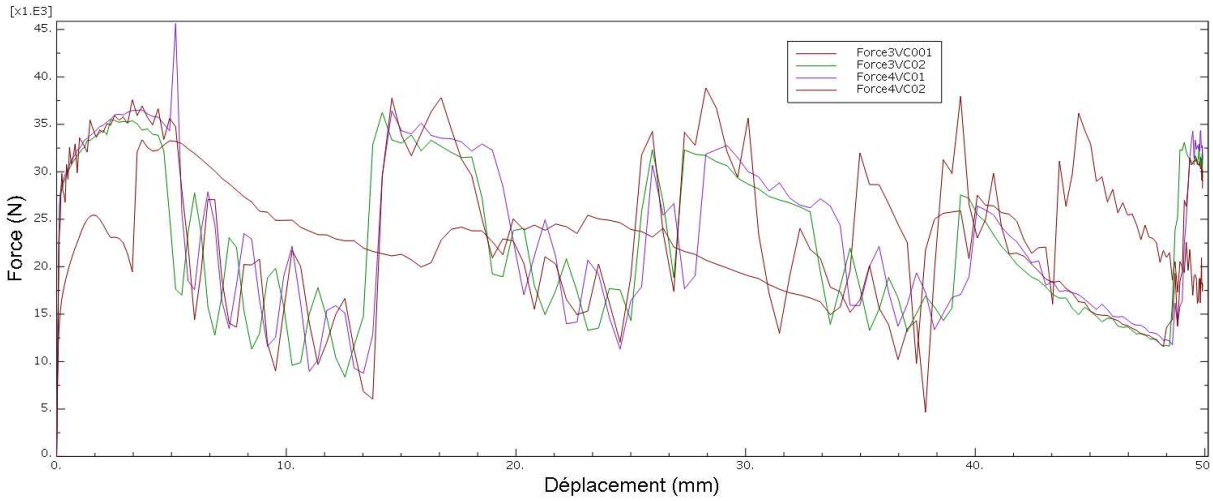


Figure (III.22) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2mm avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

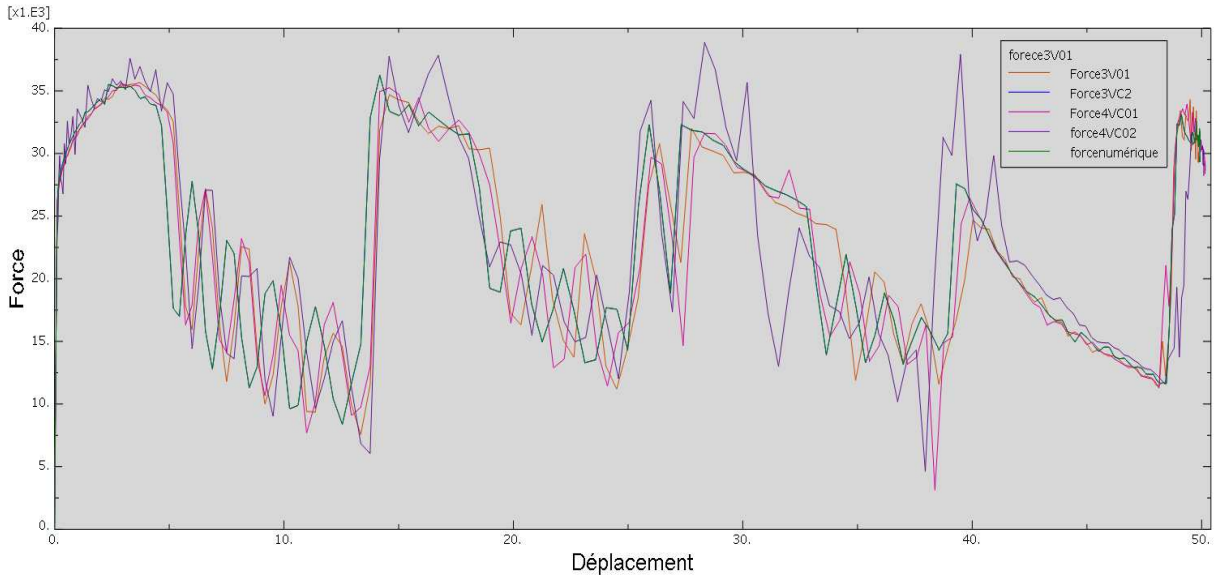


Figure (III.23) : Comparaison des Courbes charge, déplacement de l'acier brut S235 et traité à 0.1 et 0.2mm avec 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

Discussion

L'allure des graphes charge-déplacement nous donne le mode de déformation ainsi le nombre de plis quand il s'agit du mode axisymétrique. Toutes les courbes manifestes le même mode (axisymétrique) qui est idéal dans ce contexte excepté 3V0.1mm. Ceci implique que la configuration n'influe pas sur le mode de déformation en quasi-statique.la figure III.17 nous offre la colinéarité de la force numérique et la configuration 3VC0.2

- **Energie**

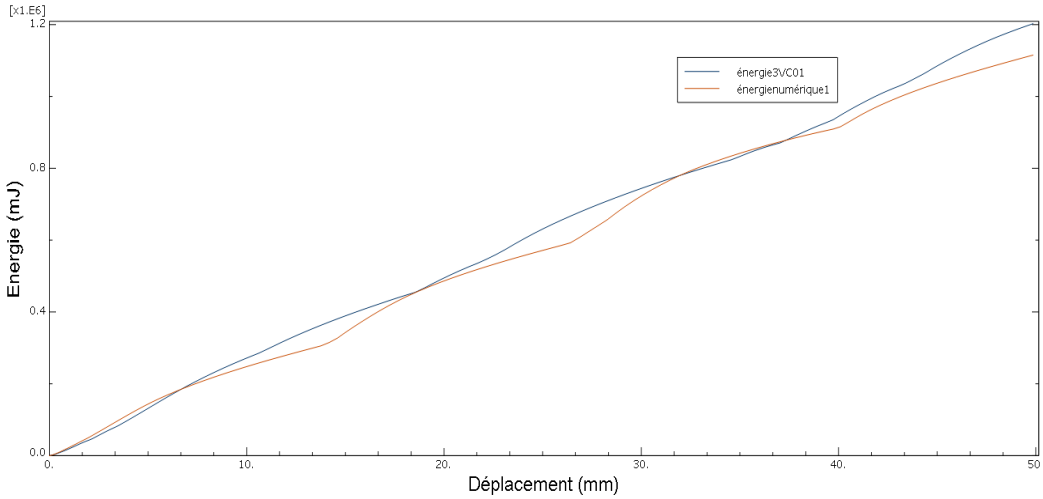


Figure (III.24) : Comparaison des Courbes énergies, déplacement de l'acier brut et traité à 0.1avec configuration de 3V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

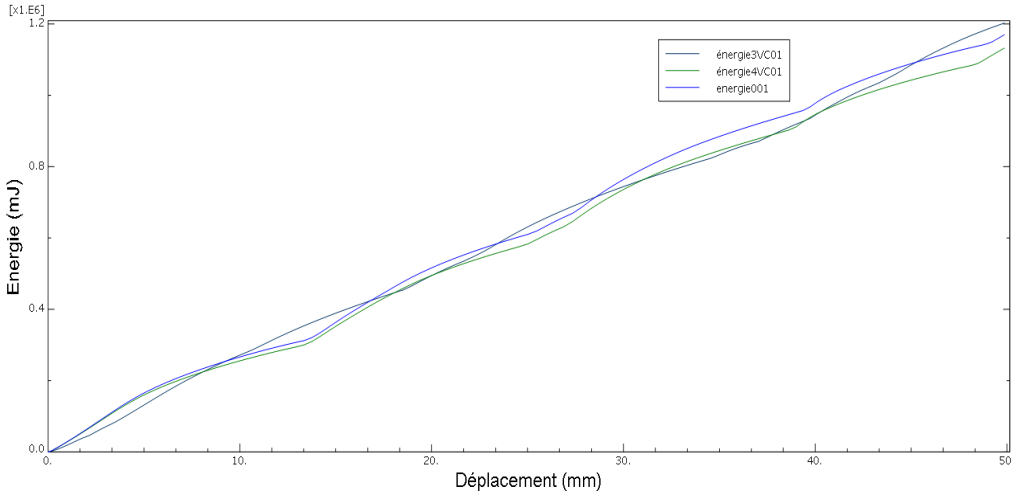


Figure (III.25) : Comparaison des Courbes énergies, déplacement de l'acier brut et traité à 0.1avec configuration de 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

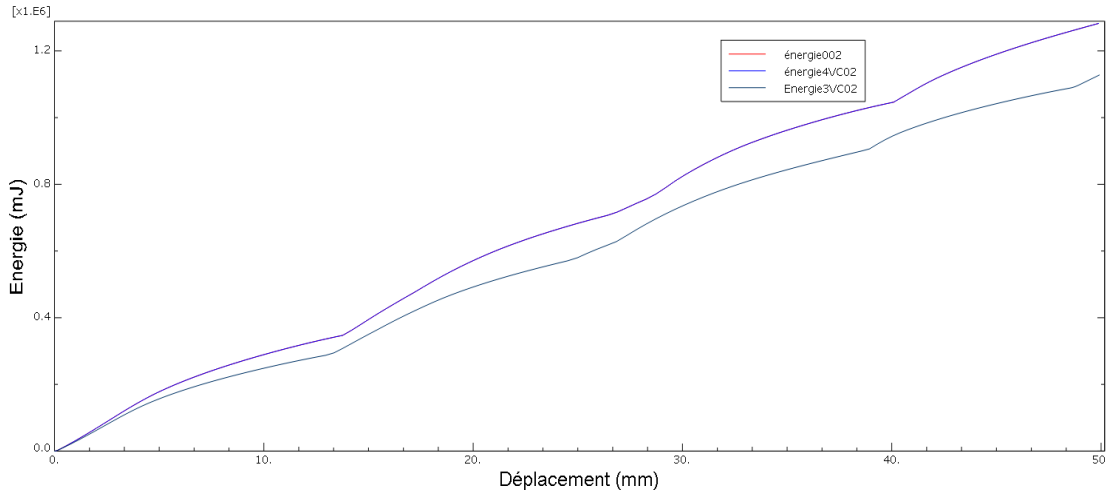


Figure (III.26) : Comparaison des Courbes énergies, déplacement de l'acier cémenté 0.2 avec deux configurations 3V et 4V lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

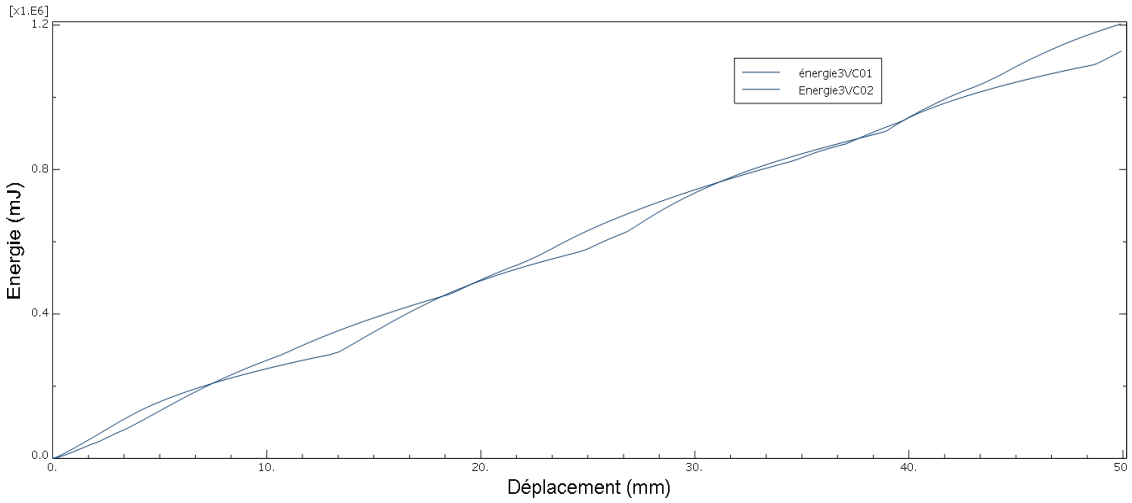


Figure (III.27) : Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2 avec la même configuration(3V) lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

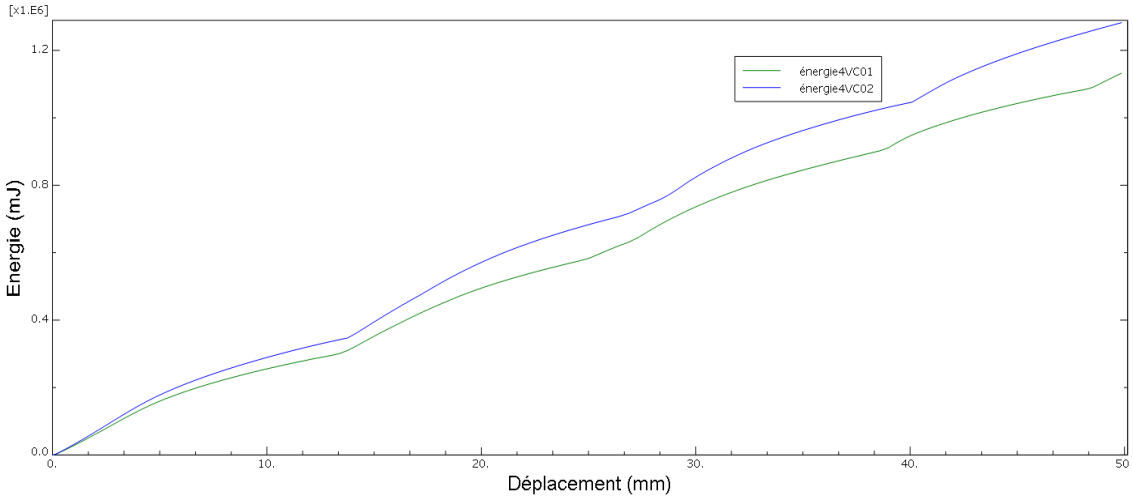


Figure (III.28) : Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2 avec la même configuration(4V) lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

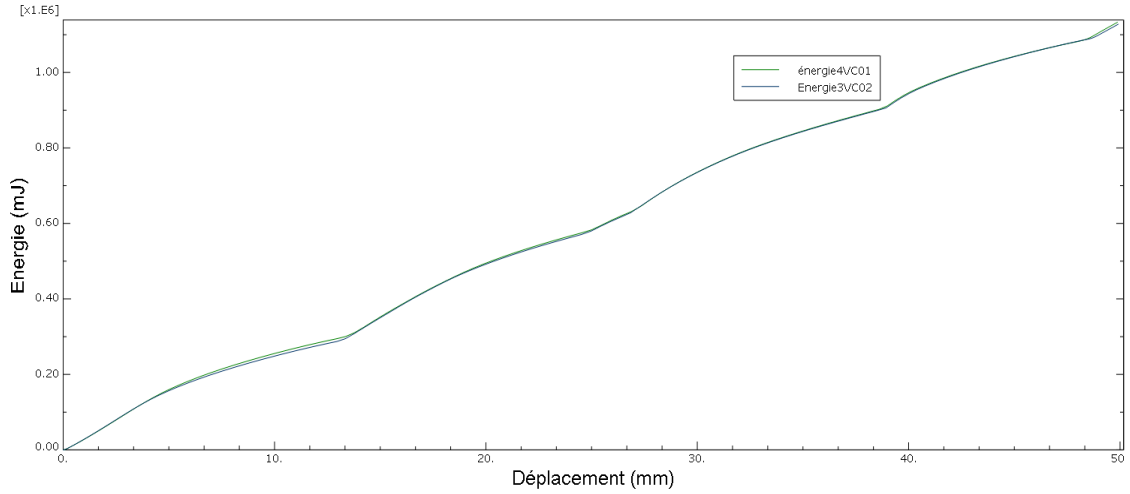


Figure (III.29) : Comparaison des Courbes énergie, déplacement de l'acier traité à 0.1 et 0.2 avec différentes configurations (3V) et (4V) lors d'un écrasement uniaxial en quasi statique.

Discussion:

Les courbes charge-déplacement ont la même allure oscillatoire prouvée par d'autre référence bibliographique et aussi l'expérimental mais à part la courbe de configuration 3V 0.1mm qui présente une particularité ;cette particularité est engendrée par un mode d'écrasement différent des autres (axisymétrique) .Par conséquence la configuration géométrique a une influence sur la nature oscillatoire des courbes ainsi le mode de déformation.

La configuration 3V ne présente pas l'intérêt de la cémentation (légère absorption de choc).

Selon les courbes d'énergie on opte de classer la totalement traitée avec0.2mm et la 4V0.2mm étant meilleurs dans l'absorption d'énergie en quasi-statique. Il nous reste la totalement traitée à 0.1qui nous donne une petite amélioration à la courbe numérique (acier sans traité); elle est très proche de 3V0.1mm.Aprés l'étude comparative on voit que les résultats fournis par 3V0.2mm et 4V 0.1mm sont identiques.

La cémentation de 0.2mm et la configuration de 4V nous offre une augmentation de 20% d'énergie absorbée par rapport à l'acier non traité.

Dans figure III.25 et la figure III.28 on remarque la colinéarité totale des courbes d'énergie 4V0.1mm et 3V 0.2 mm, 0.2 mm et 4V 0.2mm.

Remarque:

Afin de maximiser l'absorption d'énergie ;il faut savoir choisir l'épaisseur, une configuration géométrique puis obtenir le mode axisymétrique.

III-5. Conclusion

L'étude numérique marque son intérêt une fois référenciée à l'expérience car; elle nous a permis de connaitre le rôle et l'intérêt de la cémentation dans le domaine d'absorption d'énergie dans la gamme de petite déformation avec vitesse $\dot{\bar{\varepsilon}} = 3.75\ 10^{-3} s^{-1}$.Sélectionner la configuration de 4V 0.2 étant la meilleur pour montrer l'intérêt de la cémentation en quasi statique. Cette approche numérique nous permit aussi de prévoir le nombre de plis de la structure tubulaire.

CONCLUSION GENERALE

Ces travaux à caractère purement numérique (14etudes faites dont 07 ont donné de résultats très satisfaisants) ont pour le bute de cerner le paramètres géométriques afin de réaliser les assemblages (fichier étudié),aussi les paramètres mécaniques pour attribuer la loi de comportement et la mettre en évidence ainsi réaliser le phénomène du flambement. Compte tenu de la complexité de la tâche et manque de quelques données, une importante compagne d'essais s'effectués.

La démarche proposé est consisté en premier lieu le comportement du flambement de la structure tubulaire à section circulaire en chargement uniaxial sous régime quasi -statique .les principaux enseignements issue de cette simulation sont :

- La conformité de numérique à l'aspect expérimental soit au niveau de la charge ou bien au niveau de l'énergie,le mode de déformation sous des vitesses de déformation suffisamment lentes.
- Adapter à ces structure un traitement thermochimique à de différentes épaisseurs voir sa réponse après son résulta extraordinaire ,on a pensé de réaliser d'autres configurations géométriques dont on a opté pour trois bandes verticales et quatre bandes verticales ;d plus au moins l'amélioration de contexte d'absorption d'énergie sous cémentation surtout selon la deuxième configuration qui est quatre bandes verticales avec profondeur de 0.2mm.

La suite de ces travaux s'orientée vers le régime dynamique .En effet l'intérêt des systèmes d'absorption d'énergie se retrouve dans une utilisation sous sollicitation de type impact; là on parle d'absorption des chocs. A la fin on a débuté l'étude pour réaliser un dispositif permettant de mesurer les déformations en compression uniaxial et bi-axial.

Références bibliographiques

[1] .M.Wang Xaguang .Comportement à l'écrasement des aciers de structures tubulaires en multi-matériaux. Ecole centrale de Lion.

[2] .Rachid Baleh.Flambage plastique quasi-statique et dynamique de structures tubulaires métalliques sous sollicitation simple et complexe-système d'absorption d'énergie -via un nouveau dispositif expérimental. Université de technologie Troyes .décembre2004.

[3]Huaidang Wang .Comportement et rupture des aciers en présence de vieillissement dynamique. Ecole centrale des arts et manufactures Paris.2011.

[4]. Olivier Barreau. Etude de frottement et de l'usure à outils de travail à chaud.Institut national polytechniqque de Toulous.14Décembre 2004.

[5]. Jean-Mathieu Guimard .Contribution à la modélisation de l'absorption d'énergie dans les composites stratifiés par fragmentation sous sollicitation dynamique. Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[6]. Pierre Paul Jean Champs. Simulation numérique, à l'aide d'algorithmes thermomécaniques implicites, de matériaux en dommageables pouvant subir de grandes vitesses de déformation. Université de Liège, Septembre 2008.

[7]. Laurence Compagne. Modélisation et simulation de la viscoplasticité et de l'endommagement en grandes vitesses de déformation. Université Louis Pasteur de Strasbourg I, 25 Novembre 2003.

[8]. Johnny Angel Mendoza Delgado. Détermination des propriétés mécaniques et des loi de comportement en fluage par identification instrumentée.

[9] **.**OuldOuali Mohand. Approche micromécanique de la rupture ductile dans les procédés de mise en forme des matériaux. Prise en compte de l'effet de forme des cavités. Université de Reims Champagne-Ardenne, 20 Avril 2007.

[10]. Lauren tGenèse Barralierier. Genèse des contraintes résiduelles de nitruration étude expérimentale et modélisation .N°92.13

[11] .NLMK .Europe -Strip Products: les aciers de constructions.

[12]. Lycée Henri Darras. Désignation des symbolique.

[13]. Anis Hor. Simulation physiques des conditions thermomécaniques de forgeage et d'usinage-caractérisation et modélisation de la rhéologie et de l'endommagement, Ecole nationale des arts et métiers, 31 Janvier 2011.

[14]. Zhi- Qiang Feng. Mécanique non linéaire. Université d'Evry Val D'essonne. Publication.

[15]. A.PENIN**.** Etude sous chargement dynamique biaxial d'une tôle en acier DP450*:* influence sur le comportement et la formabilité.Université de Bretagne Sud, 2010.

[16]. Pierre-Yves Manach. Lois de comportement et mise en forme des matériaux métalliques. Université de Bretagne Sud, 16 Décembre 2004.

[17]. Abaqus standard, version 6.13 : Theory manual et Standard user'smanual, 2013.

[18]. Huaidong Wang. Comportement mécanique et rupture des aciers au C-MN en présence de vieillissement dynamique. Ecole centrale de Paris. 18 Mai 2011.

[19] . Géraldine Jundt. Modèles d'endommagement et de rupture des matériaux biologiques. Université de la méditerranée (ex Marseille III), 5 Juillet 2007.

[20].D.Hertz, J.P Lebrun, H.Michel. Principes et technologies des traitements de nitruration et cémentation à basse température. Bordeaux, 4,5 et 6 Octobre 2006.

[21]. S.Aissat, A.Iost, G.Guillemot, Y.Benarioua, M.Mechmeche. Caractérisation des propriétés par nanoindentation d'un traitement de diffusion et d'un revêtement pour l'amélioration de la résistance à l'usure des aciers bas carbone. Ouargla, Algérie 07,08 et 09 Mars 2011.

[22.] Yunning Wang. Etude et modélisation de l'effet du revenu sur les évolutions des microstructures, du comportement thérmomécanique et des contraintes résiduelles de trempe. Institut National Polytechnique de Lorraine, 10 Octobre 2006.

[23]. D.Guillon,S.Rivallant,JJ.Barrau,C.Petiot,P. Thevenet,B.M. Development of a simulation of the dynamic progressive crushing of laminated composites. Toulouse, France, 2009.

[24] .Sophie Fréchard, A bdelkrimRedjaim, Gérard Metauer, Erhardt Lach, André Lichtenberger. Comportement dynamique et évolution microstructurale d'un acier inoxydable austénitique allié à l'azote. Institut Franco-Allemand de recherches de saint Louis, 2002.
dBoyce.ummto.2010.

[26]. Emmanuel Hersent. Modélisation intégré de la précipitation pour les soudage par friction malaxage d'alliage d'aluminium à durcissement structural. Ecole des mines de sainte Etienne.2010. N°0564.

[28] . Amy Zahia. Caractérisation de l'acier inoxydable et l'étude de son oxydation à température. UMMTO.2013.

[29] .Pierre Renaud. Modélisation numérique du grenaillage des pièces initialement cémentées ou carbonitrurées .Ecole nationale des arts et métiers .juin 2011.

[30] .Said Bensaada. Traitement thermochimique ,classification et désignation des aciers et fontes .UMMTO.

[31] .Benoit Vereecke . Une analyse probabiliste du comportement d'une famille d'aciers pour cuve de rep en cas d'accident grave .Université de Paris6.

[32] Malek Habak. Etude de l'influence de la micro structure des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement. Ecole national des arts et métiers .Décembre 2006.

Conception d’ACTP

Conception et réalisation du dispositif de point tombant ACTP

L'appareil est composée de deux parties mécaniques et électronique, on débute du dispositif mécanique qui comporte ces organes:

Le socle : comprenant la zone d'impacte et fixée à la sole 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 pattes en fer boulonnées cad cornière de dimensions 70*90*10mm et 2m de longueur (soudée latéralement avec huit perçages).

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 sandwiche entre le planchait et une plaque en fer de 500*500*50mm avec épaisseur de planche de 0.4 mm.

L'arche (composantes verticale) deux colonnes de IPN de220*90*10 fixées par boulons aux socle 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*1.5m(ces trois modules sont assemblés par mécano soudure.)
Elle comporte deux ceintures horizontales de formes carrée.fixées par des boulons plus 04 poutres de U A P 90*70*10 de hauteur de 3.5m, elles sont fixées aux soles par des goujons.

Les joints en caoutchouc sont intercalées entre les pates inferieures
Deux colonnes verticales de 5m ont formé le tube cylindrique en acier laisse galvanisé.

Deux brides une inferieure est fixées aux socle H et la superieure est solidaire de la traverse par liaison boulonnées.

La première entraxe est assurée à l' ordre de 500mm destiné à l'écrasement des structures de faibles gabarit .

La deuxième entraxe est 900mm (grosse pièce).

Remarque: chaque entraxe est disposé de son chariot.

plusieurs tiges filtées (horizontal equidistante)

Le chariot impacteur est une pièce en V et en polymère de hauteur de 260mm dont la partie inclinée a 170mm et la verticale a 90mm ,sur chaque coté latéral est usinée un demi alésage de quatre demi coquilles semi cylindriques en teflon (antifriction).
Remarque 2: le chariot nécessite un usinage spécifique d'une pièce rare auprés d'autre établissement spécialisée en injection plastique.

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
La deuxième partie regroupe les instruments de transfert, de stockage et d' enregistrement des données:
une chaine d'acquisition
unmicro ordinateur

Caractéristiques techniques des instruments
La cellule de force

D'une capacité maximale de 20tonnes, 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 boitier 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 chaine d'acquisition.

Un amplificateur :c'est appareil a réglage numérique et possède un domaine de fréquence de 0à 50Hz,il utilise une tension de sortie+/-10V. 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 inversion de polarité.

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 6m),l'atténuateur est branché normalement entre le câble de connexion et le câble de rallonge.

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.

Accéléromètre: le model choisi est le2255B-1Isotron d'Endeveco; du type piézo-électronique, 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.

Le conditionneur de signa: le model est Endevco model 133, équipé de trois canaux piézo-électrique ,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.