

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



Faculté De Génie de la Construction
Département Génie Mécanique

Mémoire De Fin D'études

En vue de l'obtention du diplôme
Master Académique en Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Caractérisation expérimentale et simulation numérique
du comportement mécanique de tubes renforcés soumis
à un écrasement axial**

Réalisé par :

M. GOUMGHAR Amirouche

Soutenu le 27/09/2017 devant la Commission d'Examen

M. ABERKANE Meziane	Professeur	UMMTO	Président
M. ALMANSBA Madjid	MCA	UMMTO	Examineur
M. OULD OUALI Mohand	Professeur	UMMTO	Encadreur
M. ZEROUKI Marzak	Doctorant	UMMTO	Co-Encadreur

Promotion 2016/2017

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier énormément mon promoteur M. OULED OUALI Mohand et mon co-promoteur M. Zerouki Marzak qui ont accepté de diriger ce travail et qui m'ont été d'une grande aide.

Ils m'ont soutenus vraiment par leur disponibilité, et par leur encadrement efficaces le long de ce mémoire, un encadrement qui ma permet d'acquérir les bases rassurantes et nécessaires pour s'avancer dans mon travail.

Mes remerciements sont également exprimés à tous les membres de jurys, M : ABERKANE.M et M : ALMANSBA.M qui ont acceptés d'être partie de mon jury de ce mémoire.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce mémoire.

GOUMGHAR Amirocuhe

Dédicace

Je dédie mon travail à :

Mes chers parents

Mes frères et sœurs

Mes amis et amies

GOUMGHAR Amirouche

Table des matières

Remerciements	1
Dédicace	2
Table des figures	7
Liste des tableaux	13
Liste des symboles	14
Résumé	16
Abstrat	17
Introduction générale	19
1 Généralités sur les tubes en aluminium	21
1.1 Introduction	21
1.2 Historique sur l'aluminium	21
1.3 Cycle de vie type de l'aluminium	23
1.4 Généralités sur les propriétés des alliages d'aluminium	24
1.4.1 La légèreté	24
1.4.2 Résistance mécanique	24
1.4.3 Résistance à la corrosion	25
1.4.4 Conductivité thermique et électrique	25
1.4.5 Ductilité et malléabilité	26
1.4.6 Recyclabilité	26

1.4.7	Imperméabilité et effet barrière	27
1.4.8	Propriétés réfléchissantes	27
1.5	Fabrication industrielle des alliages d'aluminium	27
1.5.1	Extraction de la bauxite	28
1.5.2	Production de l'aluminium primaire	29
1.5.3	Transformation	29
1.5.4	vies ultérieures	30
1.5.5	Utilisation	30
1.5.6	Fabrication des produits en aluminium	31
1.6	Aspect économique	31
1.7	Classification des alliages d'aluminium	34
1.8	Domaine d'utilisation des alliages d'aluminium	35
1.8.1	Le secteur des transports (25 %)	36
1.8.2	Le secteur des bâtiments (21 %)	37
1.8.3	Le secteur des emballages (21 %)	37
1.9	Les procédés de fabrication des tubes en alliages d'aluminium	38
1.9.1	Les Tubes en alliages d'aluminium soudés	38
1.9.2	Les Tubes en alliages d'aluminium non soudés	39
1.10	Les modes de déformation des tubes en alliages d'aluminium sous chargement de compression uni-axial	41
1.10.1	Une comparaison entre le mode de déformation stable et instable	41
1.10.2	Les modes de déformation stables	42
1.10.2.1	Le Mode de déformation stable axisymétrique AM (accordéon)	42
1.10.2.2	Le Mode de déformation stable non-axisymétrique (diamant) DM	42
1.10.2.3	Le Mode de déformation stable mixte XMD	43
1.11	Mécanisme d'absorption d'énergie	44
1.12	Conclusion	45

2	Étude expérimentale	47
2.1	Introduction	47
2.2	Caractérisation de Matériaux d'étude	47
2.2.1	Les Tube en aluminium	47
2.2.2	Les Copeaux d'aluminium	51
2.2.3	Liège naturel	54
2.2.4	La mousse polyuréthane	55
2.3	Influence des paramètres géométriques λ et η sur le mode de déformation résultant	56
2.4	Comportement des tubes en aluminium non renforcés sous Compression uni-axiale	60
2.5	Comportement des tubes en aluminium renforcés avec des copeaux	64
2.6	Comportement des éprouvettes renforcées avec de liège naturel	67
2.7	Comportement des éprouvettes renforcées avec une mousse polyuréthane	71
2.8	Etude comparative de l'effet des différents renforts	74
2.9	Conclusion	76
3	Simulation numérique	78
3.1	Introduction	78
3.2	Le code de calcul par éléments finis Abaqus	78
3.2.1	Définition	78
3.2.2	ABAQUS/Standard (Implicite)	79
3.2.3	ABAQUS/Explicite	79
3.2.4	Comparaison entre Abaqus/ standard et Abaqus /explicite	80
3.3	Modèle de Johnson-Cook	81
3.4	simulation numérique	82
3.4.1	Les condition aux limites et le maillage	82
3.4.2	Étude paramétrique	83
3.4.3	Étude de maillage	85
3.5	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux	87
3.6	Conclusion	88

Conclusion générale	90
Bibliographie	93
Annexe A : complément chapitre 1	98
Annexe B : Le code de calcul par éléments finis Abaqus	104
Annexe C : Impact de utilisation d aluminium dans le secteur automobile	109

Table des figures

1.1	Baux-de-Provence lieu de découverte de l'alumine.[20]	21
1.2	Brevet Héroult FR 175711 du 23 avril 1886[20].	22
1.3	Vouteure silver Ghost RR[20].	22
1.4	Le cycle de vie détaillé de l'aluminium.[5]	24
1.5	Aluminium utilisé dans le domaine d'aviation.[5]	24
1.6	Aluminium utilisé dans le secteur automobile.[5]	25
1.7	Aluminium utilisé dans le domaine naval.[5]	25
1.8	Aluminium utilisé dans le secteur d'électricité.[5]	25
1.9	Les bandes en aluminium ductile pour la mise en forme.[5]	26
1.10	L'aluminium c'est un matériaux recyclable.[20]	26
1.11	l'aluminium un bon conservateur et protecteur des médicaments.[5]	27
1.12	L'aluminium naturellement fléchisseur[20].	27
1.13	Un schéma résumant la production d'aluminium jusque au produit final.[10]	28
1.14	Les produits semi-finis en alliages d'aluminium.[18]	30
1.15	exemple de domaine d'utilisation des produit en aluminium.[18]	31
1.16	Les produits finis en aluminium.[24]	31
1.17	Évolution temporelle de la production des alliages d'aluminium par rapport à des autres metaux.[29]	32
1.18	Principaux pays producteurs d'aluminium en fonderie dans le monde de 2013 à 2016 (en milliers de tonnes).[29]	32
1.19	Les Echos.[29]	33
1.20	Classement des principaux pays exportateur.[29]	33
1.21	Classement des principaux pays importateur.[29]	33

1.22	Domaine d'utilisation des alliages d'aluminium.	35
1.23	Pare-chocs avant en aluminium et de deux "crash boxes" en aluminium.	37
1.24	L'aluminium dans le domaine bâtiment.	37
1.25	Les emballages en alimentaire en aluminium.	38
1.26	Les étapes de procédé continu pour des tubes de diamètres inférieurs ou égaux à 406,4 mm.[13]	38
1.27	Les étapes de procédé continu pour des tubes de diamètres supérieurs ou égaux à 406,4 mm.[13]	39
1.28	Schéma caractérisant le perçage à la presse.[13]	39
1.29	Schéma caractérisant le perçage à la presse.	39
1.30	Laminoir à de pèlerin.[25]	40
1.31	La presse à filer.[13]	40
1.32	Laminoir automatique Stiefel.[13]	40
1.33	La courbe caractéristique de mode d'écrasement stable et instable.[34]	41
1.34	Le mode de déformation axisymétrique.	42
1.35	Le mode de déformation diamant.[3]	43
1.36	Mode de déformation mixte.[3]	43
1.37	l'absorption d'énergie d'un tube métallique.[34]	44
2.1	Micrographies optiques selon l'axe du tube.	48
2.2	Micrographies optiques selon l'épaisseur.	48
2.3	Observation MEB selon l'épaisseur et l'axe du tube.	48
2.4	Observation MEB en modes SE et BSE.	49
2.5	Duromètre	49
2.6	Microduromètre	49
2.7	Machine de traction hydraulique conventionnelle.	50
2.8	Dimension de l'éprouvette de traction.	50
2.9	Courbe contrainte-déformation obtenu dans l'essai de traction.	50
2.10	Éprouvette de traction après et avant déformation.	51
2.11	Copeaux en aluminium.	52
2.12	Micrographie obtenue selon l'épaisseur de tube.	52

2.13	Micrographie obtenue selon l'axe de tube.	52
2.14	Dimension de l'éprouvette utilisé dans l'essai de traction.[9]	53
2.15	Courbe contrainte-déformation de l'essai de traction sur la tôle en aluminium. . .	53
2.16	Arbre chênes-lièges.	54
2.17	Liège naturel.	54
2.18	Micrographie selon la direction de l'épaisseur.	55
2.19	Micrographie selon la direction de la surface.	55
2.20	Micrographie des pores du liège naturel.	55
2.21	Mousse polyuréthane.(Joseph Santelli, Creative Commons)	56
2.22	Les éprouvettes de compression uni-axial à différentes longueurs.	56
2.23	Comparaison des courbes force-déplacement pour la compression des éprouvettes à différentes longueurs.	57
2.24	Eprouvettes de compression uni-axial après déformation.	58
2.25	Vues des éprouvettes de compression déformées après coupe axiale	58
2.26	Courbe force moyenne obtenue pour différentes longueurs des éprouvettes. . . .	58
2.27	Courbe nombre de rotules formées pour les différents cas étudiés.	59
2.28	Courbes Énergie absorbée-déplacement pour les différentes longueurs des éprou- vettes.	59
2.29	Courbe variation d'énergie absorbée en fonction des éprouvettes testés.	60
2.30	Dimensions de l'éprouvette étudiée	60
2.31	Courbes force-déplacement de compression uni-axiale des tubes vides à diffé- rentes vitesses de chargement.	61
2.32	Eprouvette de compression : a) avant déformation, b) après déformation et vue de coupe	61
2.33	Courbe force moyenne –vitesse des tubes vides	62
2.34	Courbe force moyenne-nombre de rotules formées des tubes vides.	62
2.35	Courbe énergie-déplacement à différentes vitesse de chargement des tubes vides. .	63
2.36	Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation des tubes vides.	63
2.37	Dimensions des éprouvettes tubulaires renforcés par des copeaux.	64
2.38	Courbe force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprou- vettes en aluminium renforcés par des copeaux.	64

2.39	Eprouvettes renforcés avec des copeaux : a)avant déformation, b) après déformation et vue de coupe.	65
2.40	Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes renforcés avec des copeaux d'aluminium.	65
2.41	Courbe force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec des copeaux.	66
2.42	Courbe énergie absorbée-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés par des copeaux en aluminium.	66
2.43	Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec des copeaux.	67
2.44	Dimensions de l'éprouvette tubulaires renfoncés avec liège naturel.	67
2.45	Courbe force-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcés par des copeaux.	68
2.46	Eprouvettes renforcés avec le liège : a)avant déformation, b) après déformation et vue de coupe.	68
2.47	Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes renforcés avec liège naturel.	69
2.48	Courbe force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec liège naturel.	69
2.49	courbe énergie absorbée-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés avec liège naturel.	70
2.50	Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec des copeaux.	70
2.51	Courbe force-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcés avec mousse polyuréthane.	71
2.52	Eprouvettes renforcés avec une mousse : a)avant déformation, b) après déformation et vue de coupe.	71
2.53	Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.	72
2.54	Courbe force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.	72
2.55	courbe énergie absorbée-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.	73

2.56	Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.	73
2.57	Courbe force-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcés et non renforcés.	74
2.58	Eprouvettes vide et renforcées après déformation.	74
2.59	Vue de coupe des éprouvettes renforcés après déformation.	74
2.60	Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes en aluminium renforcés et non renforcés.	75
2.61	courbe énergie absorbée-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés et non renforcés.	75
2.62	Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec des copeaux.	76
3.1	Organigramme de résolution de schéma implicite.[26]	79
3.2	Organigramme de résolution de schéma explicite[26].	80
3.3	Inconvénients et avantages de module implicite et explicite.[15]	80
3.4	Les conditions aux limites imposés sur l'éprouvette.	82
3.5	Maillage de l éprouvette et des plateaux.	82
3.6	Courbe force déplacement pour les différentes valeurs de paramètre A.	83
3.7	Courbe force déplacement pour les différentes valeurs de paramètre B.	84
3.8	Courbe force déplacement pour les différentes valeurs de paramètre n.	84
3.9	Maillage grossier	85
3.10	Maillage fin	85
3.11	Comparaison entre les courbes force-déplacement dans le cas de maillage fin et grossier.	86
3.12	Tubes en aluminium après déformation a) maillage grossier, b) maillage fin.	86
3.13	Comparaison entres courbes force-déplacement expérimentale et numérique.	87
3.14	Tubes en aluminium après déformation a) Expérimentale, b) numérique.	87
3.15	Comparaison entres courbes énergie-déplacement expérimentale et numériques.	88
3.16	Les fichiers d'entré et de sortie dans le solveur Abaqus.	104
3.17	Étapes de simulation dans le code de calcul par éléments finis Abaqus.	105
3.18	Les fichiers de sortie après les calculs.	105

3.19 Interface Abaqus.[11]	106
3.20 Comparaison entre deux solutions en aluminium extrêmes, pour la même capacité d'absorption d'énergie (7.5 kJ).[14]	110
3.21 RENFORCEMENT BARRE DE PARE CHOCS .(www.eurofrance)	111

Liste des tableaux

1.1	Les principaux producteurs d'aluminium en million de tonne .Source : Alumina Limited et rapports des sociétés.[29]	33
1.2	La désignation des alliages d'aluminium corroyés et de fonderie selon la norme américaine.[31]	34
1.3	quelques caractéristiques des alliages d'aluminium corroyés.[23]	35
1.4	Domaine d'utilisation des alliages aluminium.[4]	36
2.1	Composition chimique en pourcentage de matériau étudié.	47
2.2	Micro-dureté et la dureté.	50
2.3	Caractéristiques mécaniques de matériau étudié.	51
2.4	Composition chimique des copeaux en aluminium.[7]	51
2.5	Caractéristiques des copeaux en aluminium série 5054.	53
2.6	La composition chimique de liège naturel utilisée.[33]	54
2.7	Les paramètres géométriques correspondant en cas étudié.	57
3.1	Les valeurs de paramètre A.	83
3.2	Les valeurs de paramètre B.	83
3.3	Les valeurs de coefficient n.	84
3.4	Les valeurs des paramètre A, B, n.	85
3.5	Désignation de l'aluminium corroyés.[31]	98
3.6	Désignation de l'aluminium de fonderie.[31]	99
3.7	Subdivision H-écrouissage.[31]	100
3.8	Désignation de l'état de livraison.[31]	101
3.9	Traitement thermique des alliages d'aluminium.[31]	101

Liste des symboles

AM : mode de déformation axisymétrique.

DM : mode de déformation diamant.

XMD : mode de déformation mixte.

F : force.

Δl : déplacement.

E_{abs} : énergie absorbée.

F_{moy} : force moyenne.

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

ρ : masse volumique du matériau.

2H : longueur d'onde de l'écrasement.

SEA : énergie spécifique d'absorption.

De : diamètre extérieur.

e : épaisseur.

t : temps.

V : vitesse.

d : diamètre.

Rm : rayon moyen.

L : longueur utile.

λ : paramètre géométrique.

η : paramètre géométrique.

σ_{eq} : contrainte équivalente.

A : contrainte d'écoulement.

B : relatif à la partie linéaire d'écrouissage.

n : relatif à la partie non-linéaire d'écrouissage.

C : coefficient de sensibilité au durcissement dynamique.

m : coefficient de sensibilité à l'adoucissement thermique.

$\bar{\varepsilon}^p$: déformation plastique équivalente.

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

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

T : température de transition.

T_{ext} : température ambiante.

T_f : température de fusion.

Résumé

Ce récent travail, porte sur l'étude expérimentale et la simulation numérique de comportement mécanique des structures tubulaires en aluminium, renforcés et non renforcés, sous chargement de compression uni-axial (écrasement) en régime quasi-statique. nous commençons notre travail par une présentation générale sur le matériau d'étude : l'aluminium, ainsi que un récapitulatif sur les structures tubulaires et leurs comportement mécanique en compression uni-axial. (Chapitre I).

Ensuite, nous abordons la partie expérimentale de notre étude, en premier lieu nous définissons les caractéristiques mécaniques et la structure microscopique de matériau d'étude à travers plusieurs essais mécaniques. nous avons identifié aussi l'influence des paramètres géométriques sur le mode de déformation final. Une étude est réalisée sur l'effet de renforcement des tubes en aluminium sur leurs comportement mécanique en compression uni-axial a différentes vitesse de chargement. Enfin, une étude comparative est faites entre les réponses mécaniques des différents type de renforcement. (Chapitre II)

Finalement, des généralités sont exposées sur le code de calcul par éléments finis Abaqus, ainsi que sur l'approche empirique de Johnson-Cook, nous identifions les paramètres de ce modèle en cas de compression uni-axial en régime quasi statique d'un tube en aluminium. Une étude comparative entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux est faites. (Chapitre III)

Mots clés : Aabaqus/explicit, écrasement des tubes, Johnson-Cook, aluminium.

Abstrat

In this work, we interested in the study and simulation of mechanical behavior of tubular structures in uniaxial compression. We begin this study with a general exhibition of steels and mechanical behavior of the tubular structures in uniaxial compression test. (Chapter I)

Then, we present the plastic and viscoplastic behavior laws. We citing the phenomenological and physical models used in simulation of the mechanical behavior of steel under dynamic loading. A general presentation of Abaqus is made in end of this chapter. (Chapter II)

Finally, based on empirical approaches of Johnson-Cook, we study the parametric identification of the model in cases of uniaxial compression of tubular structure. A comparative study between the numerical results and the experimental results is presented in end of chapter. (Chapter III)

Keywords : Aabaqus/explicit, crushing tube, Johnson-Cook model, Mild steel.

Introduction générale

Introduction générale

Dans sa vie quotidienne l'homme est en fréquentation direct et indispensable avec la technologie et les produits qui en découlent. Afin de satisfaire les exigences des consommateurs dans un cadre concurrentiel, les industriels ont tendance à réaliser des systèmes fiables, sophistiqués et surtout qui confèrent toute la sécurité dont on a besoin. Pour assurer cette sécurité les pôles industriels, les scientifiques et les chercheurs ont penché vers de nouvelles techniques comme la simulation numérique qui réduit le coût et le temps des essais pour élaborer de nouveaux systèmes, et d'autres matériaux comme les composites, l'aluminium et ses alliages.

Depuis quelques décennies l'utilisation de l'aluminium et ses alliages a pris une grande ampleur et elle a connu une hausse et une large utilisation qui s'étale de l'industrie automobile, aéronautique jusqu'aux articles ménagères. Ce large usage est due aux caractéristiques très diverses de l'aluminium : la légèreté, recyclabilité, et sa capacité d'absorption d'énergie.

Pour mieux cerner ces concepts en particulier son aspect absorption d'énergie on a réalisé se présent travail qu'on a devisé en trois parties.

Dans le premier chapitre est présentée une description de l'aluminium et de ses alliages ainsi que leur classification. Un historique de son utilisation, son extraction, sa transformation ainsi que ses domaines d'application sont aussi abordés. Nous clôturons avec une définition des modes de déformation des structures tubulaires à section circulaire sollicitées en compression uni-axiale en régime quasi-statique.

Dans le chapitre2 une présentation des expériences sur un alliage d'aluminium série 4000 pour illustrer le comportement des structures tubulaires est donnée. Nous commençons par l'identification des caractéristiques mécaniques du matériau étudié par des essais de traction, ensuite une série d'expérience est réalisée sur des éprouvettes vides et renforcés par différents matériaux d'apports sollicités en compression uni-axiale en régime quasi-statique. Les résultats obtenus sont donnés et discutés.

Dans le chapitre3 nous avons procédé à une simulation numérique avec le code de calcul Abaqus en utilisant le modèle empirique de JOHNSON-COOK. Une comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques est présentée et discutée.

Chapitre 1 : Généralités sur aluminium

Chapitre 1

Généralités sur les tubes en aluminium

1.1 Introduction

Dans cette première partie de notre travail, nous exposons d'une manière générale les alliages d'aluminium, et ce à travers leurs historiques et cycle de vie typique, ainsi que les étapes de fabrication de l'aluminium primaires à partir de la bauxite (minerai) et son impact économique à l'échelle mondiale. nous avons présenté aussi dans cette partie, les diverse catégories et familles des alliages en aluminium en citant les propriétés mécanique de chaque famille. Les procédés de fabrication des tubes en aluminium sont abordés dans ce chapitre. A la fin de cette partie nous avons montré d'une manière brève le comportement des structures tubulaires sous chargement de compression uni-axiale et les modes de déformation résultants.

1.2 Historique sur l'aluminium

L'histoire de la découverte de aluminium (alumine) remonte en 1821, depuis les inventions et les avances ne cesse de multiplier et de accroître. Nous exposons dans ce que suit un bref historique avec un ordre chronologique : de sa découverte jusque au nos jours.

1821 Le minéralogiste français Pierre Berthier (1782-1861) analyse les terres des Baux-de-Provence. Il y découvre de l'alumine.

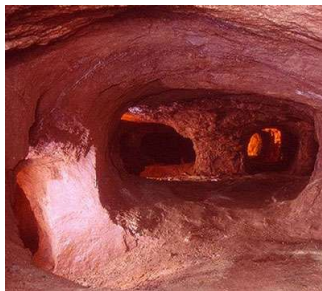


Figure 1.1 – Baux-de-Provence lieu de découverte de l'alumine.[20]

- 1827** Le chimiste allemand Friedrich Wöhler (1800-1882) obtient de la poudre d'aluminium.
- 1854** Le chimiste français Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) obtient de l'aluminium pur. Le chimiste allemand Robert Wilhem Bunsen (1811-1899) expérimente l'obtention d'aluminium par électrolyse.
- 1885** Alfred et Eugene H. Cowles (USA), produisent des alliages d'aluminium par réduction d'alumine au four électrique : premier procédé électrothermique de production d'alliages d'aluminium.

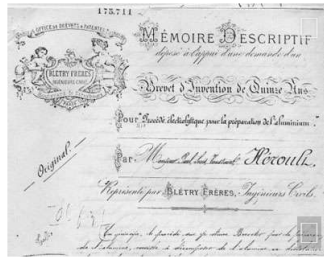


Figure 1.2 – Brevet Héroult FR 175711 du 23 avril 1886[20].

- 1887** Création de la Société métallurgique suisse (SMS), qui deviendra Alusuisse et enfin Algroup.
- 1888** Alfred Hunt, Ch. M. Hall fondent la Pittsburgh Reduction Company (PRC), qui deviendra Alcoa en 1907. Et P. Héroult fonde la Société électrométallurgique française (SEMF).
- 1893** Mise au point par K. Bayer, avec P. Héroult, du procédé Bayer pour la production d'alumine.
- 1894** Création de la British Aluminium Company (BACO).
- 1902** Constitution de Northern Aluminum Company (USA) future Alcan.
- 1907** La carrosserie de la Rolls-Royce Silver Ghost est en aluminium poli.



Figure 1.3 – Vouteure silver Ghost RR[20].

- 1923** Découverte de la protection de l'aluminium par oxydation anodique et dépôt par Alcoa d'un brevet pour la coloration de l'alu par oxydation anodique.
- 1927** Charles Lindbergh (1902-1974) traverse l'Atlantique à bord du Spirit of Saint Louis, avion à structure gainée d'aluminium.

- 1932** Mise au point industrielle du raffinage électrolytique de l'aluminium.
- 1934** Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent la radioactivité artificielle en bombardant une feuille d'aluminium avec des particules, créant ainsi de nouveaux noyaux radioactifs.
- 1956** Première cannette en aluminium.
- 1957** Spoutnik-1, boule d'aluminium de 84 kg
- 1978** Introduction de l'aluminium au London Metal Exchange (LME).
- 1991** Fermeture des dernières mines de bauxite en France.
- 1994** Audi et Alcoa, avec l'Audi A8 allègent la voiture de 40 %.
- 2000** à nos jours que se font les grandes fusions d'entreprises sur tous les continents.

1.3 Cycle de vie type de l'aluminium

En général l'approche retenue pour une analyse de cycle de vie est celle : du berceau à la tombe, cette tombe n'étant que celle du produit manufacturé. Le métal continuant son existence grâce au recyclage il s'agit dans ce cas plutôt d'une approche : du berceau au berceau [5]. Le cycle de vie d'un produit en aluminium peut être modélisé à travers les différentes étapes présentées dans le schéma ci-dessous.

1. Extraction de la bauxite : première étape de la production d'aluminium ;
2. Production d'alumine : matériau brut pour la production de l'aluminium primaire, elle est extraite de la bauxite ;
3. Production de l'aluminium primaire : produit par électrolyse ;
4. La semi-fabrication inclut plusieurs procédés industriels : le laminage, le filage, le moulage, ... ;
5. Fabrication du produit : l'aluminium est ensuite transformé en produits ;
6. Phase d'utilisation : les principaux débouchés pour les produits en aluminium sont le transport, la construction de bâtiments, l'emballage et l'ingénierie ;
7. Recyclage : tous les produits en aluminium collectés sont recyclés et utilisés à nouveau dans d'autres usines. A chacune des étapes de ce cycle, des progrès considérables ont été accomplis par les industriels du secteur de l'aluminium, et se poursuivent ;

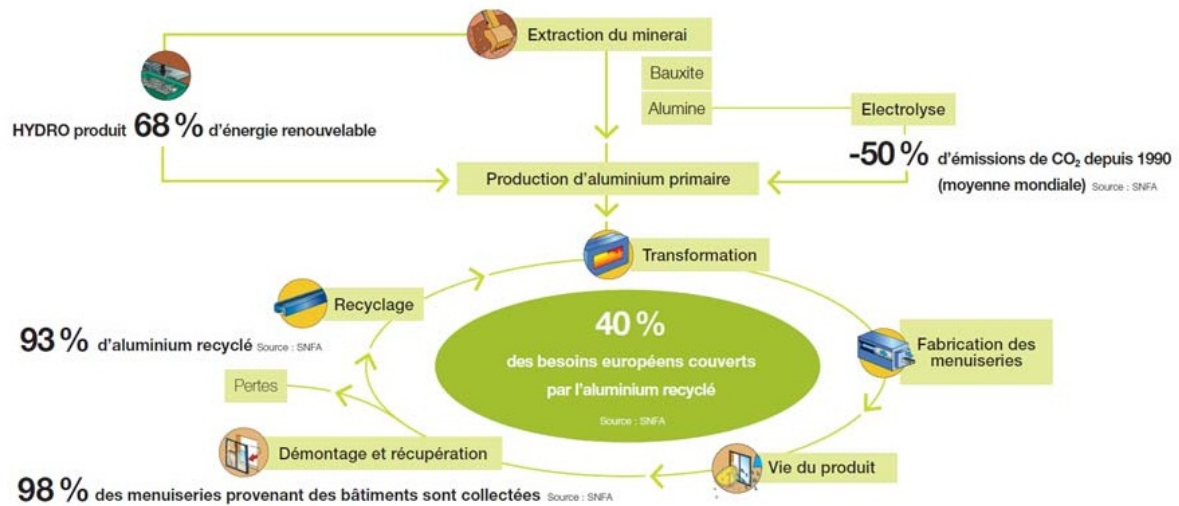


Figure 1.4 – Le cycle de vie détaillé de l'aluminium.[5]

1.4 Généralités sur les propriétés des alliages d'aluminium

1.4.1 La légèreté

L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de $2,7 \text{ g/cm}^3$, soit environ un tiers de celle de l'acier ($7\text{-}8 \text{ g/cm}^3$) ou du cuivre ($8,96 \text{ g/cm}^3$).[28]



Figure 1.5 – Aluminium utilisé dans le domaine d'aviation.[5]

1.4.2 Résistance mécanique

L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise. A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.[16]



Figure 1.6 – Aluminium utilisé dans le secteur automobile.[5]

1.4.3 Résistance à la corrosion

L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage,...).[5]



Figure 1.7 – Aluminium utilisé dans le domaine naval.[5]

1.4.4 Conductivité thermique et électrique

L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules). A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.[30]



Figure 1.8 – Aluminium utilisé dans le secteur d'électricité.[5]

1.4.5 Ductilité et malléabilité

L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées.[30]



Figure 1.9 – Les bandes en aluminium ductile pour la mise en forme.[5]

1.4.6 Recyclabilité

L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire. L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des vieux métaux à montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles [6]

Le recyclage est essentiel pour le développement durable. Il permet d'économiser les ressources et de réduire les déchets. La création et la promotion de marchés pour les produits recyclés sont fondamentales. L'aluminium est 100% recyclable, infiniment, sans perte de ses qualités physico-chimiques. [30]



Figure 1.10 – L'aluminium c'est un matériaux recyclable.[20]

1.4.7 Imperméabilité et effet barrière

Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.[5]



Figure 1.11 – l'aluminium un bon conservateur et protecteur des médicaments.[5]

1.4.8 Propriétés réfléchissantes

L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie. Il est notamment utilisé dans des techniques de mesures par effet de la lumière dont le cas de la photo-élastisymétrie.[5]



Figure 1.12 – L'aluminium naturellement fléchisseur[20].

1.5 Fabrication industrielle des alliages d'aluminium

La fabrication industrielle est réalisée dans des raffineries, à partir de bauxite, selon le procédé Bayer. Le procédé, qui consiste à extraire l'alumine de la bauxite, en éliminant les impuretés présentes dans le minerai, utilise le caractère amphotère des hydroxydes d'aluminium qui sont solubles en milieu basique. La figure ci-dessous schématise d'une manière bref le cycle de vie de des alliages d'aluminium.

La figure 1.13 illustre les étapes qui suivent les alliages d'aluminium depuis la bauxite jusqu'au produit final.

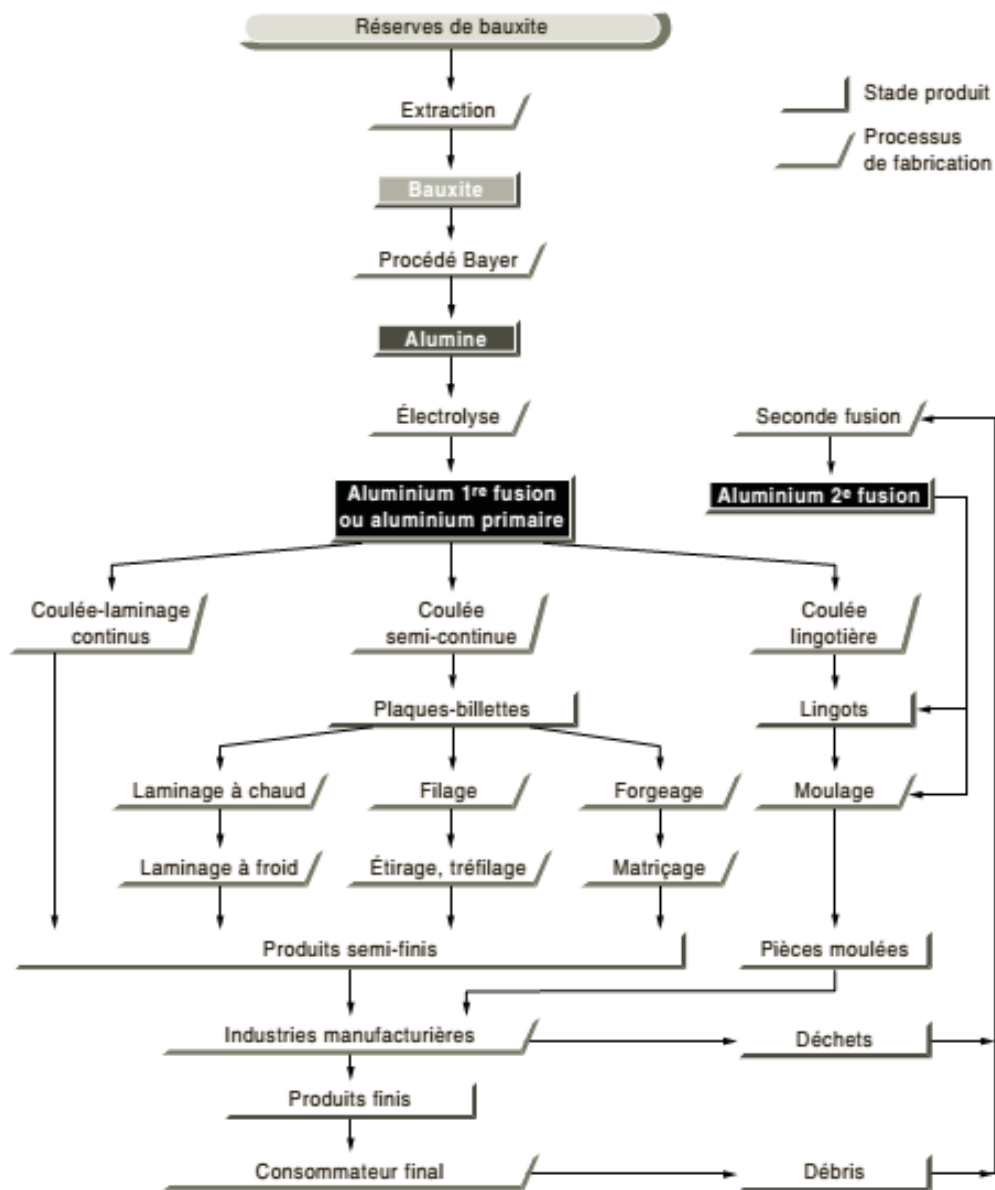


Figure 1.13 – Un schéma résumant la production d'aluminium jusque au produit final.[10]

1.5.1 Extraction de la bauxite

L'aluminium est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium ; il représente en moyenne 8 % de la masse des matériaux de la surface solide de notre planète. Il est présent sous forme de minerais, dont principalement la bauxite, qui contient 40% à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté. La bauxite tient son nom des Baux-de-Provence, où ce minerai a été découvert en 1831 par le Français Pierre Berthier.

Aujourd'hui, parmi les principaux pays producteurs, on compte notamment la Guinée (40%

des réserves mondiales), l'Australie et le Brésil. Entre 4 et 5 tonnes de bauxite permettent de produire 2 tonnes d'alumine, matière intermédiaire dans la fabrication d'aluminium, et 1 tonne d'aluminium. Aujourd'hui, les réserves identifiées de bauxite sont estimées à au moins 200 ans, voire 400 ans, selon les sources, en admettant que la consommation actuelle reste la même. Mais d'autres sources d'alumine existent qui, pour être moins concentrées, sont quasi inépuisables. Le recyclage du stock existant aura pris le relais d'ici-là (l'aluminium est recyclable à l'infini sans perte de qualité [32])

1.5.2 Production de l'aluminium primaire

L'alumine est transformée en aluminium par électrolyse : dissoute dans de la cryolite (fluorure double d'aluminium et de sodium), fondue à environ 1000° dans une cuve où plonge une électrode de carbone (anode), l'alumine est traversée par un courant électrique de haute intensité.

L'aluminium se dépose au fond de la cuve, près des cathodes, tandis que l'oxygène réagit avec le carbone des anodes, essentiellement sous forme de CO₂. Dans les installations françaises, les cuves sont entièrement capotées pour récupérer et fixer les gaz s'échappant du bain, qui contiennent notamment du fluor.

L'électricité nécessaire pour cette opération représente la majeure partie de l'énergie totale utilisée et près de 30% des coûts associés à la production primaire. Cela explique le rôle historique majeur joué par les producteurs d'aluminium dans l'équipement électrique des nations.

Les producteurs d'aluminium ont toujours développé des solutions techniques pour baisser la consommation d'électricité de cette phase d'électrolyse : elle a ainsi été réduite de 33% par tonne depuis 1950 et continue à se réduire. [24]

1.5.3 Transformation

L'aluminium est un métal qui se travaille facilement : il est très ductile et malléable. Ces qualités permettent une gestion maîtrisée des consommations d'énergie dans la transformation et la mise en juvre des demi-produits : laminage pour l'obtention de plaques (capots de voiture, avions, façades de bâtiments, boîtes boissons et de conserve...) ou de feuilles minces d'aluminium (emballages...), filage pour l'obtention de profilés aux formes parfois très complexes (fenêtres, portes, vérandas, équipements industriels, transports...). La légèreté de l'aluminium permet des économies d'énergie dans le transport et dans le maniement des produits de construction.

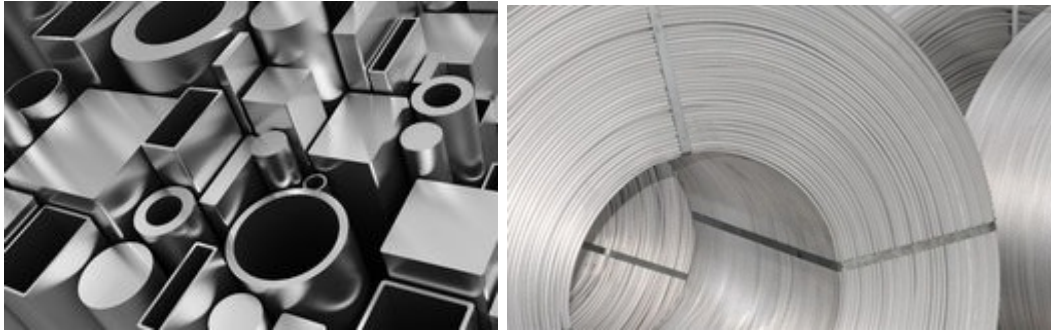


Figure 1.14 – Les produits semi-finis en alliages d'aluminium.[18]

La transformation s'opère également à l'état liquide avec la fonderie qui représente un domaine d'activité assez diversifié : automobile, matériel de manutention, équipement industriel, matériel électrique, aéronautique.

Elle consiste à couler de l'aluminium ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition.

1.5.4 vies ultérieures

L'aluminium est un matériau permanent, Il est 100% recyclable, à l'infini et sans perte de ses qualités mécanique, physiques et chimiques. Les propriétés de l'aluminium recyclé sont donc similaires à celles de l'aluminium de première fusion.[16]

Tout l'aluminium récupéré est donc recyclé : dans les secteurs du bâtiment et du transport, le taux d'aluminium récupéré et recyclé atteint 95%. La valeur élevée de l'aluminium finance les opérations de démontage, de tri sélectif et de recyclage. D'après des statistiques fiable la moitié de l'aluminium actuellement produit en Europe provient de matières premières recyclées.

1.5.5 Utilisation

Durant la phase d'utilisation, l'aluminium présente de nombreux atouts en termes de développement durable :

- sa légèreté, alliée à sa solidité, permet d'alléger les structures ;
- la rigidité et sa facilité de mise en forme permettent des réalisations techniques performantes et durables ;
- sa résistance à la corrosion réduit les travaux de maintenance et étend la durée de vie des produits ;
- ininflammable, non toxique au contact, non émetteur de poussière ni de vapeur, l'aluminium est un matériau sain et sûr.[28]



Figure 1.15 – exemple de domaine d'utilisation des produit en aluminium.[18]

1.5.6 Fabrication des produits en aluminium

Les qualités de ductilité et de malléabilité, les multiples possibilités offertes par les différents alliages d'aluminium, selon les utilisations, la facilité d'usinage représentent des atouts à l'étape de fabrication des produits en aluminium. Ces qualités permettent d'optimiser les consommations d'énergie et de matière dans les procédés de fabrication des produits : emboutissage des boîtes pour boisson et conserves, des capots d'automobile, assemblage de fenêtres et de façades, etc. [28]



Figure 1.16 – Les produits finis en aluminium.[24]

1.6 Aspect économique

Cette présente section nous révèle l'aspect économique des alliages aluminium à l'échelle mondiale. La production d'aluminium enregistre une augmentation qui ne cesse de croître et progresser chaque année a cause de sa utilisabilité dans plusieurs secteurs d'industriels.

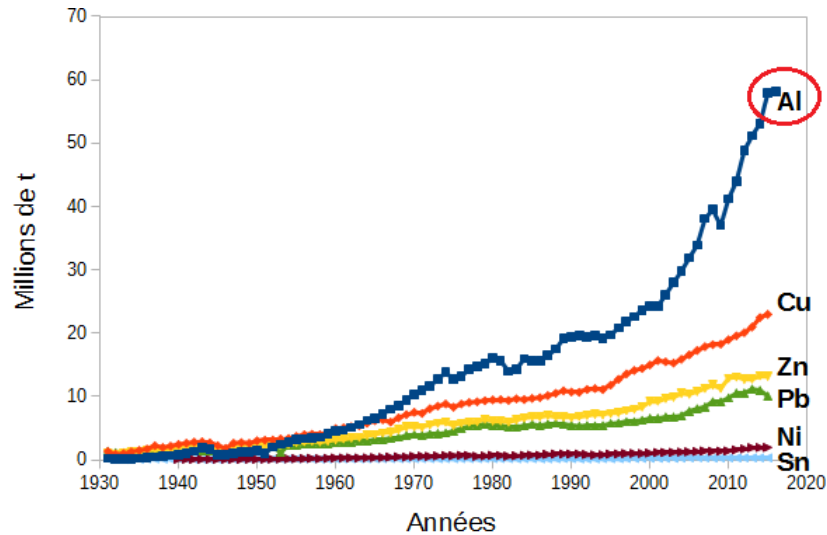


Figure 1.17 – Évolution temporelle de la production des alliages d’aluminium par rapport à des autres métaux.[29]

La figure 1.18 représente les pays producteurs aluminium. La Chine occupe la première place loin devant par rapport au second la Russie avec une production qui atteint les 31.000 milliers tonnes métrique en 2016.

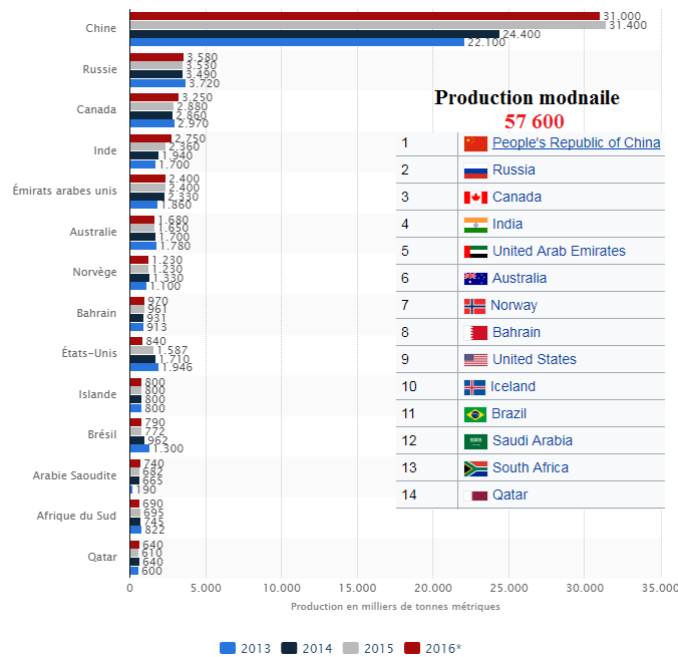


Figure 1.18 – Principaux pays producteurs d’aluminium en fonderie dans le monde de 2013 à 2016 (en milliers de tonnes).[29]

Les figures ci-dessous montrent l’évolution temporelle des prix d’une tonne des alliages d’aluminium. Une augmentation flagrante est enregistré en 2017 avec une valeurs de 170 000 de dollar pour une tonne.

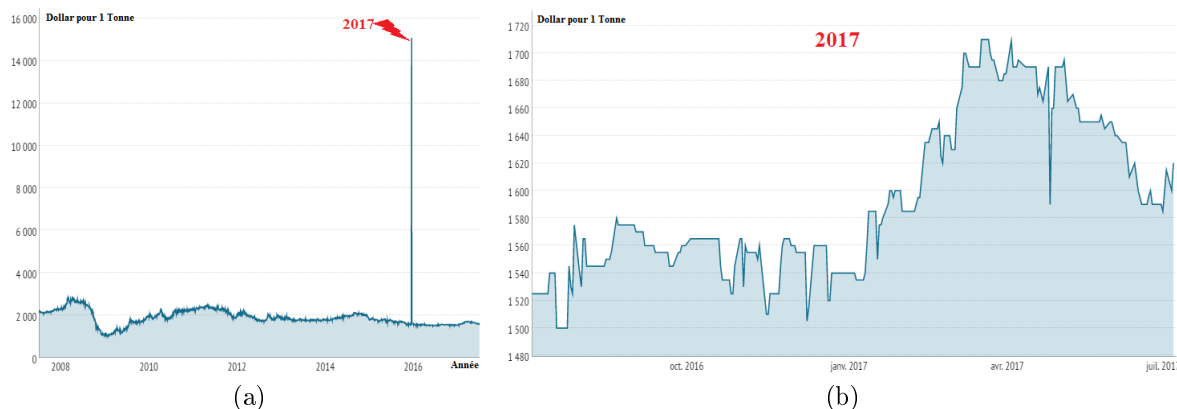


Figure 1.19 – Les Echos.[29]

d'après les statistiques de ITC faites en 2015, la Malaisie occupe la place de leader des pays exportateur de la bauxite avec 27 913 milliers de tonnes destinées à 99 % à la Chine. par contre la Chine représente le pays le plus importateur de bauxite avec 56 012 milliers de tonnes.

N°	Pays	Exportation (M.t)
1	Malaisie	27 913
2	Australie	20 276
3	Guinée	19 414
4	Brésil	9 335
5	Inde	7 491
6	Jamaïque	4 558
7	R.Dominicaine	1 552
8	Ghana	964
9	Guyana	598
10	Grèce	387

N°	Pays	Importation (M.t)
1	Chine	56 012
2	Canada	3 696
3	États-Unis	11 800
4	Allemagne	2 768
5	Irlande	4 608
6	France	1 527
7	Ukraine	4 338
8	Roumanie	1 368
9	Espagne	3 869
10	Inde	1 33

Figure 1.20 – Classement des principaux pays exportateur.[29]

Figure 1.21 – Classement des principaux pays importateur.[29]

Le classement des principaux producteurs de aluminium en 2015 sont regroupés dans le tableau suivant.

N°	Usine	Pays	Production	N°	Usine	Pays	Production
1	AWAC	États-Unis	15.1	6	UC Rusal	Russie	7.4
2	Chalco	Chine	13,3	7	Jinjiang Group	Chine	6.4
3	Xinfa Group	Chine	10,1	8	Hydro	Norvège	6.0
4	Weiqiao	Chine	9,2	9	South32	Australie	5.3
5	Rio Tinto Alcan	Canada	7.8	10	SPIC	Chine	2.7

Tableau 1.1 – Les principaux producteurs d'aluminium en million de tonne .Source : Alumina Limited et rapports des sociétés.[29]

1.7 Classification des alliages d'aluminium

L'aluminium est le principal composant de ces alliages, sa proportion est généralement comprise entre 84% et 97%. Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisations envisagées.

Les alliages d'aluminium peuvent être classés en trois grandes familles :

1. **Les alliages de forge et de laminage (corroyage) :** Prévu pour l'obtention des demis produits (tôles, plaques, tubes. . .) ainsi que des pièces de forge et estampées produits par laminage et perçage. Ces derniers sont obtenus en travaillant des lingots ayant des formes particulières, ce travail peut se faire par laminage, extrusion, tréfilage ou forgeage et étirage. [21]
2. **Les alliages de fonderies Prévu pour le moulage de forme :** Ces alliages sont obtenus en faisant fondre les lingots et en les faisant coulés dans des moules ayant la forme du produit final (moules en sable ou moules en coquille). Dans ces alliages les éléments d'addition sont généralement présents en quantités plus importantes pour faciliter le procédé de fonderie. [24]
3. **Les alliages élaborés par frittage Suivant la méthode de métallurgie des poudres :** Ces poudres sont chauffées jusqu'à la fusion des extrémités des grains et après on exerce une force de compression pour obtenir un lingot ou une pièce finie. [27]

Il existe plusieurs normes pour désigner et classifier les alliages d'aluminium conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe, on peut citer en titre d'exemple les normes américaine et européenne. dans notre travail on adopte la norme américaine pour la désignation des alliages aluminium, et ce a cause leurs fluidité, facilité et efficacité.

Selon la norme américaine le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal.[30]

SÉRIES D'ALLIAGES	ÉLÉMENTS D'ALLIAGES PRINCIPAUX	SÉRIES D'ALLIAGES	ÉLÉMENTS D'ALLIAGES PRINCIPAUX
1XXX	99% d'aluminium minimum	1XX.X	99% d'aluminium minimum
2XXX	cuivre	2XX.X	cuivre
3XXX	manganèse	3XX.X	silicium + cuivre et/ou magnésium
4XXX	silicium	4XX.X	silicium
5XXX	magnésium	5XX.X	magnésium
6XXX	magnésium et silicium	6XX.X	n'existe pas
7XXX	zinc	7XX.X	zinc
8XXX	autres éléments	8XX.X	étain
		9XX.X	autres éléments

(a) Les alliages d'aluminium corroyés

(b) Les alliages d'aluminium de fonderie

Tableau 1.2 – La désignation des alliages d'aluminium corroyés et de fonderie selon la norme américaine.[31]

D'une famille à une autre les propriétés caractéristiques sont très variables :

- **la série 5000** : reconnue par sa soudabilité et sa résistance à la corrosion ; [30]
- **la série 2000** : ses caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique [16] ;
- **la série 3000** : a une résistance mécanique faible mais qui peut être augmentée par écrouissage, ou addition de magnésium, aussi une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage et Une excellente résistance à la corrosion dans des conditions normales d'utilisation [12] .

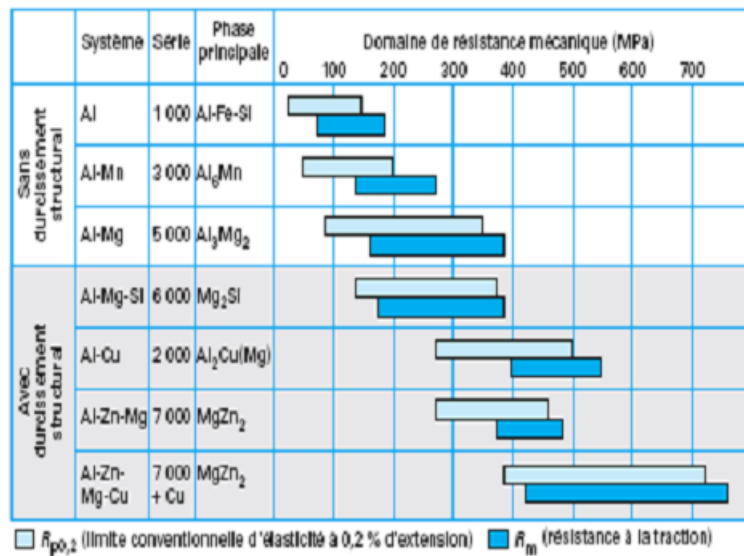


Tableau 1.3 – quelques caractéristiques des alliages d'aluminium corroyés.[23]

1.8 Domaine d'utilisation des alliages d'aluminium

Le domaine d'utilisation des alliages d'aluminium repose habituellement sur leurs propriétés mécaniques et leurs coût. Pour la plupart de ces utilisations, la diversité des propriétés mécaniques de l'aluminium est un avantage apprécié.[8].

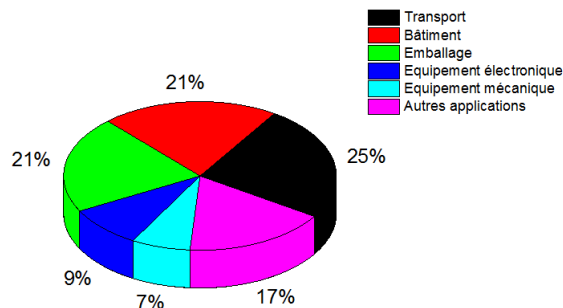


Figure 1.22 – Domaine d'utilisation des alliages d'aluminium.

Applications	Principaux critères de choix des utilisateurs	Alliages usuels retenus par les utilisateurs	Remarques
Chaudronnerie, tôlerie	Mise en forme Soudage	1200, 1100, 1050A, 3105, 3003, 3004, 5049, 5052, 5454, 5754, 5086, 5083, 6062, 6061	
Applications mécaniques	Caractéristiques mécaniques Usinabilité	2618A, 2024, 2017A, 2014, 2214, 2030, 2011, 5086, 5083, 6005A, 6062, 6061, 6012, 6262, 7075, 7049A, Fortal	Les 2030, 2011, 6012 et 6262 sont des alliages pour le décolletage
Plasturgie	Caractéristiques mécaniques Usinabilité Conductivité thermique	2017A, 5083, 6061, 7075, Fortal, Alumold	
Construction aéronautique et spatiale	Légèreté Caractéristiques mécaniques Mise en forme Usinage Aptitude aux traitements de surface Tenue à la corrosion	2618A, 2024, 2014, 2214, 2219, 7020, 7075, 7175, 7475, 7060, 7010	
Automobile	Mise en forme Caractéristiques mécaniques Aspect après peinture Tenue à la corrosion	5251, 5754, 5182, 5083, 6060, 6005A, 6106, 6062, 6016	Pour les échangeurs brasés : 3003 et 3005 plaqués
Véhicules industriels	Mise en forme Assemblage (soudage) Fonctionnalités des demi-produits Esthétique Tenue à la corrosion	3003, 3004, 5052, 5454, 5754, 5086, 5083, 6005A, 6062	En bandes larges : 3003, 5052, 5754 En tôles relief : 3003, 5052, 5754, 5086
Construction navale	Mise en forme Soudage Tenue à la corrosion	5754, 5086, 5383, 5083, 6005A, 6062	Tôles relief en 5086
Bâtiment	Mise en forme Assemblage Aptitude à l'anodisation, au laquage Tenue à la corrosion	1050A, 3105, 3003, 3005, 5005, 5052, 6060, 6005A, 6106	Bandes prélaquées : 1050A, 3105, 3003, 3005, 5052 Bandes préanodisées : 5005
Luminaire, décoration	Aspect de surface Aptitude aux traitements de surface	1199, 1198, 1095, 1090, 1085, 1080, 5005, 5057	Il s'agit de « Qualités spéciales »
Équipement du territoire, mobilier urbain	Mise en forme Assemblage (soudage) Fonctionnalités sur demi-produits Esthétique Tenue à la corrosion	3003, 5052, 5086, 5083, 6005A, 6062, 6060, 6106	En tôles relief : 3003, 5754, 5086
Échangeurs thermiques	Conductivité thermique Mise en forme Assemblage (brasage) Tenue à la corrosion	1050A, 1100, 3003, 3005, 6060, 6063, 6011	Pour les échangeurs brasés : 3003 et 3005 plaqués
Conducteurs électriques	Résistivité électrique	1050A, 1350, 1370, 6101	
Emballage	Légèreté Mise en forme Aptitude à la décoration Effet barrière Compatibilité alimentaire	1200, 3000, 3104, 3004, 5052, 5154A, 5182	
Articles culinaires	Emboutissabilité Aptitude aux traitements de surface	1050A, 3003, 3004, 4006, 4007, 5052, 5754	Les 4006 et 4007 sont des alliages pour émaillage
Fil	Caractéristiques mécaniques Tenue à la corrosion	5051, 5052, 5754, 5056, 6101	Fil soudage 4043 5754, 5356, 5183

Tableau 1.4 – Domaine d'utilisation des alliages aluminium.[4]

1.8.1 Le secteur des transports (25 %)

La légèreté d'aluminium peut être associée à des caractéristiques mécaniques élevées ce qui est décisif pour les matériaux utilisés dans les transports. De ce fait, la plupart des engins de transport sont constitués en grande moitié des alliages d'aluminium, à titre d'exemple nous citons :

- Les avions actuels sont constitués à 80 % d'aluminium.
- L'aluminium est aussi utilisé dans les transports terrestres rapides comme les trains à grande vitesse (TGV), les bateaux à grandes vitesses (NGV)
- La carrosserie automobile : des véhicules plus légers consomment moins de carburant et polluent moins l'atmosphère. [22]

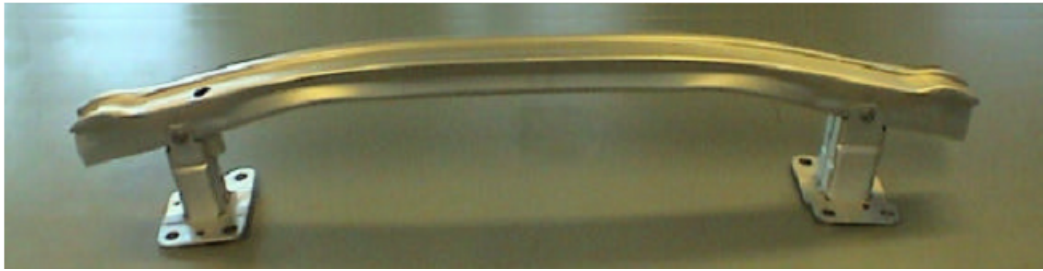


Figure 1.23 – Pare-chocs avant en aluminium et de deux "crash boxes" en aluminium.

1.8.2 Le secteur des bâtiments (21 %)

Dans le secteur bâtiment, les alliages d'aluminium sont utilisés les cadres de portes et de fenêtres, les bardages de façades ou encore les toitures qui se font de plus en plus avec de l'aluminium. L'aluminium a une bonne formabilité, ce qui donne la possibilité de produire économiquement des profilés de formes complexes pour les cadres de portes et de fenêtres. De plus, sa légèreté et sa bonne résistance à la corrosion et son aspect décoratif (anodisé ou peint) le rendent attractif pour l'industrie du bâtiment. [4]



Figure 1.24 – L'aluminium dans le domaine bâtiment.

1.8.3 Le secteur des emballages (21 %)

La plupart des des emballages alimentaires sont produits en aluminium : les boîtes de conserve, les boîtes de boisson ou encore les feuilles minces pour l'emballage alimentaire. et ce pour les caractéristique que présente l'aluminium tel que : La non toxicité , sa facilité de le mettre en forme, la bonne résistance à la corrosion et recyclable économiquement.

L'aluminium est très utilisé pour les cannettes boissons (100 % aux États-Unis, 50 % en Europe [1]) et des produits enveloppés dans des feuilles minces d'aluminium (aluminium ménager, beurre, cigarettes, chocolat etc...).[18]



Figure 1.25 – Les emballages en alimentaire en aluminium.

1.9 Les procédés de fabrication des tubes en alliages d'aluminium

1.9.1 Les Tubes en alliages d'aluminium soudés

Nous pouvons distinguer deux méthodes pour fabriquer des tubes en alliages aluminium à partir des tôles sous forme des bandes :

1. **Par procédé continu pour des tubes de diamètres inférieurs ou égaux à 406,4 mm** : La bande de tôle passe dans une série de cages de galet qui la déforme progressivement de façon à obtenir un tube fermé. Ce tube est ensuite soudé sans apport de métal (par résistance, par rapprochement, etc. ...)[13].

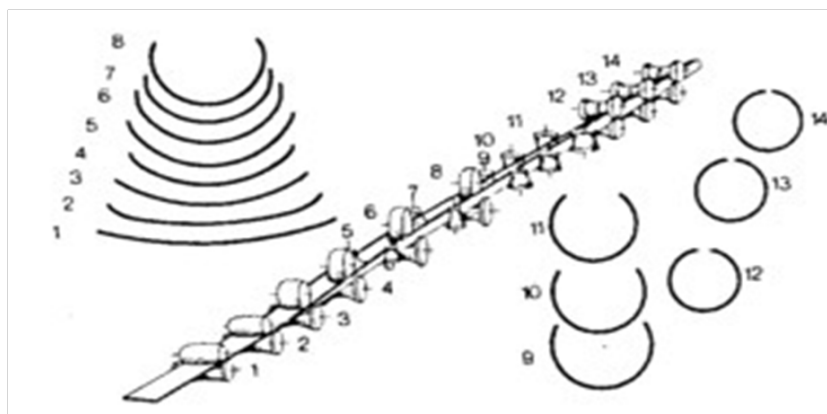


Figure 1.26 – Les étapes de procédé continu pour des tubes de diamètres inférieurs ou égaux à 406,4 mm.[13]

2. **Par procédé discontinu pour les tubes de diamètres supérieurs ou égaux à 406,4 mm** : Après grenailage, rabotage et croquage de ses rives, la tôle est mise en

forme par des presses puissantes. Le tube est ensuite soudé avec apport de métal par arc immergé sous flux protecteur à l'intérieur et à l'extérieur[13].

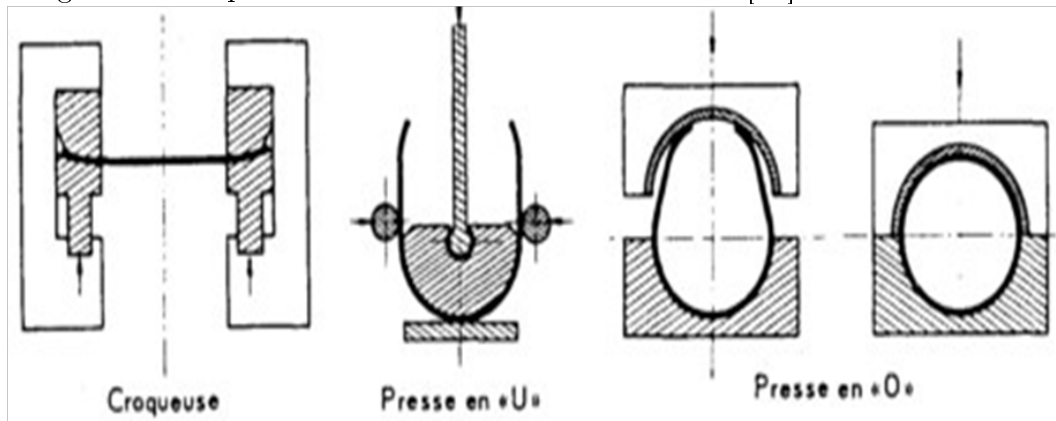


Figure 1.27 – Les étapes de procédé continu pour des tubes de diamètres supérieurs ou égaux à 406,4 mm.[13]

1.9.2 Les Tubes en alliages d'aluminium non soudés

On utilise comme produit de départ un produit plein qui peut être un lingot, un rond, un bloom ou une billette. Des opérations successives permettent de rendre malléable le matériau (chauffage), de faire un trou (perçage), de réduire l'épaisseur (laminage). Le perçage et le laminage s'effectuant par déformation et sans enlèvement de matière les demi produits sont préalablement portés à une température de 135°C environ..[13]

1. Le perçage a la presse :

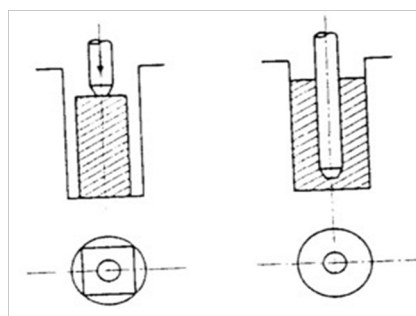


Figure 1.28 – Schéma caractérisant le perçage à la presse.[13]

2. Le Perçage au laminoir oblique :

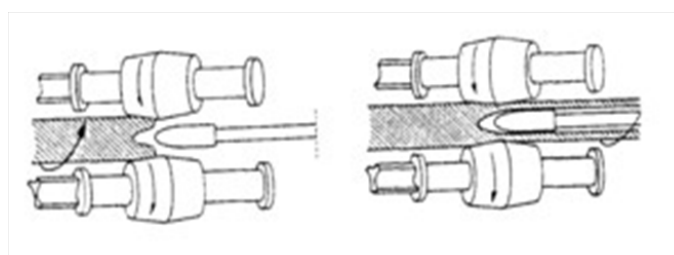


Figure 1.29 – Schéma caractérisant le perçage à la presse.

3. **Laminoir à pas de pèlerin** : L'ébauche, enfilée sur une tige métallique pleine, est écrasée par des cylindres en formes de cames.

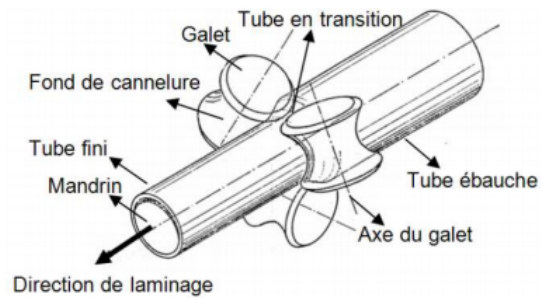


Figure 1.30 – Laminoir à pas de pèlerin.[25]

4. **La presse à filer** : L'ébauche enfermée dans un récipient est poussée par un poinçon terminé par une aiguille, actionné par une presse très puissante. Le métal est forcé de sortir du récipient en filant entre l'aiguille et une filière lubrifiée avec de la poudre de verre.

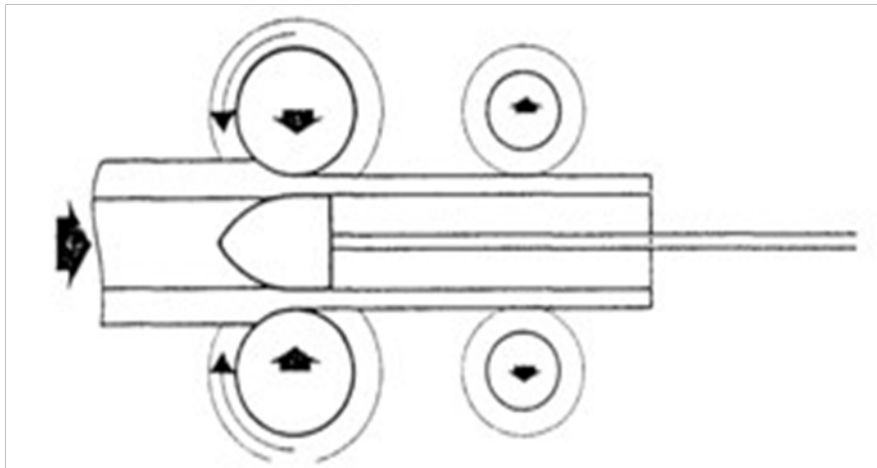


Figure 1.31 – La presse à filer.[13]

5. **Laminoir automatique Stiefel** : Le métal est laminé entre une poire placée à l'intérieur de l'ébauche et des cylindres à gorge torique.

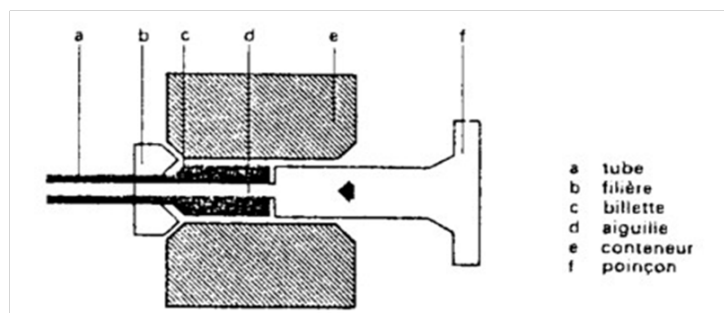


Figure 1.32 – Laminoir automatique Stiefel.[13]

1.10 Les modes de déformation des tubes en alliages d'aluminium sous chargement de compression uni-axial

1.10.1 Une comparaison entre le mode de déformation stable et instable

Deux types de mode d'écrasement en compression axiale peuvent se produire suivant les dimensions géométriques et les propriétés mécaniques du matériau : le mode d'écrasement stable et le mode d'écrasement instable. La figure 1.33 illustre la courbe caractéristique force-déplacement de ces deux types d'écrasement.

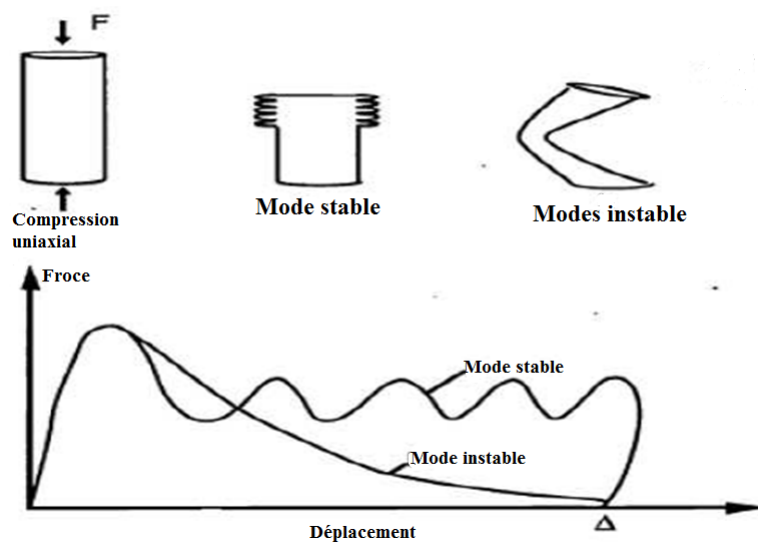


Figure 1.33 – La courbe caractéristique de mode d'écrasement stable et instable.[34]

Il est évident que l'énergie dissipée (l'aire de la courbe force-déplacement) est beaucoup moins considérable lors de l'écrasement en mode instable que lors de l'écrasement en mode stable. Le mode d'écrasement stable se caractérise par la formation de plis progressifs pour des structures en métal.[34]

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.

Les tubes lorsqu'ils sont soumis à des efforts de compression, s'ils sont de grande longueur, et s'ils ne sont pas maintenus latéralement, fléchissent dans le plan dans lequel la résistance est la plus faible et le matériau subit une déformation selon le mode instable. C'est ce phénomène que l'on appelle flambement ou effet EULER.[17]

L'instabilité entraîne un écrasement en mode de flexion et représente un mauvais comportement d'absorption d'énergie. Mais si leur longueur est inférieure à celle que cause le flambement ces

derniers ont un comportement précis et ils se déforment selon le mode stable.[3]

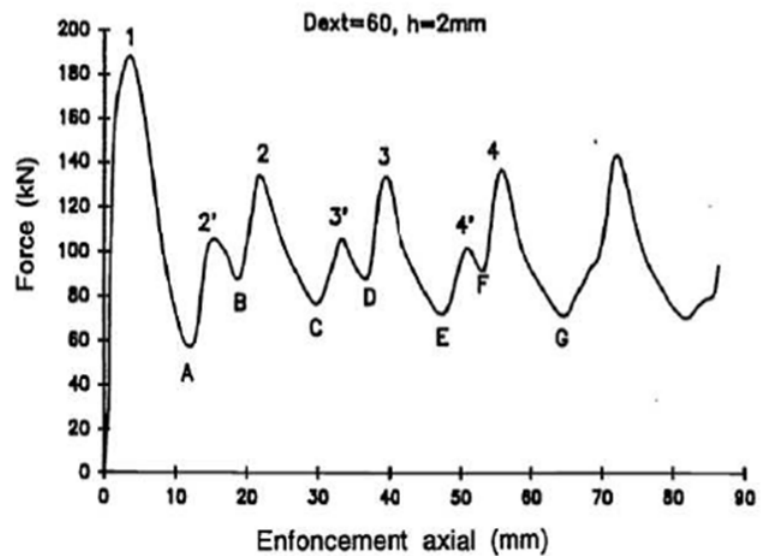
1.10.2 Les modes de déformation stables

1.10.2.1 Le Mode de déformation stable axisymétrique AM (accordéon)

Une courbe typique de la force d'écrasement en fonction du déplacement pour un mode axisymétrique est présentée par la figure 1.34. [3]



(a) Mode de déformation axisymétrique d'une éprouvette en aluminium. []



(b) Courbe force-déplacement d'écrasement pour un mode axisymétrique. []

Figure 1.34 – Le mode de déformation axisymétrique.

La force augmente jusqu'au moment où le premier flambage apparaît (1). Ensuite, la paroi commence à fléchir vers l'extérieur, la force F chute brutalement jusqu'à la formation complète du premier pli. La force atteint sa valeur minimale (A). Du fait de l'écrasement dans cette zone fortement déformée, la force recommence à augmenter. La paroi au voisinage de cette zone déjà déformée a tendance à fléchir vers l'intérieur. La force augmente jusqu'au moment de l'apparition du flambage en mode de flexion interne (2'). Puis, la force commence à baisser en accompagnant une flexion interne de la paroi (B), la force recommence à augmenter en accompagnant une flexion externe jusqu'au moment du 2ème flambage (2). Ensuite, la force chute à nouveau jusqu'au point (C) ... ainsi de suite.[34, 3]

1.10.2.2 Le Mode de déformation stable non-axisymétrique (diamant) DM

Les mécanismes de dissipation d'énergie par écrasement d'un tube circulaire en mode diamant sont semblables à ceux d'un tube prismatique de section constante. Or le processus d'écrasement

d'un tube prismatique est relativement plus facile à modéliser mathématiquement. ABRAMOVICZ et JONES ont utilisé un modèle de tube prismatique pour calculer la charge moyenne d'écrasement d'un tube circulaire en mode diamant par une simple équivalence géométrique[2]. Par exemple, pour le mode diamant à deux lobes circonférentiels (2-D), géométriquement il est raisonnable de choisir un tube à section carrée équivalent. Et pour le mode 3-D, c'est le tube à section hexagonale qui correspond le mieux au mode d'un tube circulaire en 3-D. [34, 3]



Figure 1.35 – Le mode de déformation diamant.[3]

1.10.2.3 Le Mode de déformation stable mixte XMD

Dans certains cas on observe l'apparition de mode mixte qui est la combinaison entre le mode axisymétrique qui apparait en premier tandis qu'après le 2eme ou le 3eme lobe il y'a le mode diamant qui prend effet.[15]



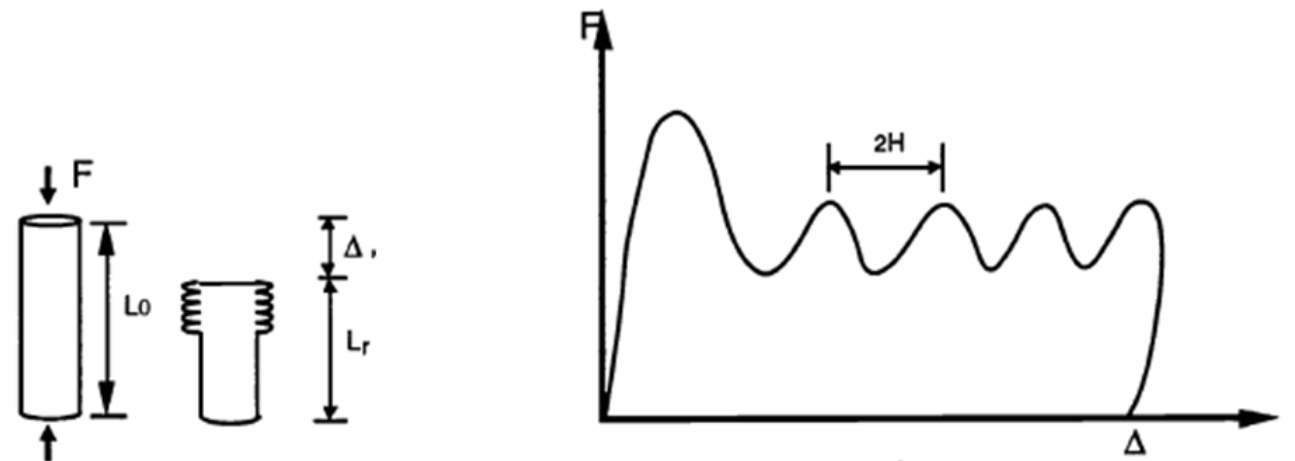
Figure 1.36 – Mode de déformation mixte.[3]

1.11 Mécanisme d'absorption d'énergie

Le processus principal d'absorption d'énergie d'un tube métallique est la formation des plis, dans lesquels le métal subit une grande déformation irréversible. Du point de vue microscopique, cette grande déformation résulte du glissement cristallin et du mouvement des dislocations.

La ductilité des métaux comme les alliages d'aluminium est entièrement due à leur capacité à supporter le glissement extensif sans nucléation ni apparition de fissures. Le processus de glissement extensif devient difficile lorsque la déformation augmente. L'apparition de fissures est possible dans ce cas.[34]

A partir de la courbe force-déplacement d'une structure soumise à une compression axiale (F), et ayant un déplacement(Δ) dans la direction de cette force, certains paramètres sont utilisés pour évaluer la performance en matière d'absorption d'énergie de cette structure.[1]



(a) un tube avant et après déformation.

(b) Courbe force déplacement typique de compression uni-axiale.

Figure 1.37 – l'absorption d'énergie d'un tube métallique.[34]

Énergie absorbée :

$$E_{abs} = \int_0^{\Delta l} F d\delta \quad (1.1)$$

Force moyenne :

$$F_{moy} = \int_0^{\Delta l} F d\delta / \Delta l \quad (1.2)$$

Énergie spécifique d'absorption :

$$SEA = \frac{F_{moy}}{\rho A} \quad (1.3)$$

avec :

F : force appliquée ;

Δl : déplacement ;

A : aire de la section orthogonale à la direction de la charge ;

ρ : la masse volumique du matériau ;

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

1.12 Conclusion

Ce chapitre nous a permis en premier lieu de consolider et enrichir nos connaissances concernant les alliages d'aluminium ainsi que leurs classifications et caractéristiques mécaniques, en deuxième lieu nous a permis d'acquérir les notions de base sur les divers procédés de fabrication des tubes en alliages d'aluminium et le comportement de ces derniers sous chargement de compression uni-axial en régime quasi-statique, ainsi que les différents modes de déformation résultants et leurs aspect d'absorption d'énergie.

Chapitre 2 : Étude expérimentale

Chapitre 2

Étude expérimentale

2.1 Introduction

Nous abordons dans cette partie l'aspect expérimental de notre travail. Cette étude expérimentale porte sur le comportement mécanique des tubes en aluminium (série 4000) de section circulaire renforcés (respectivement par des copeaux d'aluminium, de liège naturel et d'une mousse polymérique) soumis à un chargement de compression uni-axial (écrasement) en régime quasi-statique. La première étape de cette étude consiste à identifier les caractéristiques mécaniques de matériau étudié à partir d'essais de traction simple, dureté et micro-dureté. Ensuite des essais de compression uni-axial à différentes vitesses de chargement sont réalisées sur des éprouvettes tubulaire non renforcées et renforcées, afin de constater l'effet de renforcement sur le comportement mécanique des tubes étudiés, ainsi que leurs effet sur le taux absorption d'énergie. Finalement une conclusion est tirée.

2.2 Caractérisation de Matériaux d'étude

2.2.1 Les Tube en aluminium

Le matériau étudié est un tube en aluminium (série 4000) de section circulaire de diamètre extérieur $D_e = 16\text{mm}$ et d'épaisseur $e = 1.4\text{ mm}$. Le tableau ci-dessous présente sa composition chimique obtenue avec une analyse de spectrométrie (entreprise ENIEM) sur un échantillons de dimension $3 \times 3\text{cm}^2$.

Composition chimique en %	Si	Cu	Mg	Ni	Zn	Fe
Alliages Al	2.96	1.22	0.94	0.69	0.14	0.17

Tableau 2.1 – Composition chimique en pourcentage de matériau étudié.

Les observations microscopiques sont faites avec un microscope optique sur des échantillons polis et attaqués chimiquement avec une solution (NaOH) et un temps de maintien $t=20s$. Les figures ci-dessous montrent les micrographies des tubes en aluminium selon l'épaisseur et l'axe du tube à différents grossissements.

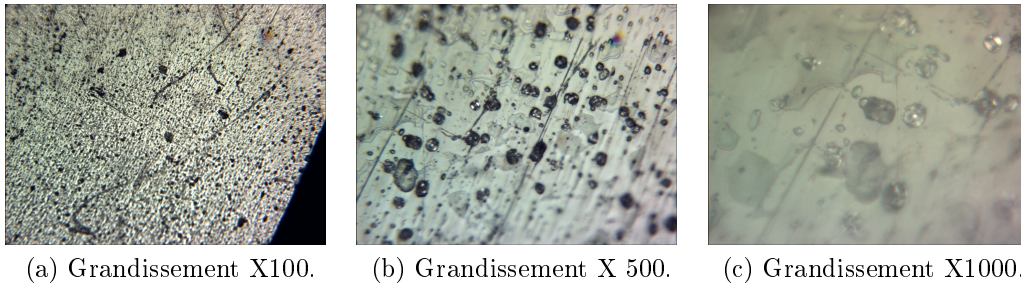


Figure 2.1 – Micrographies optiques selon l'axe du tube.

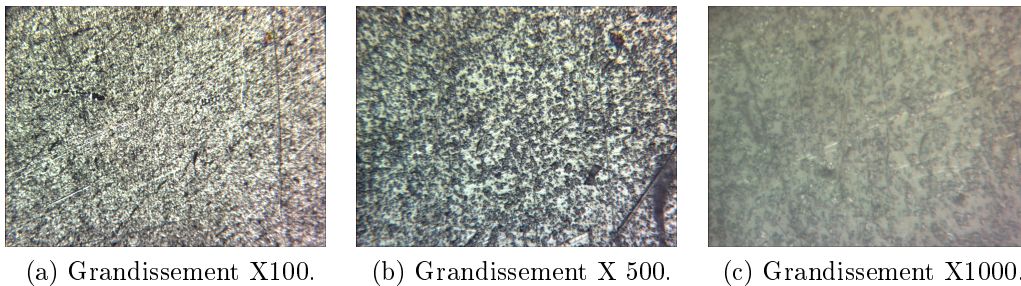


Figure 2.2 – Micrographies optiques selon l'épaisseur.

Les observations micro-structurales réalisées sur MEB en modes SE et BSE avec différents grossissement sont illustrés sur les figures 2.3.

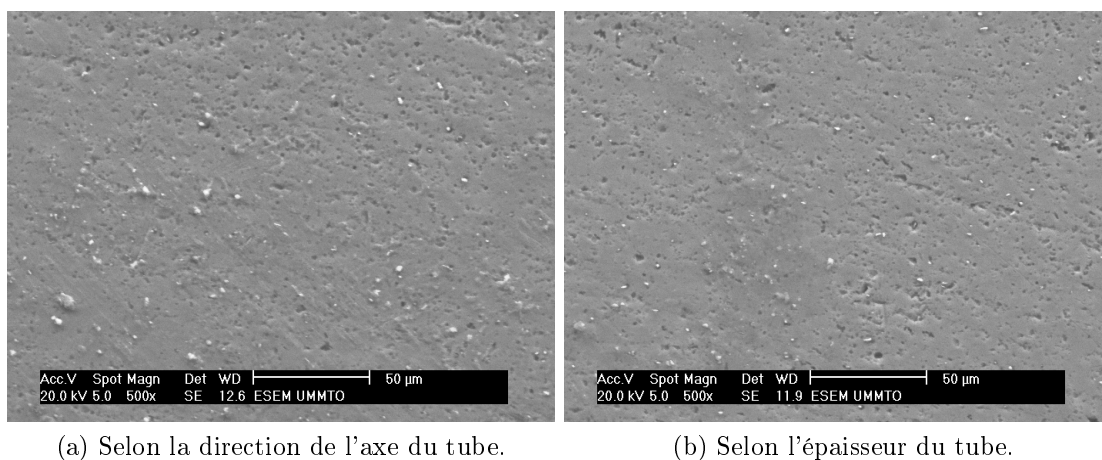
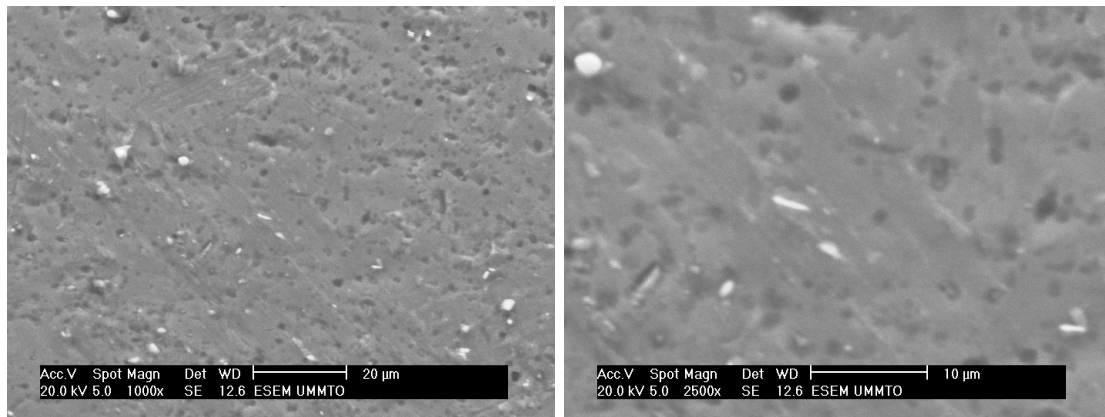
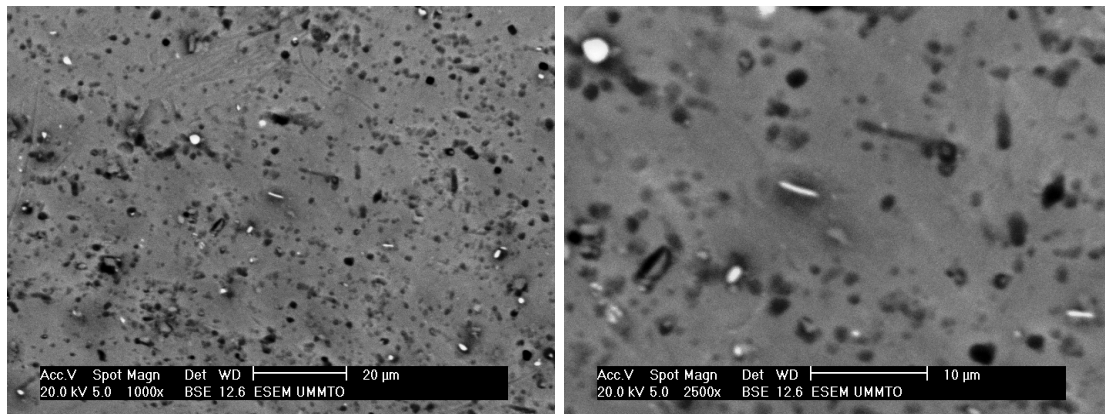


Figure 2.3 – Observation MEB selon l'épaisseur et l'axe du tube.



(a) Observation avec MEB en mode SE



(b) Observation avec MEB en mode BSE.

Figure 2.4 – Observation MEB en modes SE et BSE.

Les essais de dureté et de micro-dureté sont effectués respectivement sur le duromètre et le microduromètre présentés dans les figures 2.5 et 2.6. Les résultats obtenus sont affichés dans le tableau 2.2.



Figure 2.5 – Duromètre

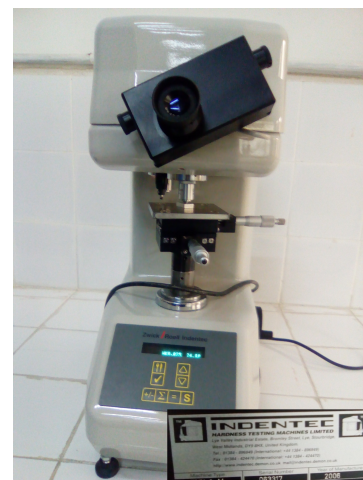


Figure 2.6 – Microduromètre

Dureté Brinell (HB)	Micro-dureté Vickers (HV)
30.63	96.33

Tableau 2.2 – Micro-dureté et la dureté.

L'essai de traction est réalisé sur une machine hydraulique conventionnelle (Figure 2.7). Les dimensions de l'éprouvette utilisée sont mentionnées dans la figure 2.8.



Figure 2.7 – Machine de traction hydraulique conventionnelle.

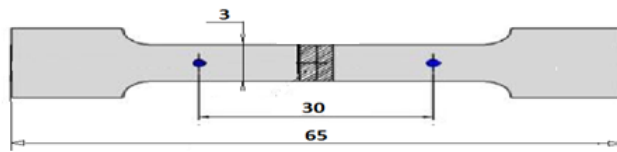


Figure 2.8 – Dimension de l'éprouvette de traction.

La figure 2.9 représente la courbe contrainte-déformation obtenue lors de l'essai de traction simple sur une éprouvette extraite dans le sens de l'axe du tube (figure 2.10.a).

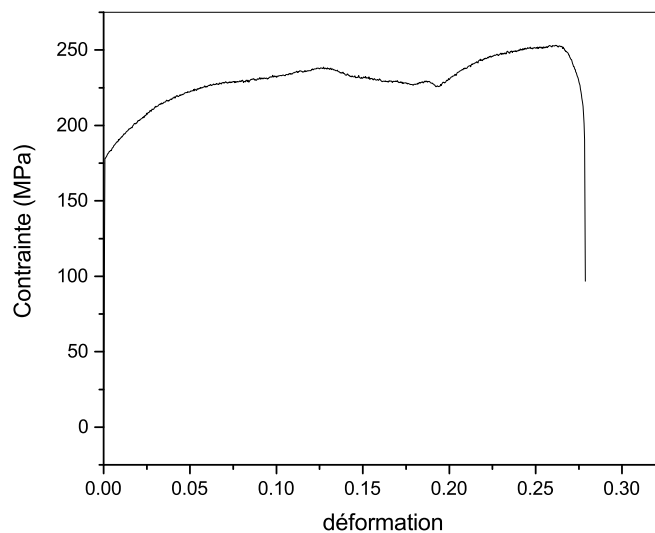
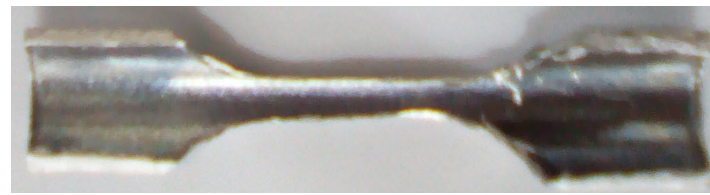


Figure 2.9 – Courbe contrainte-déformation obtenu dans l'essai de traction.

La figures 2.11 montre les éprouvettes de traction avant et après déformation. La rupture de l'éprouvette s'est produite au milieu de l'éprouvette avec un angle de 45° (zone cisaillement max).



(a) Avant déformation.



(b) Après déformation.

Figure 2.10 – Éprouvette de traction après et avant déformation.

Les caractéristiques mécaniques de matériau étudié sont regroupés dans le tableau 2.3.

Module de Young E (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)	Coef de Poisson ν	Limite de traction (MPa)
67000	177	0.33	244

Tableau 2.3 – Caractéristiques mécaniques de matériau étudié.

2.2.2 Les Copeaux d'aluminium

Les copeaux étudiés (Figure 2.11) sont en alliages d'aluminium **AlMg3Mn** de la série 5000 (5454). Ils sont produits à partir de l'usinage d'une tôle laminée à froid d'une épaisseur de 5 mm. La composition chimique de cet alliage est présentée dans le tableau 2.4.

Composition chimique en %	Cu	Mg	Mn	Si	Ti	Fe
Alliages Al-Mg	0.008	2.4	0.42	0.29	0.16	0.43

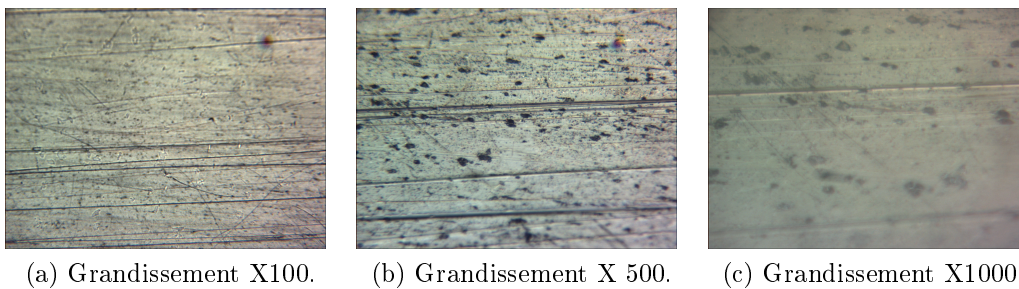
Tableau 2.4 – Composition chimique des copeaux en aluminium.[7]

Les copeaux étudiés sont obtenus par le procédés de fraisage avec lubrification à partir d'une tôle en aluminium.



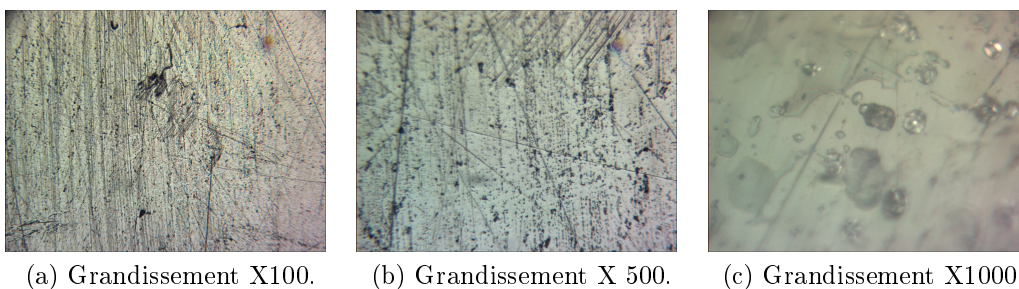
Figure 2.11 – Copeaux en aluminium.

Les observations microscopiques réalisés avec un microscope optique sur des échantillons polis et attaqués chimiquement (solution de Keller) avec un temps de maintien $t=30s$.



(a) Grandissement X100. (b) Grandissement X 500. (c) Grandissement X1000.

Figure 2.12 – Micrographie obtenue selon l'épaisseur de tube.



(a) Grandissement X100. (b) Grandissement X 500. (c) Grandissement X1000.

Figure 2.13 – Micrographie obtenue selon l'axe de tube.

La figure 2.14 montre les dimensions de l'éprouvette plate utilisée dans l'essai de traction selon la norme *ASTM – E10002*[9]. Les essais de traction sont réalisés sur des éprouvettes selon les trois directions de laminage 0° , 45° et 90° .

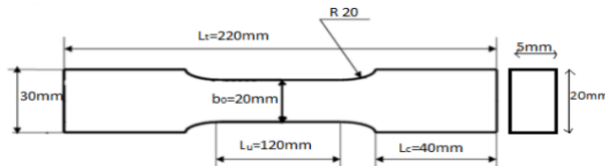


Figure 2.14 – Dimension de l'éprouvette utilisé dans l'essai de traction.[9]

Les résultats des essais réalisés sont regroupés dans la figures 2.15. Les courbes contraintes déformation montrent une orthotropie apparente dans les zones d'écroutissage et d'endommagement.

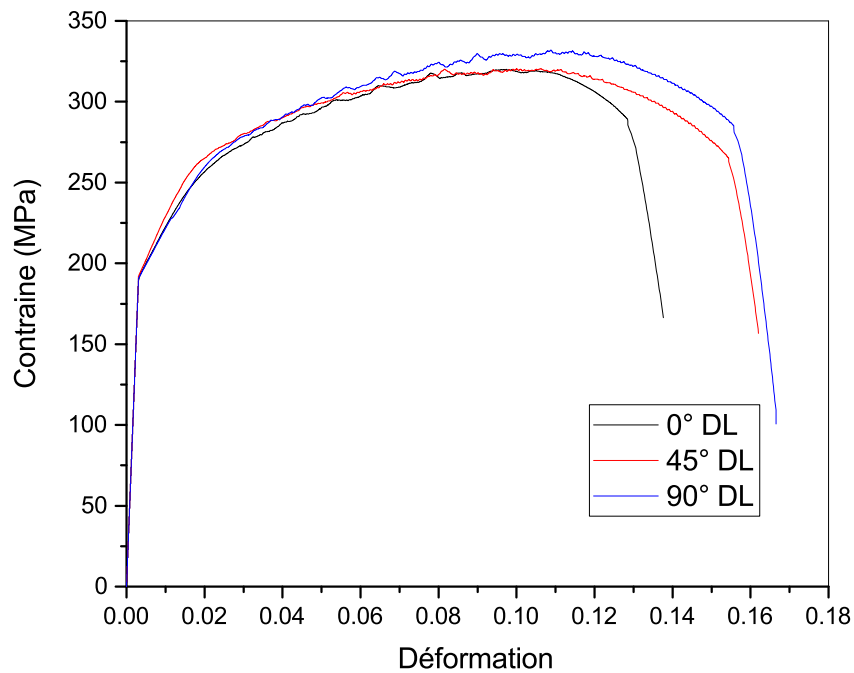


Figure 2.15 – Courbe contrainte-déformation de l'essai de traction sur la tôle en aluminium.

Les caractéristiques mécaniques des copeaux obtenues a partir de l'essai de traction sont illustrées dans le tableau 2.5.

Module de Young E (MPa)	Limite d'élasticité Re (MPa)	Coefficient de poisson ν	r_0	r_{45}	r_{90}
62000	186	0.33	0.12	0.14	0.15

Tableau 2.5 – Caractéristiques des copeaux en aluminium série 5054.

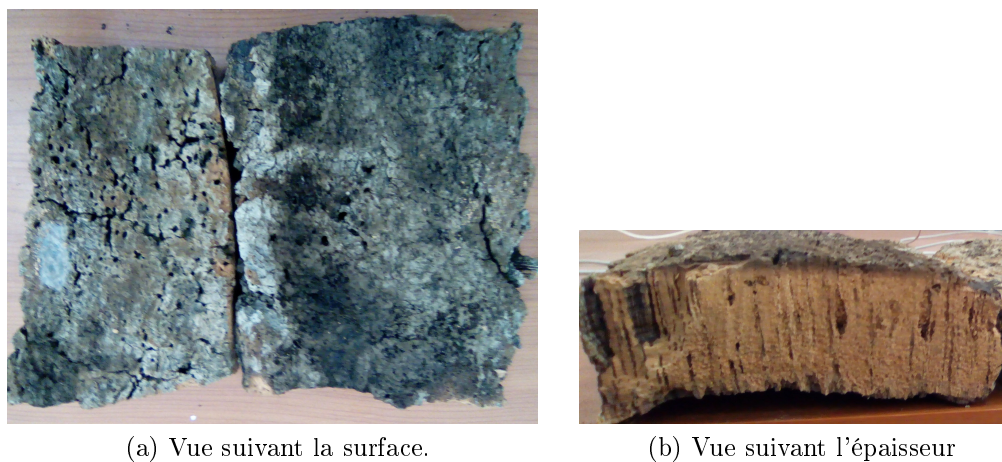
r_0, r_{45} et r_{90} : représentent respectivement les coefficients Lankford selon les trois direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° .

2.2.3 Liège naturel

Matériaux naturel, extrait de forêts. Il est utilisé sans additifs ; il est aggloméré par la propre résine du liège sous l'action de la vapeur et de la pression. Renouvelable, recyclable, réutilisable et Gaz enfermé dans les cellules identique à l'air sans dioxyde de carbone[33]. Le liège utilisé dans cette étude est obtenu d'un arbre de chênes-lièges (Figure 2.16) dans la région de Tamgout (la commune d'Aghribs, Azeffoun).



Figure 2.16 – Arbre chênes-lièges.



(a) Vue suivant la surface.

(b) Vue suivant l'épaisseur

Figure 2.17 – Liège naturel.

La composition chimique du liège naturel est présentée dans le tableau 2.6. Le liège naturel est considéré comme un matériau poreux.

Éléments	Subérine	Lignine	Cellulose et polysaccharides	Tanins	Cires	Cendres
Pourcentages en masse	45 %	27%	12%	6 %	5%	5 %

Tableau 2.6 – La composition chimique de liège naturel utilisée.[33]

La macrographie de liège naturel est réalisée après polissage (sans attaque chimique) avec un microscope optique (Figure 2.18 et 2.19). Les observations sont faites selon l'épaisseur et la surface.

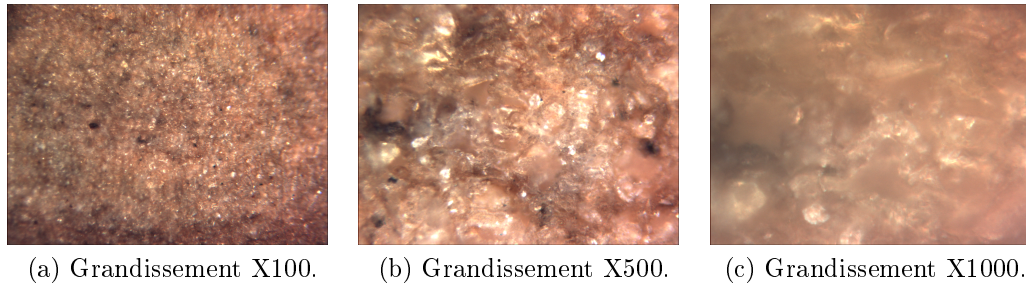


Figure 2.18 – Micrographie selon la direction de l'épaisseur.



Figure 2.19 – Micrographie selon la direction de la surface.

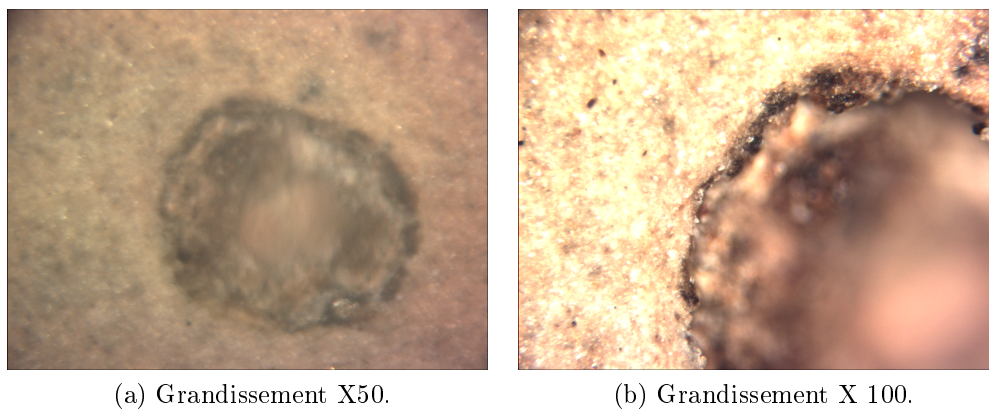


Figure 2.20 – Micrographie des pores du liège naturel.

2.2.4 La mousse polyuréthane

La mousse polyuréthane est un polymère, que l'on peut décrire comme des chaînes de structures tridimensionnelles, constituées de plus petites unités longues et répétées, appelées monomères. Ces monomères contiennent du carbone, de l'hydrogène de l'oxygène et de l'azote. Pour former les chaînes, les plus petits maillons sont polymérisés ou accrochés les uns aux autres. Les mousses polyuréthane sont largement utilisées pour leur qualité d'isolation thermique, leur adhérence sur tout support, leur pouvoir de flottaison leur capacité à remplir les vides.

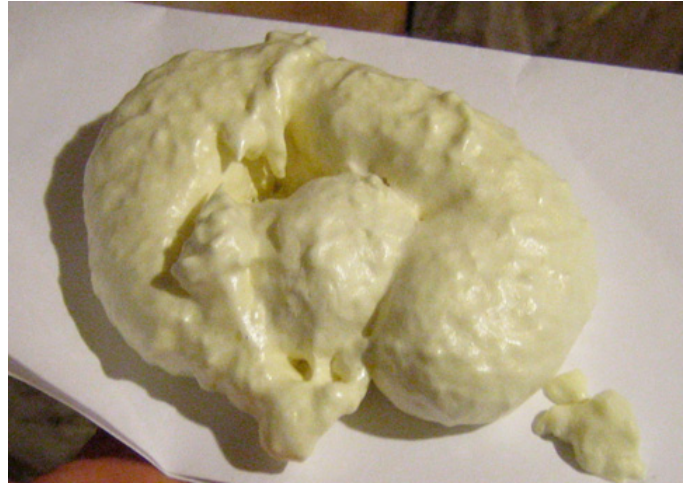


Figure 2.21 – Mousse polyuréthane.(Joseph Santelli, Creative Commons)

2.3 Influence des paramètres géométriques λ et η sur le mode de déformation résultant

Des essais de compression uni-axial sont réalisés sur des tubes en aluminium non renforcés de différentes longueurs (2d, 2.5 d, 3d, 3.5 d, et 4d) afin de déterminer la longueur idéal pour la formation des rotules plastiques (éviter le phénomène de flambement eulérien). La vitesse utilisée est 10 mm/min.

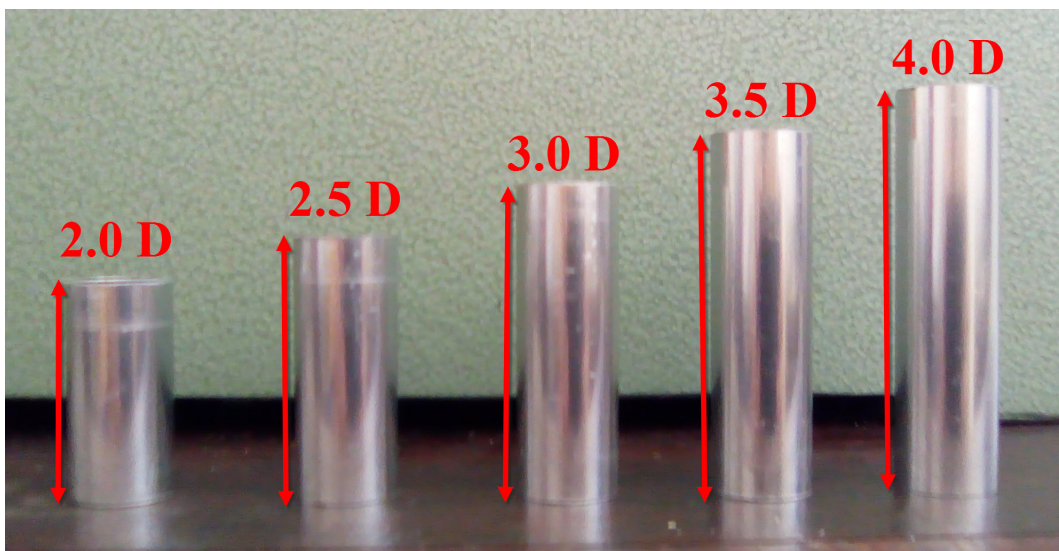


Figure 2.22 – Les éprouvettes de compression uni-axial à différentes longueurs.

Les paramètres géométriques λ et η sont calculés par les relations suivantes :

$$\lambda = \frac{R_m}{L} \quad (2.1)$$

$$\eta = \frac{D}{e} \quad (2.2)$$

avec :

R_m : rayons moyen ;

L : Longueur de éprouvette ;

D : diamètres extérieur ;

e : épaisseur de tube.

Le tableau 2.7 présente les paramètres géométriques obtenus correspondant aux cas étudiés.

Diamètres extérieur $D_e=16$ mm			Rayon Moyen $R_m=8$ mm		
Longueur L (mm)	2,0 D	2,5 D	3,0 D	3,5 D	4,0 D
λ	0,25	0,20	0,16	0,14	0,12
η	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Mode	Mode diamant	Mode diamant	Mode diamant	Mode diamant	Mode eulérien

Tableau 2.7 – Les paramètres géométriques correspondant en cas étudié.

Pour les problèmes de disponibilité de matière, une seule valeur du paramètre η est utilisée, $\eta = 11,4$.

La figure 2.23 regroupe les courbes force-déplacement des tubes en aluminium non renforcés à différentes longueurs.

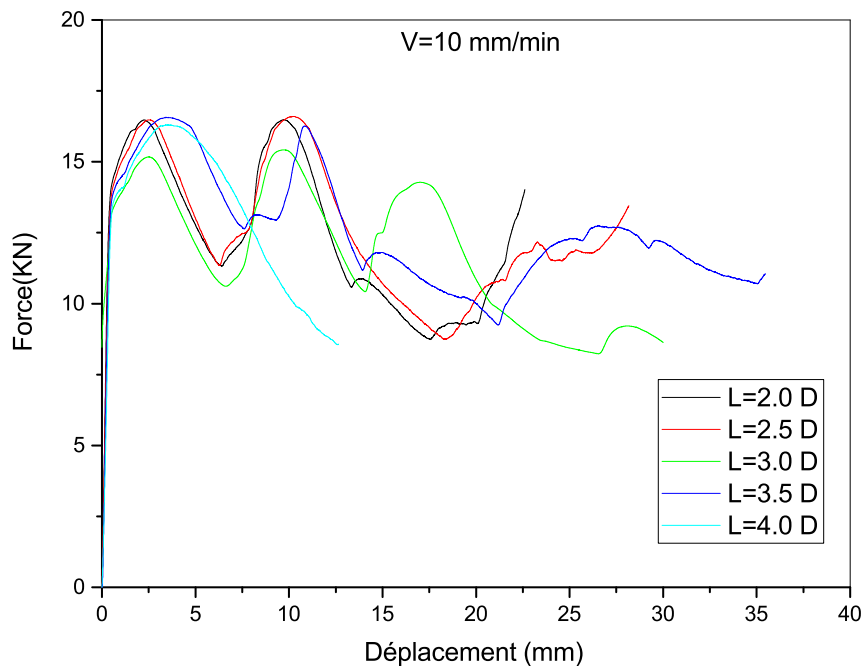


Figure 2.23 – Comparaison des courbes force-déplacement pour la compression des éprouvettes à différentes longueurs.

Les figures 2.24 et 2.25 montrent les éprouvettes tubulaires en aluminium non renforcés à différentes longueurs après déformation, ainsi que les vues après coupe axiale.

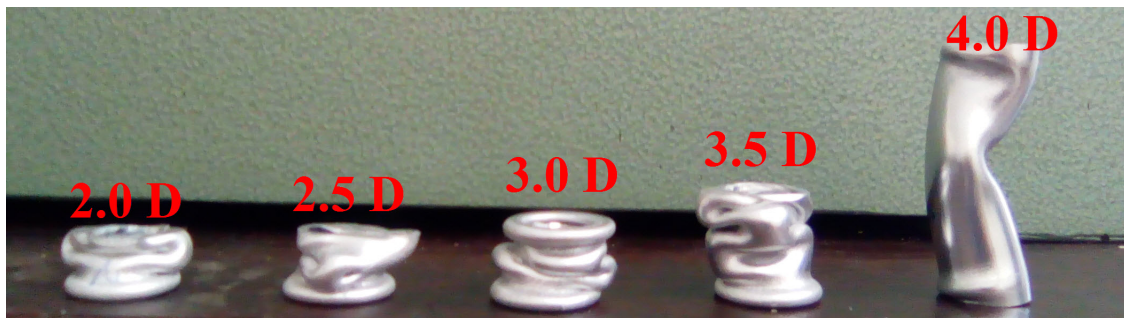


Figure 2.24 – Eprouvettes de compression uni-axial après déformation.

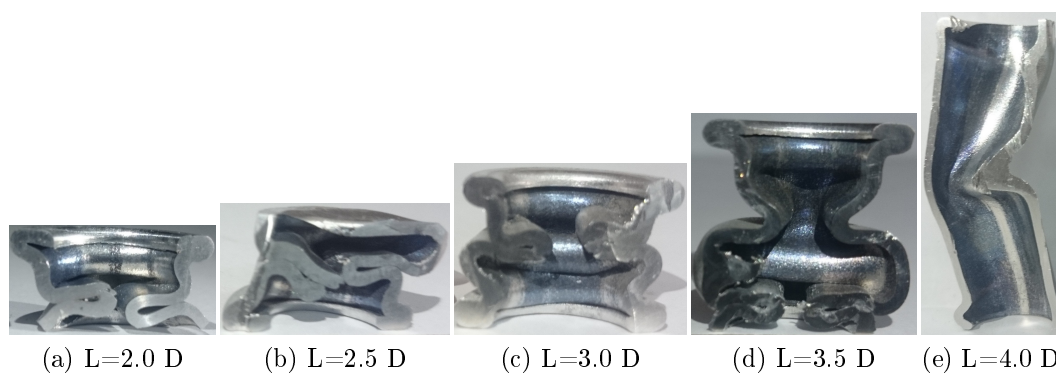


Figure 2.25 – Vues des éprouvettes de compression déformées après coupe axiale .

La courbe force moyenne en fonction des différentes longueurs des éprouvette de compression est présentée dans la figure 2.26. Par contre la figure 2.27 présente Le nombre de rotules formées pour les différents cas étudiés.

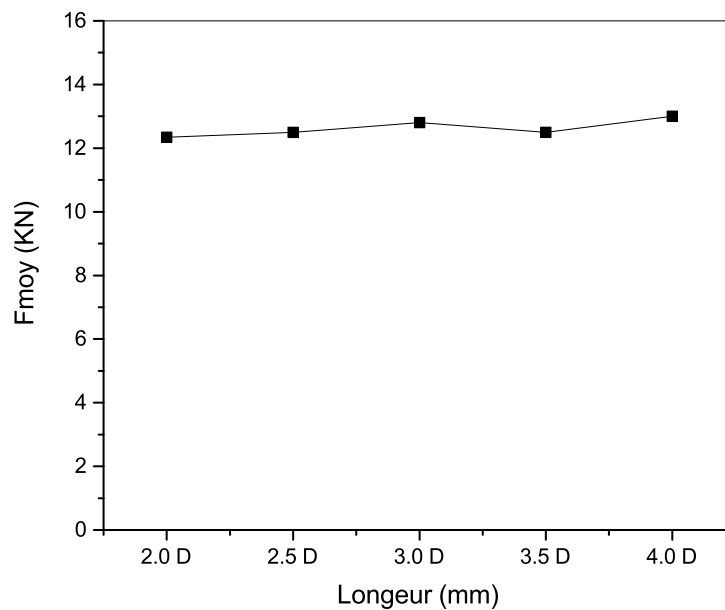


Figure 2.26 – Courbe force moyenne obtenue pour différentes longueurs des éprouvettes.

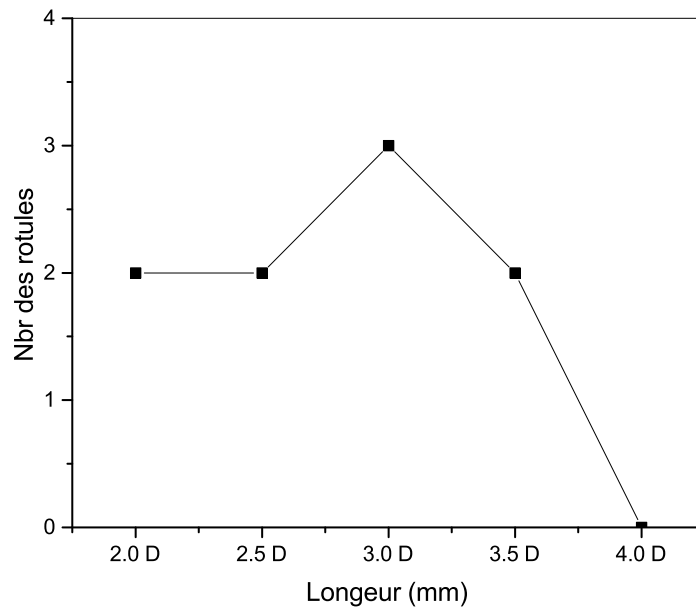


Figure 2.27 – Courbe nombre de rotules formées pour les différents cas étudiés.

La courbe énergie-déplacement pour les différents cas étudiés est présentée dans les figures 2.28 et 2.29.

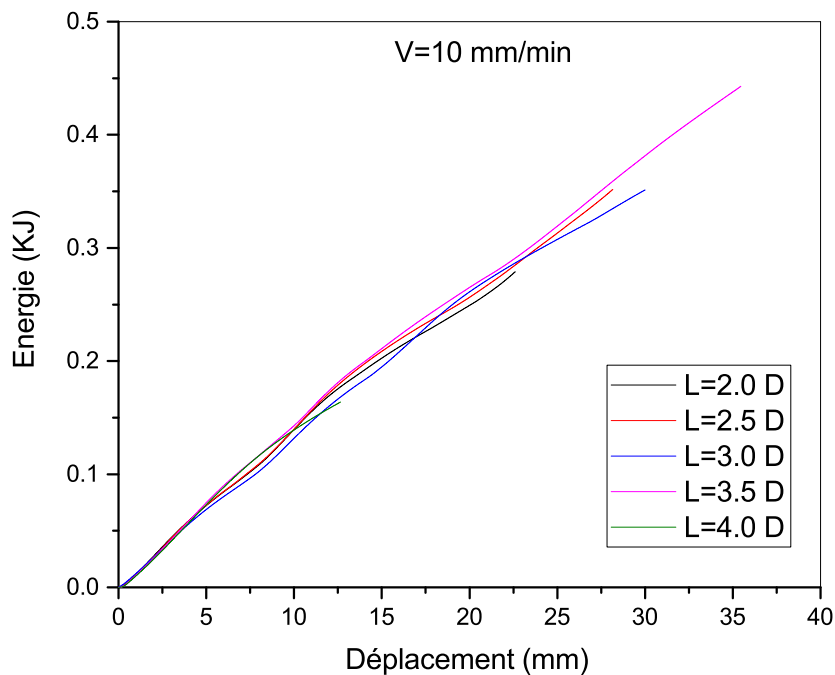


Figure 2.28 – Courbes Énergie absorbée-déplacement pour les différentes longueurs des éprouvettes.

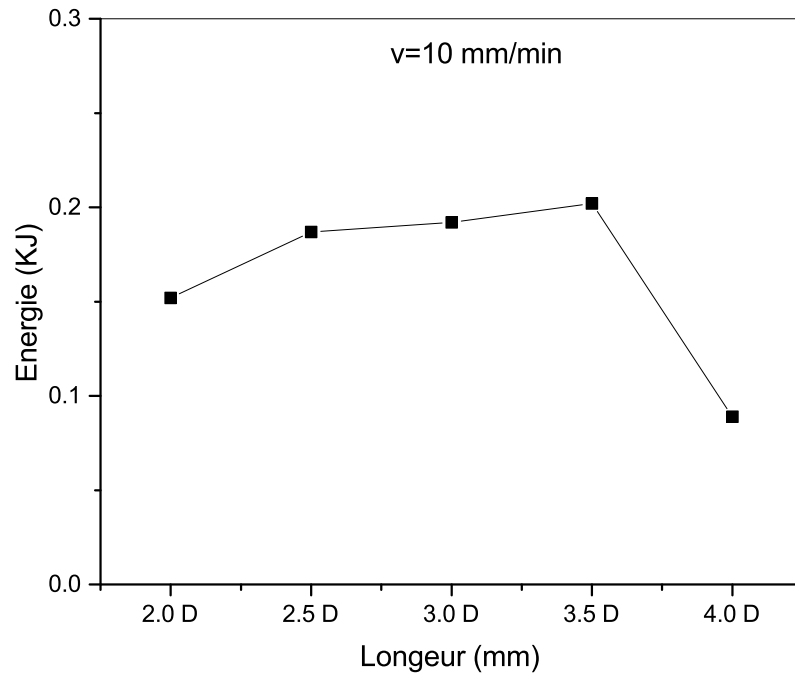


Figure 2.29 – Courbe variation d'énergie absorbée en fonction des éprouvettes testés.

2.4 Comportement des tubes en aluminium non renforcés sous Compression uni-axiale

Les dimensions de l'éprouvette de compression uni-axiale sont mentionnées dans la figure 2.30.

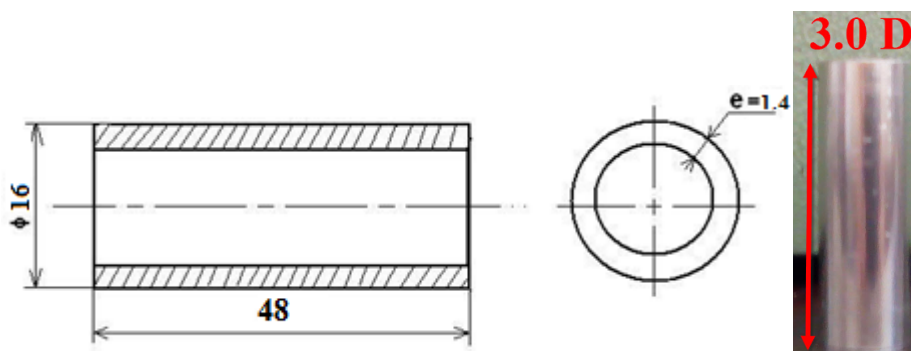


Figure 2.30 – Dimensions de l'éprouvette étudiée .

La figure 2.31 regroupe les courbes force –déplacement de compression uni-axiale à différentes vitesses de chargement sur des éprouvettes tubulaires non renforcés. Les courbes obtenues montrent que le comportement mécanique des tubes non renforcés sous chargement de compression uniaxiale est insensible à la vitesse de déformation, ainsi que les nombres des lobes formés.

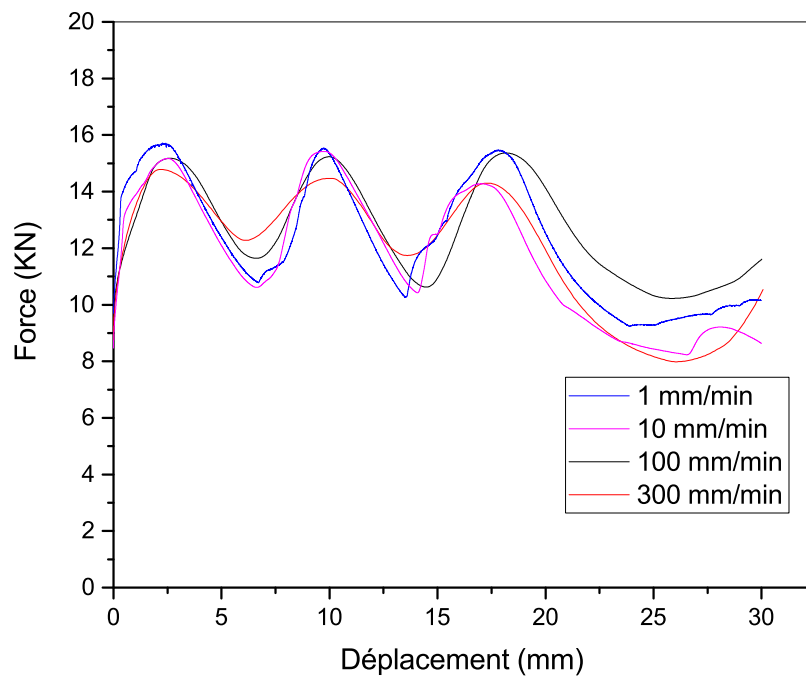


Figure 2.31 – Courbes force-déplacement de compression uni-axiale des tubes vides à différentes vitesses de chargement.

La figure 2.32 illustre l'éprouvette après déformation ainsi que sa vue de coupe des tubes en aluminium non renforcés en mode diamant.



Figure 2.32 – Eprouvette de compression : a) avant déformation, b) après déformation et vue de coupe

Les figures 2.33 et 2.34 représentent respectivement courbe force moyenne –vitesse de chargement et courbe force moyenne-nombres de rotules formées. Les graphes montrent que les forces moyennes mesurées restent inchangées vis à vis la vitesse déformation.

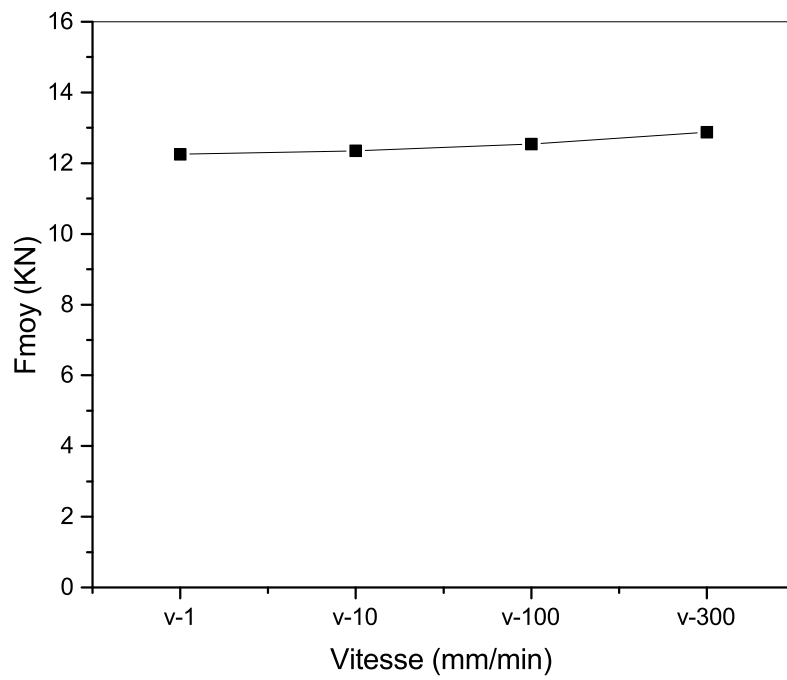


Figure 2.33 – Courbe force moyenne –vitesse des tubes vides .

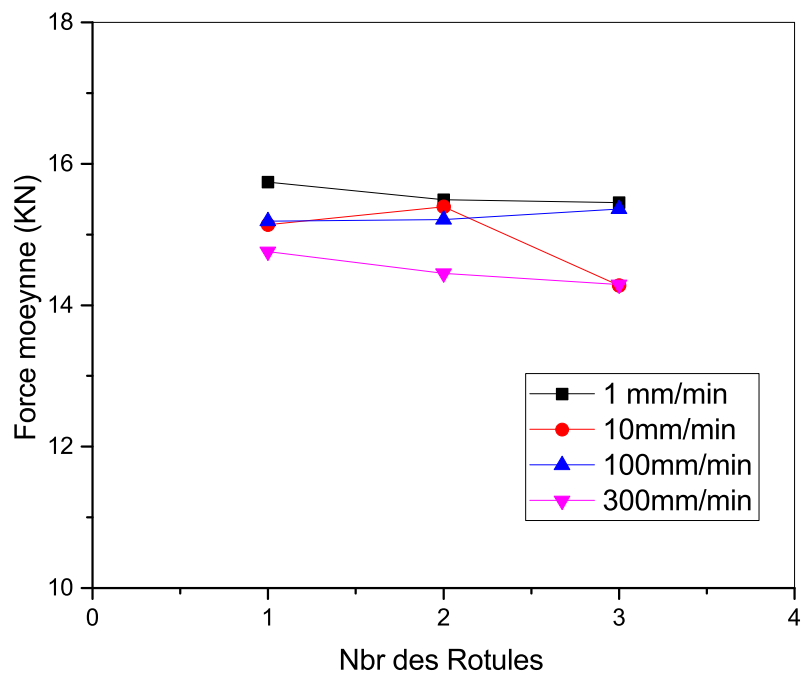


Figure 2.34 – Courbe force moyenne-nombre de rotules formées des tubes vides.

La courbe énergie-déplacement est présentée dans la figure 2.35. Ces résultats démontrent que l'énergie absorbée est indépendante de la vitesse de déformation en régime quasi statique.

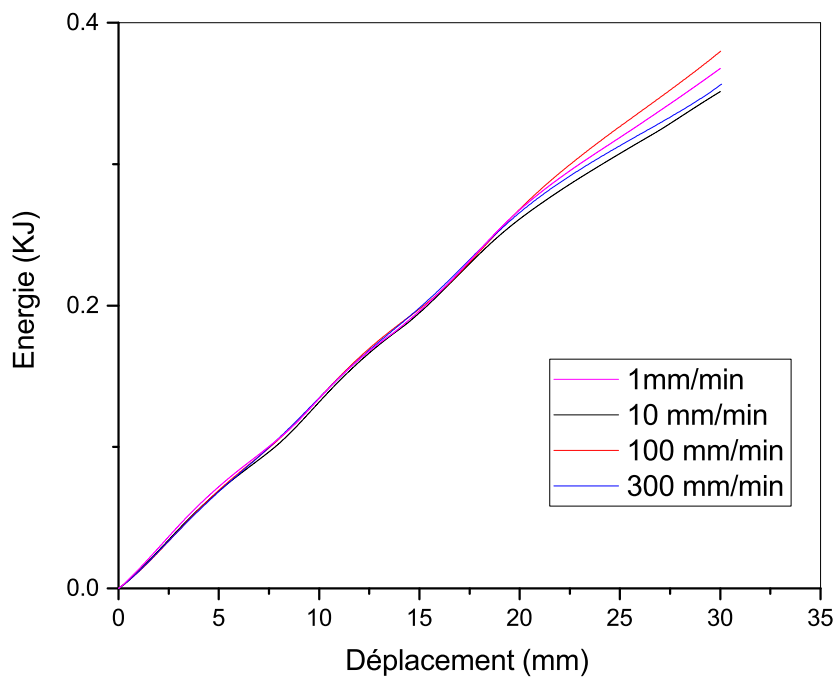


Figure 2.35 – Courbe énergie-déplacement à différentes vitesses de chargement des tubes vides.

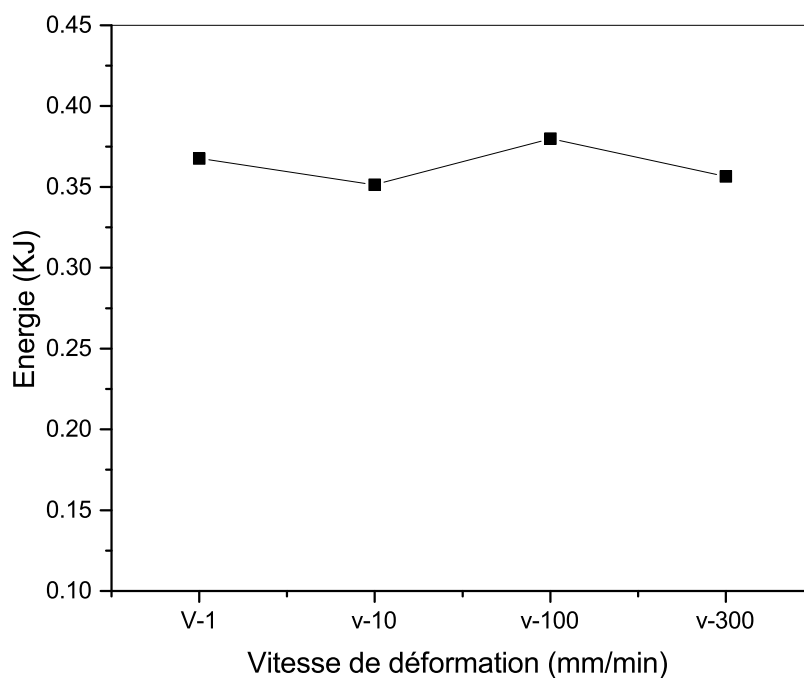


Figure 2.36 – Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation des tubes vides.

2.5 Comportement des tubes en aluminium renforcés avec des copeaux

Les dimensions en mm des éprouvettes tubulaires renforcées avec des copeaux sont présentées dans la figure 2.37.



Figure 2.37 – Dimensions des éprouvettes tubulaires renforcées par des copeaux.

Les courbes force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcées avec des copeaux sont illustrées dans la figure 2.38. Le renforcement des tubes en aluminium avec des copeaux ne change pas l'indépendance de comportement mécanique en compression des tube à la vitesse de chargement.

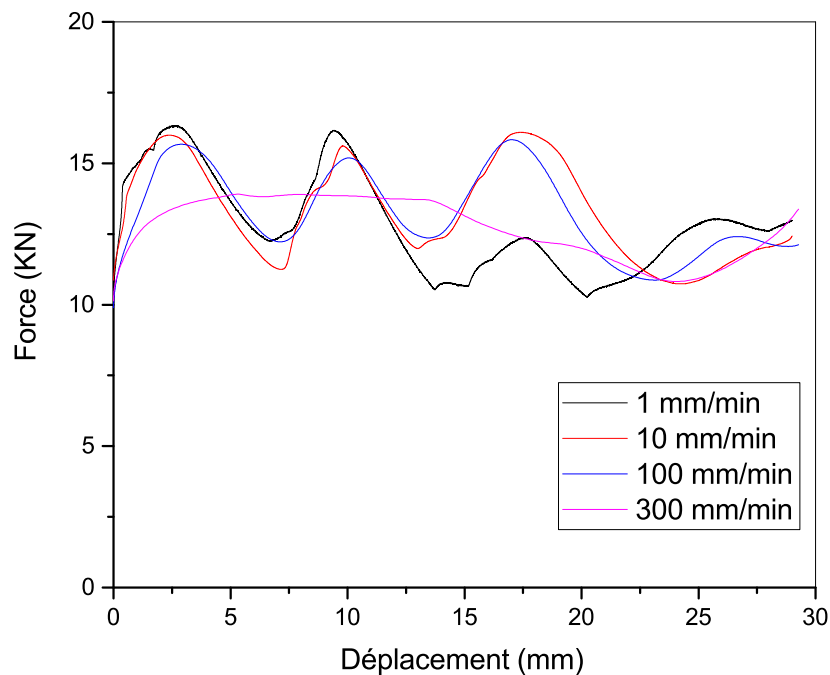


Figure 2.38 – Courbe force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcées par des copeaux.

La figure 2.39 présente les éprouvettes renforcés avec des copeaux avant et après déformation ainsi que une vue de coupe. Les tubes renforcés avec des copeaux sont déformés en mode diamant. Le renforcement des tubes en aluminium avec des copeaux n'influence pas le mode de déformation.

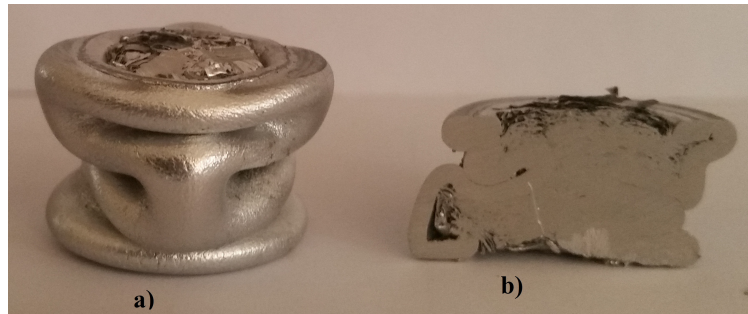


Figure 2.39 – Eprouvettes renforcés avec des copeaux : a) avant déformation, b) après déformation et vue de coupe.

Les figures 2.40 et 2.41 représentent respectivement les courbes forces moyenne-vitesse de déformation et force moyenne-nombre de rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec des copeaux. La force moyenne calculée est invariante de la vitesse déformation en cas des tube en aluminium renforcés avec des copeaux.

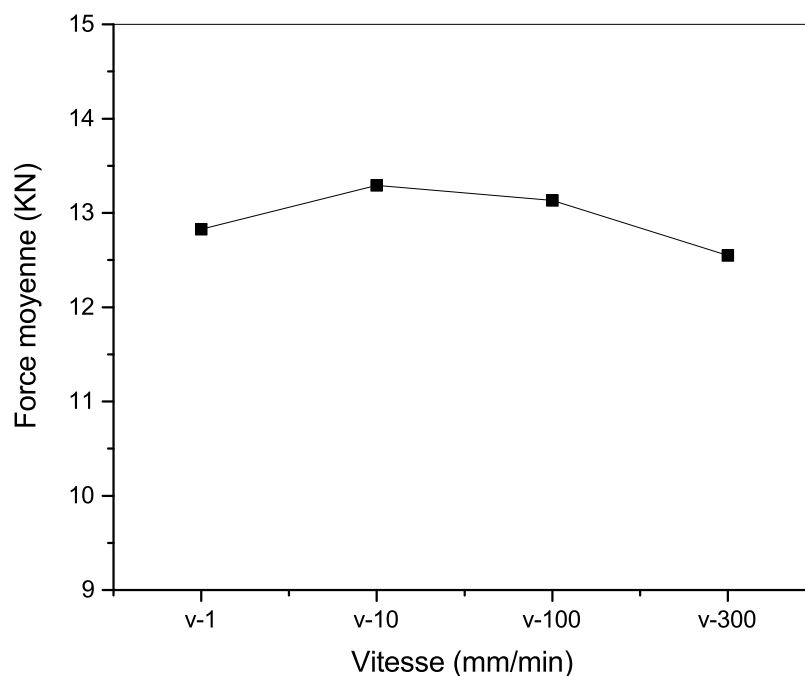


Figure 2.40 – Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes renforcés avec des copeaux d'aluminium.

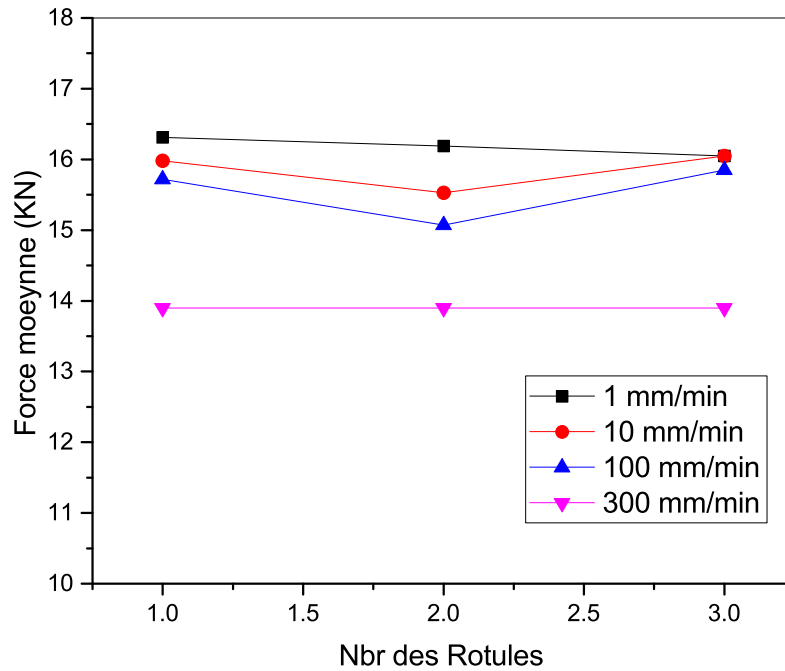


Figure 2.41 – Courbe force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec des copeaux.

Les courbes énergie absorbée-déplacement à différentes vitesse de déformation et énergie absorbée en fonction de la vitesse de déformation ; sont illustrées sur les figures 2.42 et 2.43. L'énergie absorbée par les tubes en aluminium renforcés avec des copeaux est indépendante de la vitesse de chargement.

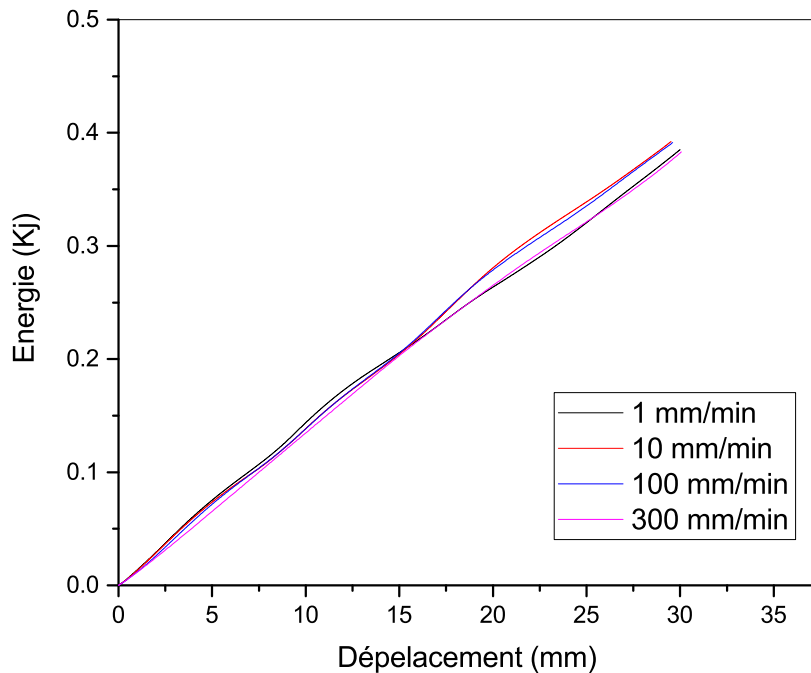


Figure 2.42 – Courbe énergie absorbée-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés par des copeaux en aluminium.

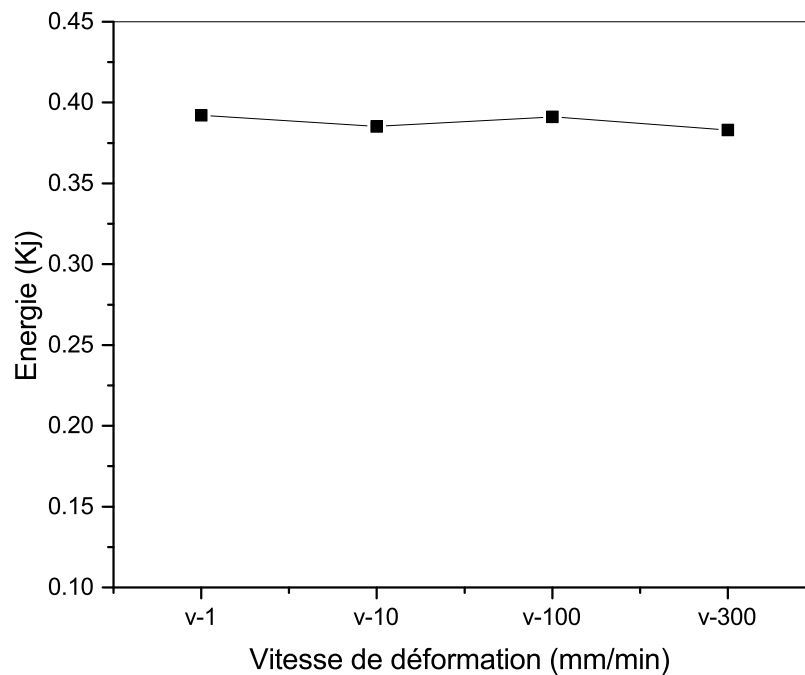


Figure 2.43 – Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec des copeaux.

2.6 Comportement des éprouvettes renforcées avec de liège naturel

Les dimensions en mm des éprouvettes tubulaires renforcés avec liège naturel sont énoncées dans la figure 2.44.



Figure 2.44 – Dimensions de l'éprouvette tubulaires renforcés avec liège naturel.

Les courbes force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcées avec des copeaux en aluminium sont exposées dans la figure 2.45. Les courbes montrent que la vitesse de chargement n'as pas d'influence sur le comportement mécanique des tubes en aluminium renforcés avec liège naturel.

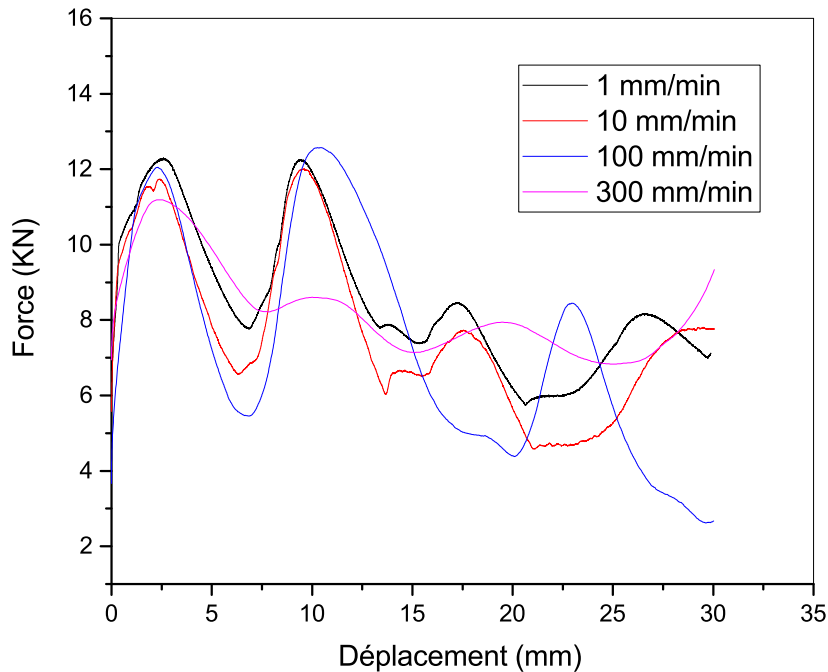


Figure 2.45 – Courbe force-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcés par des copeaux.

La figure 2.46 illustre les éprouvettes renforcés avec liège naturel avant et après déformation ainsi que une vue de coupe. Le tubes renforcés avec liège naturel ne change pas le mode de déformation en compression (mode diamant).



Figure 2.46 – Eprouvettes renforcés avec le liège : a) avant déformation, b) après déformation et vue de coupe.

Les courbes Force moyenne-vitesse de déformation et force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec liège naturel sont présentées dans les figures 2.47 et 2.48. La force moyenne est faiblement influencée par la vitesse de déformation.

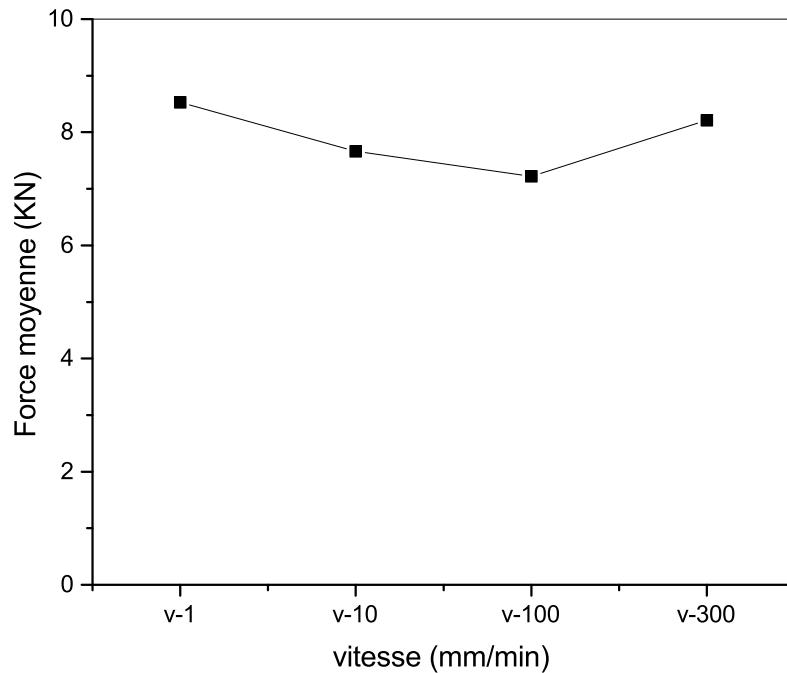


Figure 2.47 – Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes renforcés avec liège naturel.

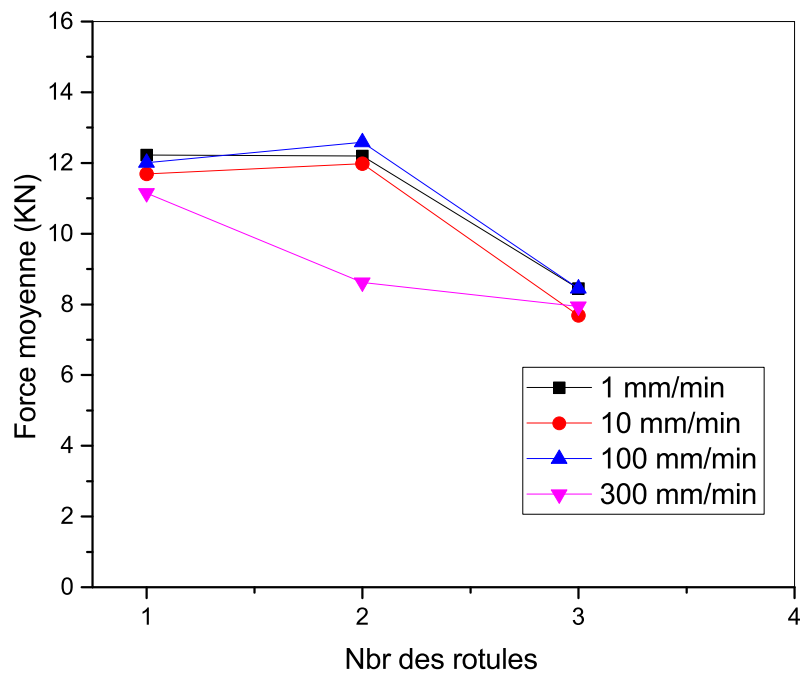


Figure 2.48 – Courbe force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec liège naturel.

Les courbes énergie absorbée-déplacement à différentes vitesses de déformation et l'énergie absorbée en fonction de vitesse de déformation, sont illustrées sur les figures 2.49 et 2.50. L'énergie absorbée par les tubes en aluminium renforcés avec liège naturel est invariante par rapport à la vitesse de déformation.

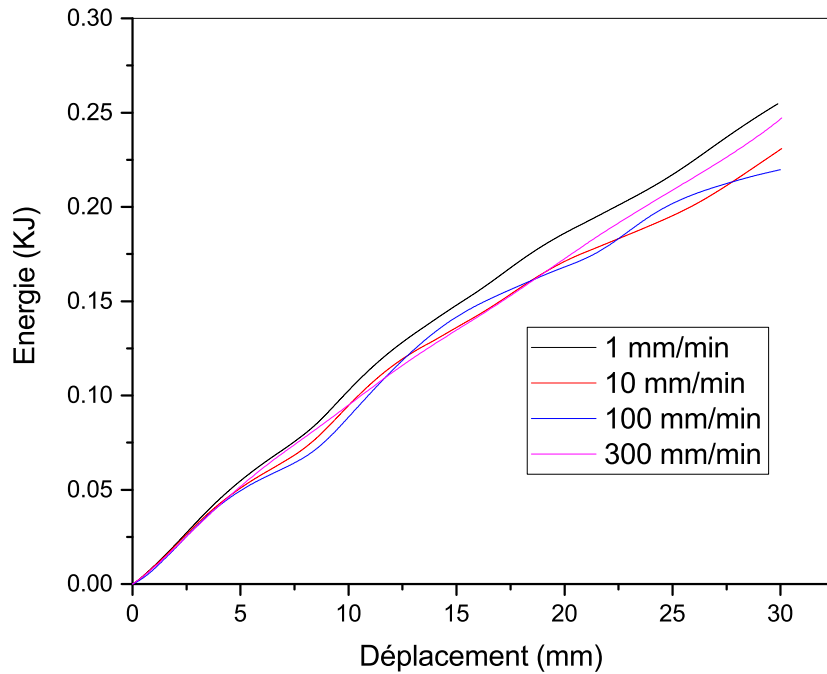


Figure 2.49 – courbe énergie absorbée-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés avec liège naturel.

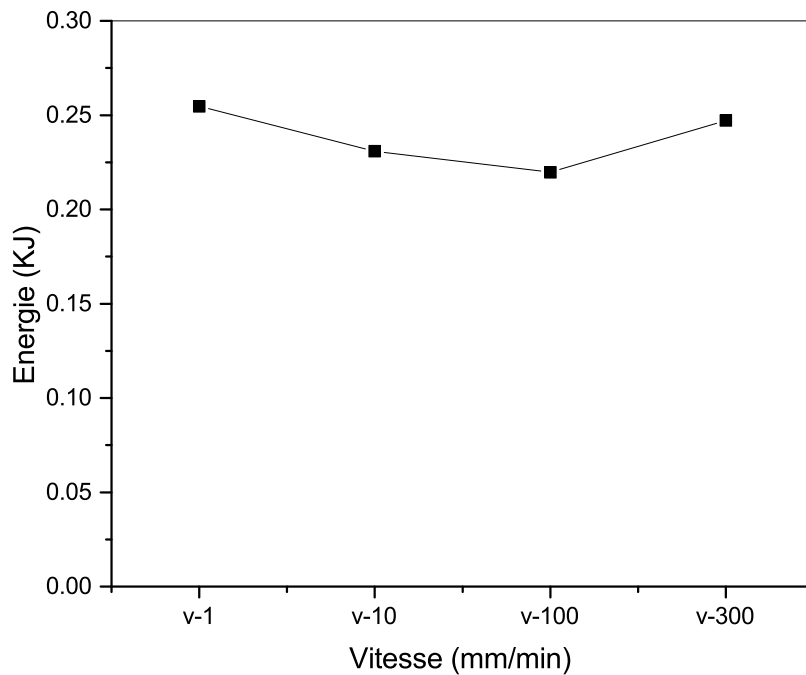


Figure 2.50 – Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec des copeaux.

2.7 Comportement des éprouvettes renforcées avec une mousse polyuréthane

Les courbes force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcées avec des copeaux en aluminium sont montrées dans la figure 2.51. Les résultats montrent que la vitesse de déformation n'influence pas le comportement mécanique des tube en aluminium renforcés avec mousse polymérique.

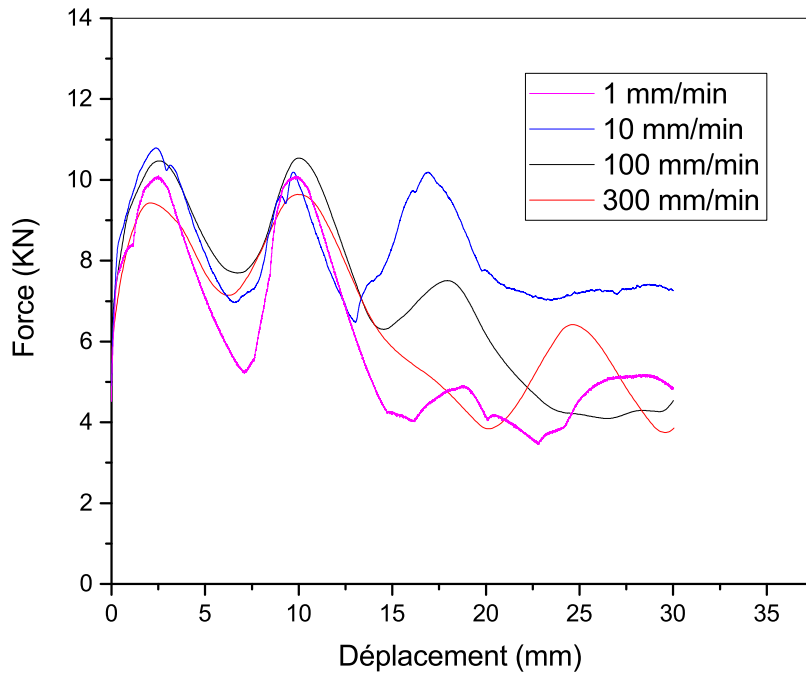


Figure 2.51 – Courbe force-déplacement a différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcés avec mousse polyuréthane.

La figure 2.52 présente les éprouvettes renforcés avec une mousse avant et après déformation ainsi que une vue de coupe. Le mode déformation des tubes en aluminium renforcés avec une mousse polyuréthane déforment en mode diamant.



Figure 2.52 – Eprouvettes renforcés avec une mousse : a) avant déformation, b) après déformation et vue de coupe.

Les figures 2.53 et 2.54 représentent respectivement les courbes Forces moyenne-vitesse de déformation et force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.

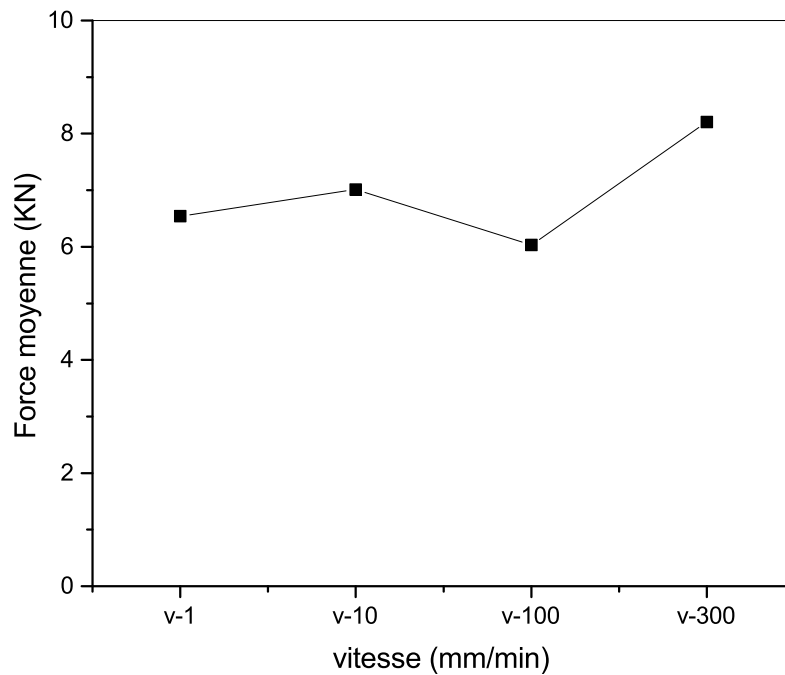


Figure 2.53 – Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.

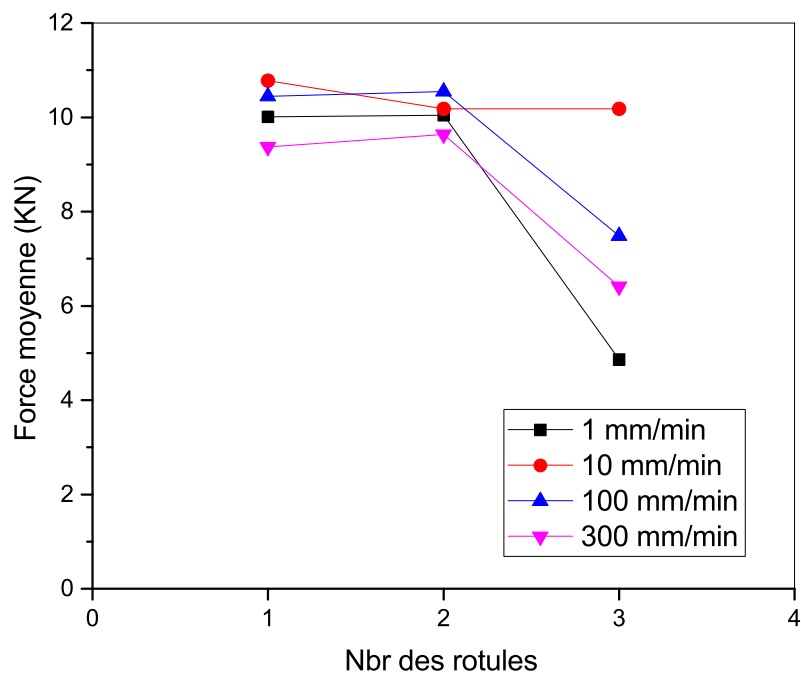


Figure 2.54 – Courbe force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.

Les courbes énergie absorbée-déplacement à différentes vitesses de déformation et énergie absorbée en fonction de vitesse de déformation sont illustrées sur les figures 2.55 et 2.56. L'énergie absorbée par les tubes en aluminium renforcés avec mousse polyuréthane est invariante par rapport à la vitesse de chargement.

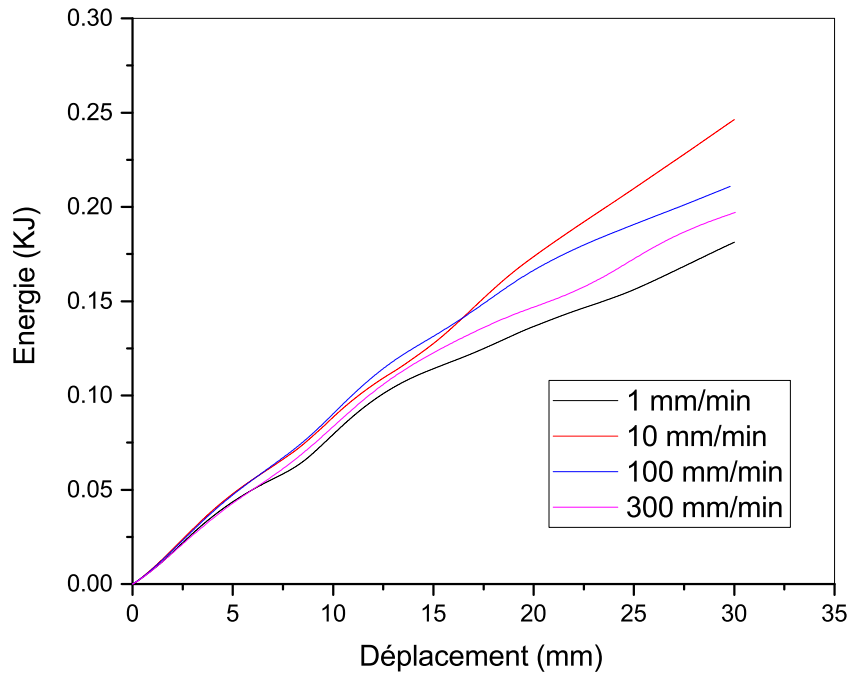


Figure 2.55 – courbe énergie absorbée-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.

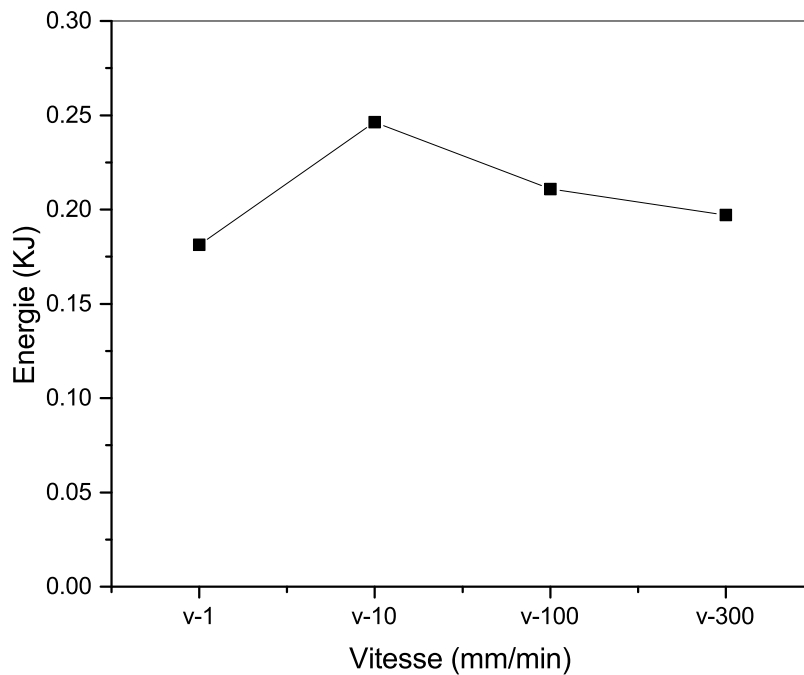


Figure 2.56 – Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec mousse polyuréthane.

2.8 Etude comparative de l'effet des différents renforts

La comparaison entre les courbes force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcées et non renforcées sont regroupées dans la figure 2.57. Cette comparaison montre que les tubes en aluminium renforcés avec des copeaux porte

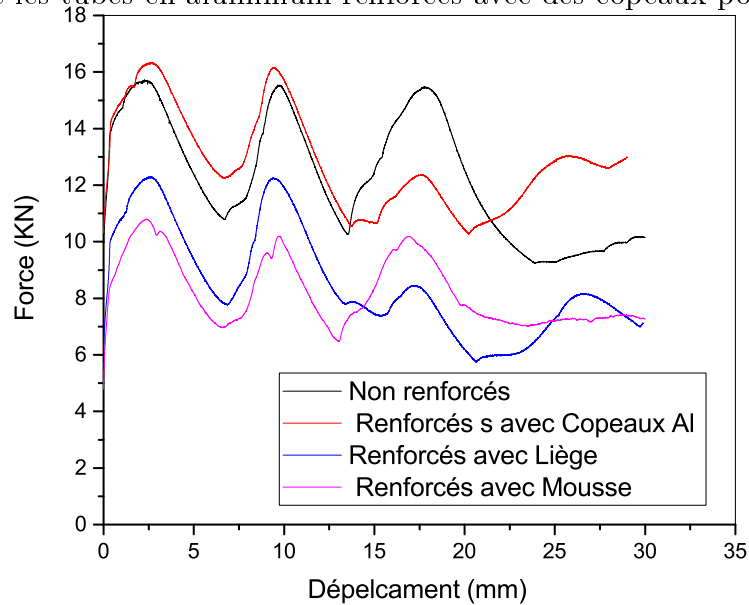


Figure 2.57 – Courbe force-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes en aluminium renforcées et non renforcées.

Les figures 2.58 et 2.59 présentent les éprouvettes vide et renforcées avant et après déformation ainsi que les vues de coupe. Les tubes non renforcés et renforcés se déforment avec le même mode : mode diamant.



Figure 2.58 – Eprouvettes vide et renforcées après déformation.

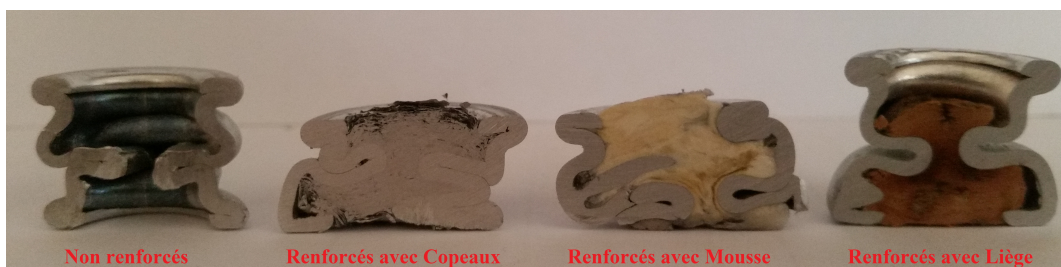


Figure 2.59 – Vue de coupe des éprouvettes renforcées après déformation.

Les figures 2.60 représentent respectivement les courbes Forces moyenne-vitesse de déformation et force moyenne-nombre rotules plastique formés pour les éprouvettes vides et renforcées. Une augmentation de la force moyenne est enregistrée dans le cas de renforcement avec les copeaux, par contre le renforcement par le liège et la mousse engendre une baisse de la force moyenne.

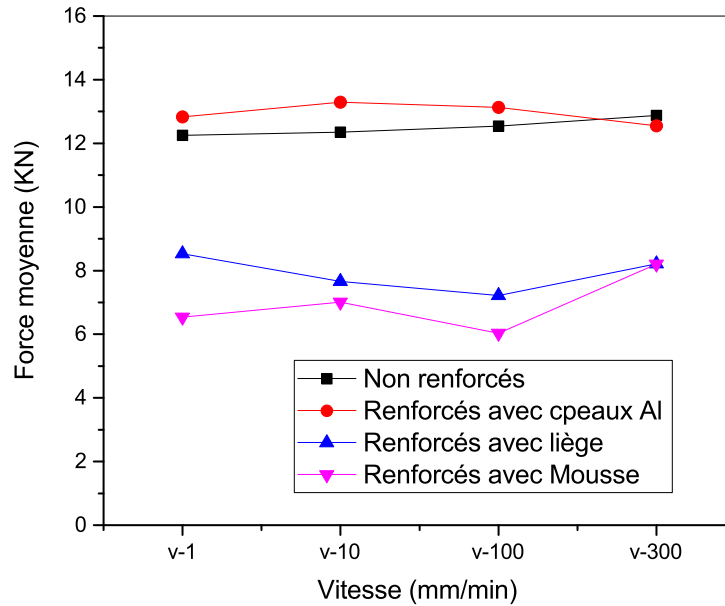


Figure 2.60 – Courbe force moyenne-vitesse de déformation pour les éprouvettes en aluminium renforcés et non renforcés.

Les courbes énergie absorbée-déplacement à différentes vitesses de déformation et l'énergie absorbée en fonction de la vitesse de déformation sont illustrées sur les figures 2.61 et 2.62. Nous observons une hausse de l'énergie absorbée par les éprouvettes renforcées avec des copeaux, par contre les deux autres renforts n'améliorent pas le taux d'absorption d'énergie.

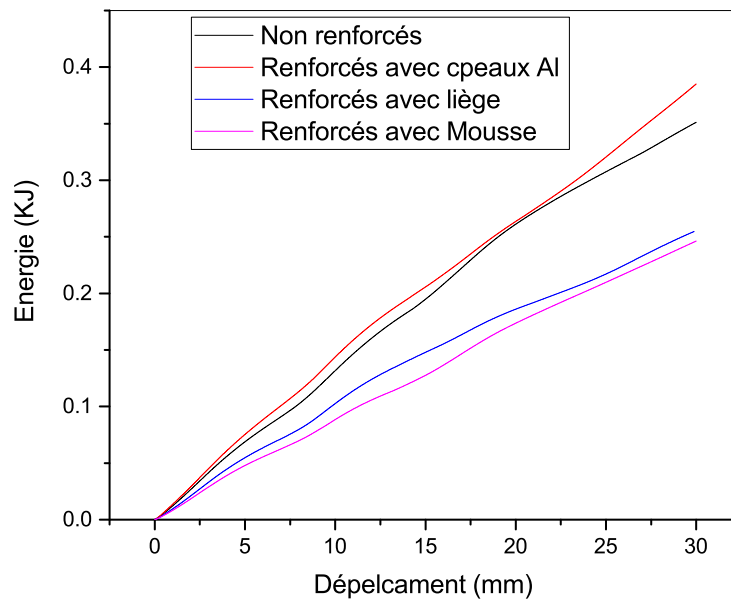


Figure 2.61 – courbe énergie absorbée-déplacement à différentes vitesses de déformation pour des éprouvettes renforcés et non renforcés.

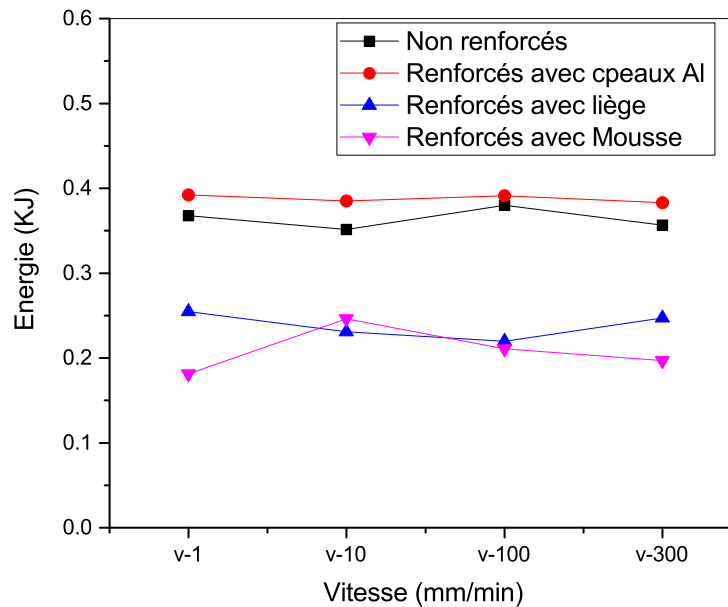


Figure 2.62 – Courbe énergie absorbée-vitesse de déformation pour des éprouvettes renforcés avec des copeaux.

2.9 Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons présenté une étude expérimentale sur le comportement mécanique des tubes en aluminium (série 4000) de section circulaire renforcés et non renforcés sous chargement de compression uni-axial en régime quasi-statique. En premier lieu, nous avons identifié les caractéristiques mécaniques de matériau étudié, ainsi que l'influence des paramètres géométriques (λ et η) sur le mode de déformation final. En deuxième étape nous avons réalisé des essais de compression uniaxial à différentes vitesses de chargement, sur des éprouvettes tubulaires non renforcées et renforcées, afin constater l'effet du renforcement sur le comportement mécanique des tubes étudiés, et leurs effets sur le taux absorption d'énergie.

Ce travail nous permet de conclure que :

- Les paramètres géométrique(λ et η) jouent un rôle primordial dans la définition de mode de déformation final des tubes en aluminium ;
- Le comportement mécanique des tubes non renforcés et renforcés sous chargement de compression uniaxiale est insensible à la variation de la vitesse de déformation ;
- la force moyenne augmente dans le cas de renforcement avec les copeaux, par contre le renforcement par le liège et la mousse engendrent sa diminution. moyenne ;
- Le renforcement des tubes en aluminium avec des copeaux augmente le taux d'absorption d'énergie ;
- Le renforcement des structures tubulaires de section circulaire en aluminium avec du liège et de la mousse n'améliore pas le taux d'absorption d'énergie.

Chapitre 3 : simulation numérique

Chapitre 3

Simulation numérique

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation numériques de comportement mécanique des tubes en aluminium sous chargement de compression uniaxial. Nous avons commencé cette partie par une présentation générale de code du calcul par éléments finis Abaqus ainsi que un aperçu sur le modèle de Johnson-Cook. Ensuite nous avons réalisé un simulation numérique de compression uniaxial d'un tube en aluminium, après une étude paramétrique et de maillage afin de déterminer les paramètres de modèle de Johnson-Cook. Finalement, une étude comparative entre les résultats expérimentaux et numériques est faite.

3.2 Le code de calcul par éléments finis Abaqus

3.2.1 Définition

ABAQUS [11]est un programme de simulation numérique d'ingénierie produit par la société Dassault Simulation, il est l'un des plus performant des solveurs. Il est basé sur le principe de calcul par éléments finis, il est utilisé pour simuler devers problèmes soient linéaires des plus simple aux problèmes non linéaires complexes. Pour effectuer ces analyses ABAQUS contient une librairie étendue des éléments qui nous permettent de modéliser une quelconque géométrie même les plus compliquées, on trouve aussi une grande liste du modèles qui peut simuler le comportement d'un large répertoire des matériaux d'ingénierie tel que les métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, les mousses, le sol et les roches(...). Toutes ces options intégrées dans le logiciel le rendent capable de simuler et d'analyser le comportement des structures. (plus de détail dans l'annexe B)

ABAQUS existe sous trois produits ; Abaqus/ standard/implicite, Abaqus/explicite et Abaqus/CFD.

3.2.2 ABAQUS/Standard (Implicite)

Ce module représente le code de calcul implicite dédié aux calculs quasi-statiques, linéaires ou non, thermiques, acoustiques, L'algorithme de calcul se base sur des calculs itératifs visant à atteindre l'équilibre global du système à chaque incrément de temps, ce qui lui confère une grande stabilité et une certaine inertie. Il résout un large rang des problèmes linéaires et non-linéaires.

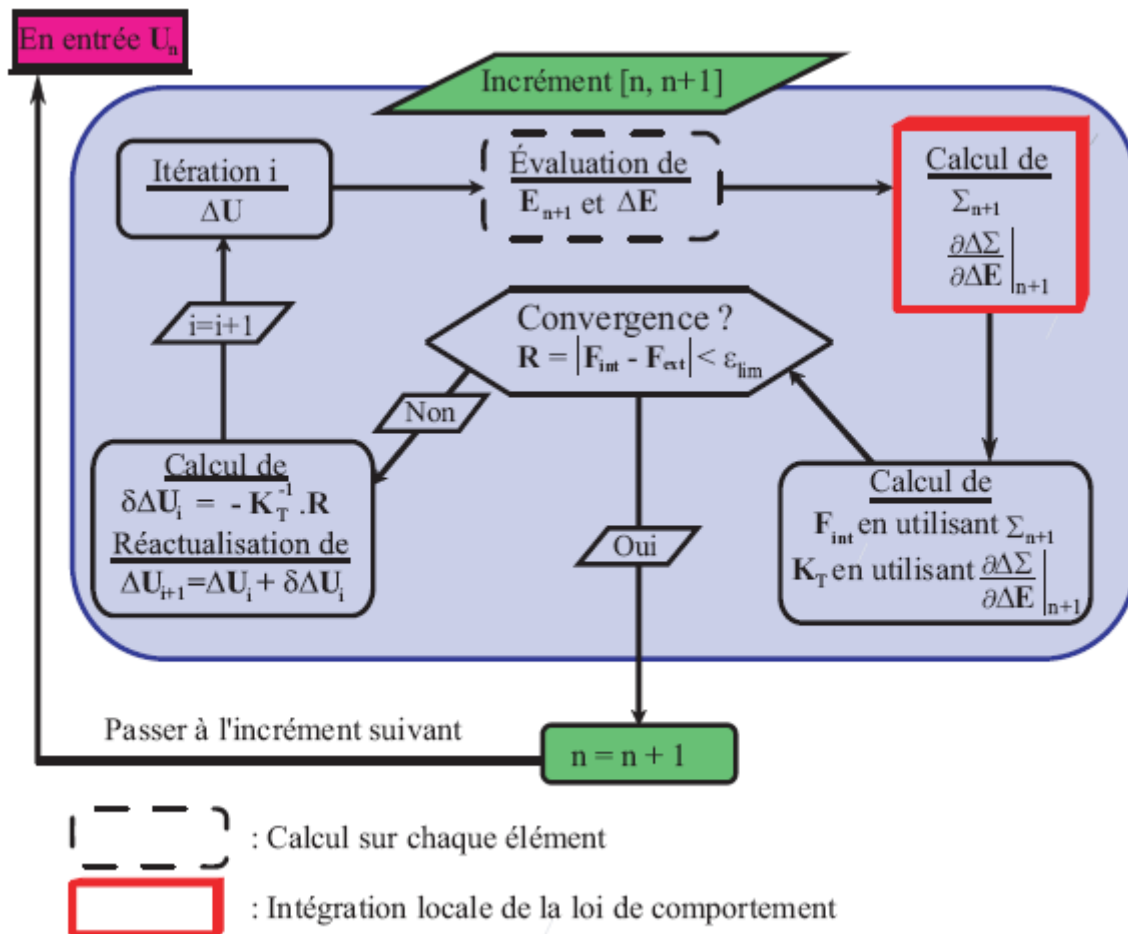


Figure 3.1 – Organigramme de résolution de schéma implicite.[26]

3.2.3 ABAQUS/Explicite

Le module explicite est souvent utilisé pour les calculs dynamiques. Contrairement au code implicite, l'algorithme explicite n'est pas itératif. Cet algorithme se base sur un très grand nombre d'incrémentes très courts définis par la vitesse de propagation d'une onde élastique. La notion de propagation d'onde présente l'avantage de limiter la résolution par éléments atteints par l'onde ce qui présente une économie par rapport au code implicite. Ceci lui confère la capacité de réaliser des calculs rapides.

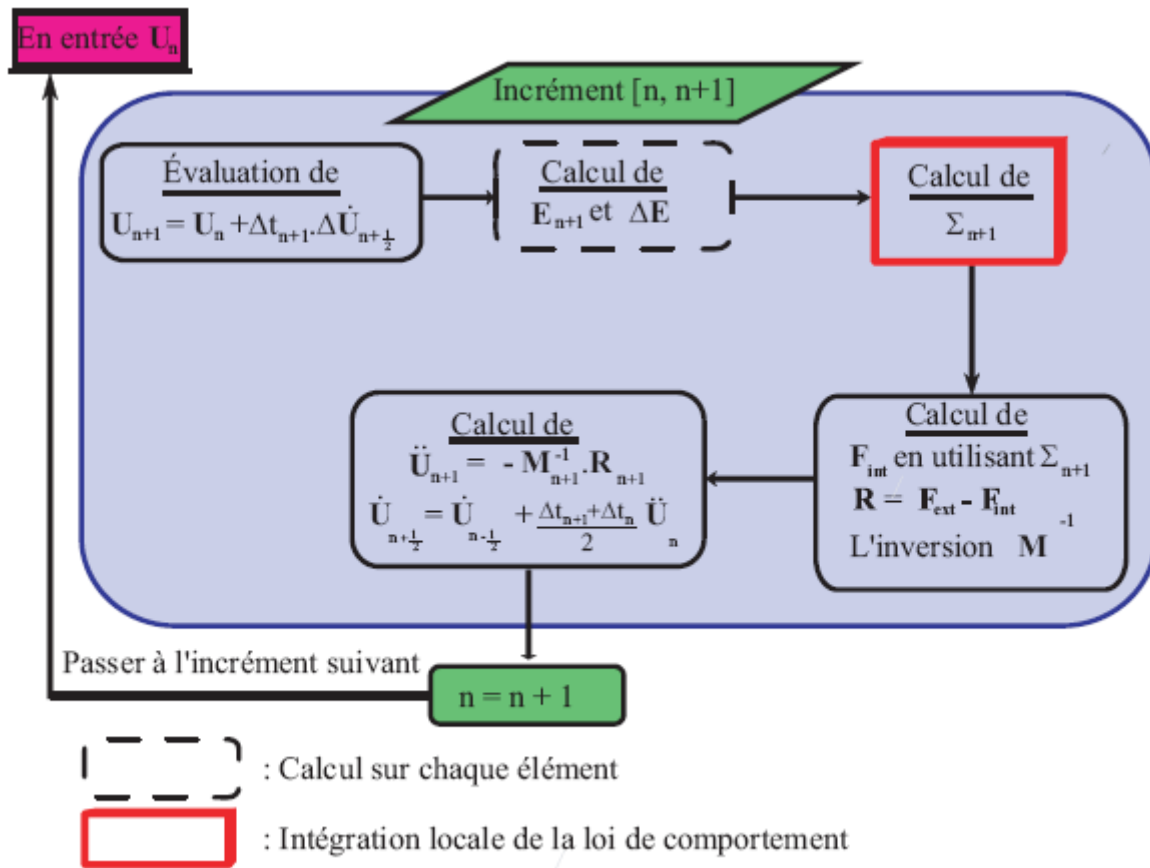


Figure 3.2 – Organigramme de résolution de schéma explicite[26].

3.2.4 Comparaison entre Abaqus / standard et Abaqus / explicite

La figure 3.3 présente une comparaison entre la méthode Explicit et Implicit.

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

Figure 3.3 – Inconvénients et avantages de module implicite et explicite.[15]

3.3 Modèle de Johnson-Cook

.Ce modèle est proposé par deux ingénieurs de l'armée américaine en l'an 1983[19],il est représenté par l'équation suivante :

$$\sigma_{eq} = [A + B(\bar{\epsilon}^p)^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - (T^*)^m] \quad (3.1)$$

L'équation se compose de trois termes : le premier correspond à l'écroutissement, le deuxième au durcissement dynamique et le troisième terme correspond à l'adoucissement thermique.

Avec :

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

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

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

Ces trois paramètres seront identifiés à partir d'un essai de traction en quasi-statique et à température ambiante.

C : coefficient de sensibilité au durcissement dynamique.

m : coefficient de sensibilité à l'adoucissement thermique.

$\bar{\epsilon}^p$ déformation plastique cumulée.

$$\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \quad (3.2)$$

Où :

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

$\dot{\epsilon}_0$: la vitesse de déformation de référence.

T^* : température non dimensionnelle.

$$T^* = \frac{T - T_{ext}}{T_f - T_{ext}} \quad (3.3)$$

Tel que :

T : température de transition.

T_{ext} : température ambiante.

T_f : température de fusion.

3.4 simulation numérique

3.4.1 Les condition aux limites et le maillage

La figure 3.4 représente les condition aux limites imposés sur l'éprouvette en aluminium. Un encastrement est imposé sur la base de tube et une vitesse de chargement sur le haut de l'éprouvette.

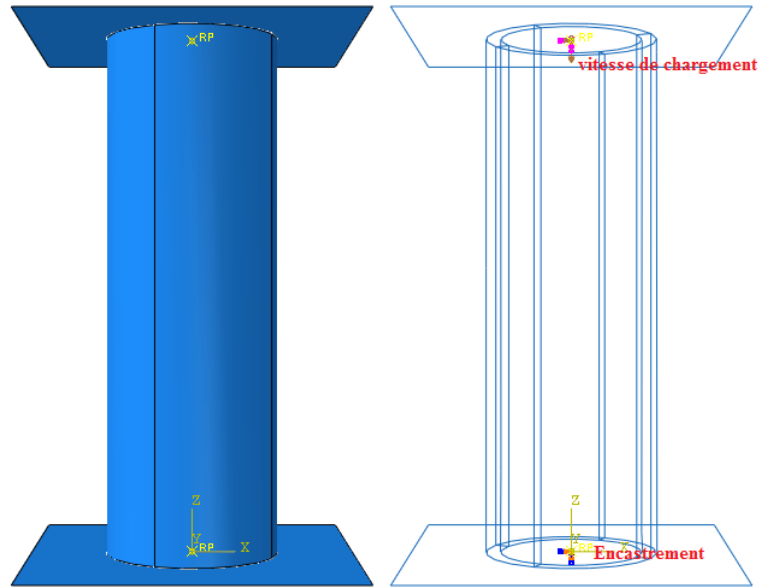


Figure 3.4 – Les conditions aux limites imposés sur l'éprouvette.

La figure 3.5 représente le type de maillage adoptés pour l'éprouvette tabulaires et pour les plateaux. Pour l'éprouvette nous avons adopté le maillage régulier de type hexagonal C3D8R ; par contre pour les plateaux supérieur et inférieur nous avons adoptés le maillage de type R3D4.

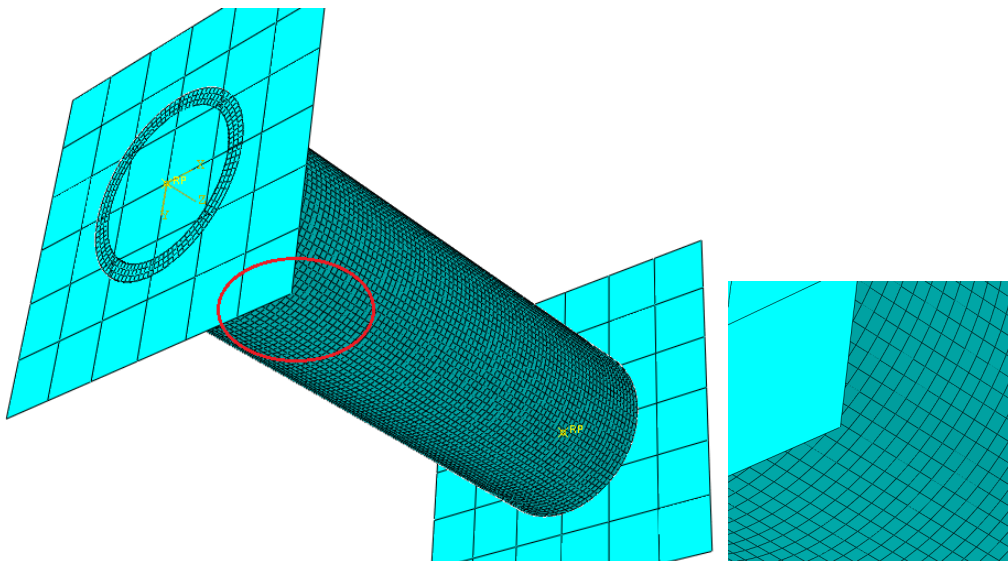


Figure 3.5 – Maillage de l'éprouvette et des plateaux.

3.4.2 Étude paramétrique

Dans cette partie de notre travail nous étudions l'influence des paramètres de modèle de JOHNSON-COOK sur la réponse numérique.

— Influence du paramètre A (MPa)

Le tableau 3.1 représente les valeurs de la constantes A du modèle de JOHNSON-COOK.

	A(MPa)	B(MPa)	n	C
1	177	190	0.3	1e-4
2	155	190	0.3	1e-4
3	140	190	0.3	1e-4

Tableau 3.1 – Les valeurs de paramètre A.

La figure 3.6 montre l'influence du paramètre A sur la reproduction numérique de comportement mécanique du matériaux étudié.

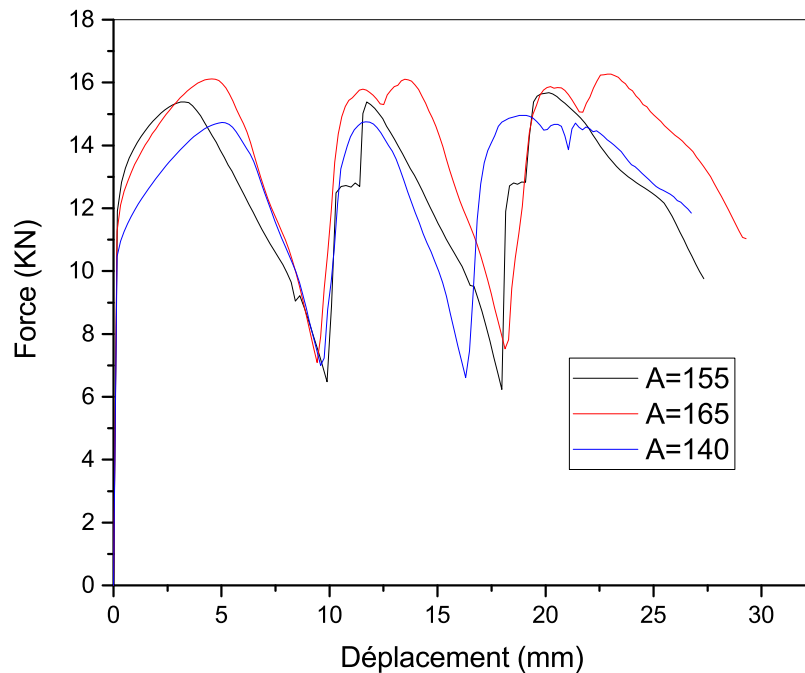


Figure 3.6 – Courbe force déplacement pour les différentes valeurs de paramètre A.

— Influence du paramètre B (MPa)

Les valeurs du paramètre B sont illustrées dans le tableau 3.2.

	A(MPa)	B(MPa)	n	C
1	155	190	0.3	1e-4
2	155	165	0.3	1e-4
3	155	150	0.3	1e-4

Tableau 3.2 – Les valeurs de paramètre B.

La figure 3.7 représente l'influence du paramètre B sur la courbe contrainte-déformation numérique.

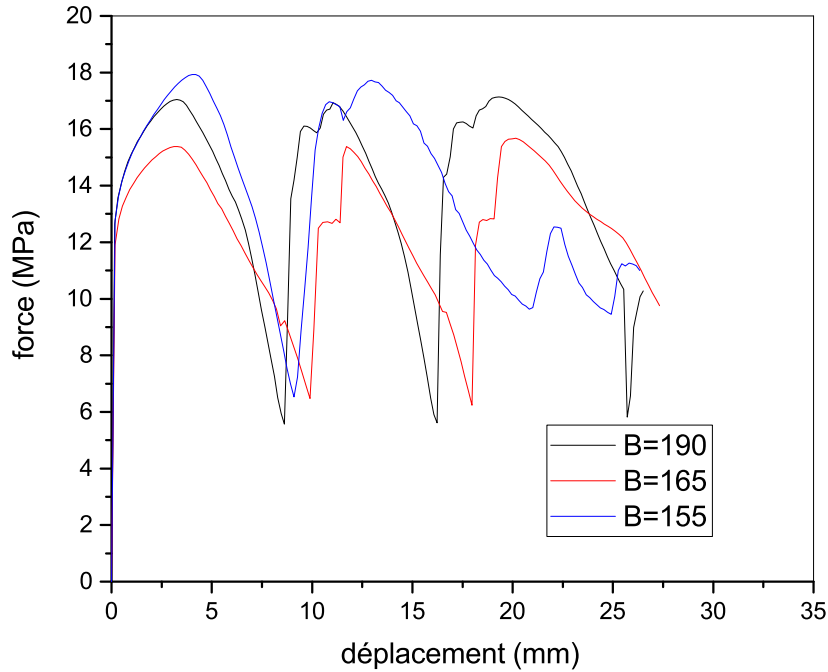


Figure 3.7 – Courbe force déplacement pour les différentes valeurs de paramètre B.

— Influence de coefficient n

Le tableau 3.3 montre les valeurs de n.

	A(MPa)	B(MPa)	n	C
1	155	165	0.25	1e-4
2	155	165	0.3	1e-4
3	155	165	0.45	1e-4

Tableau 3.3 – Les valeurs de coefficient n.

La figure 3.8 représente l'influence du paramètre n sur la courbe contrainte-déformation.

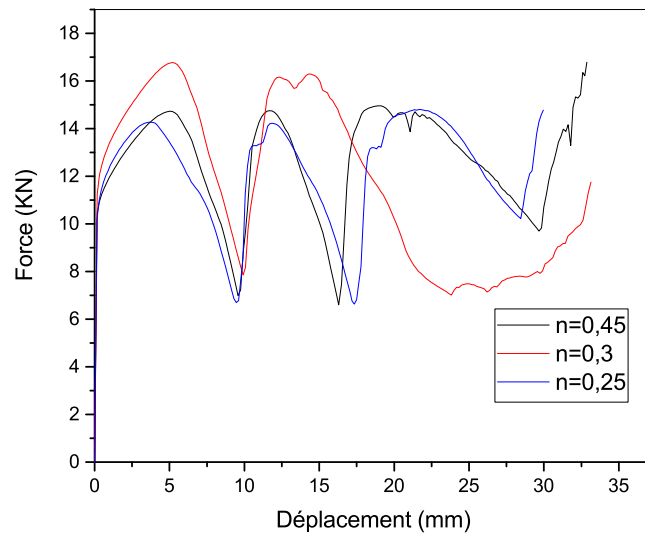


Figure 3.8 – Courbe force déplacement pour les différentes valeurs de paramètre n.

Pour finir le tableau 3.4 récapitule les valeurs des paramètres utilisées.

A (MPa)	B (MPa)	n
155	165	0,45

Tableau 3.4 – Les valeurs des paramètre A, B, n.

3.4.3 Étude de maillage

Pour étudier l'influence de la taille de maillage sur la réponse numérique, nous avons opté pour deux tailles différentes de maillage : grossier (figure 3.9) et fin (figure 3.10).

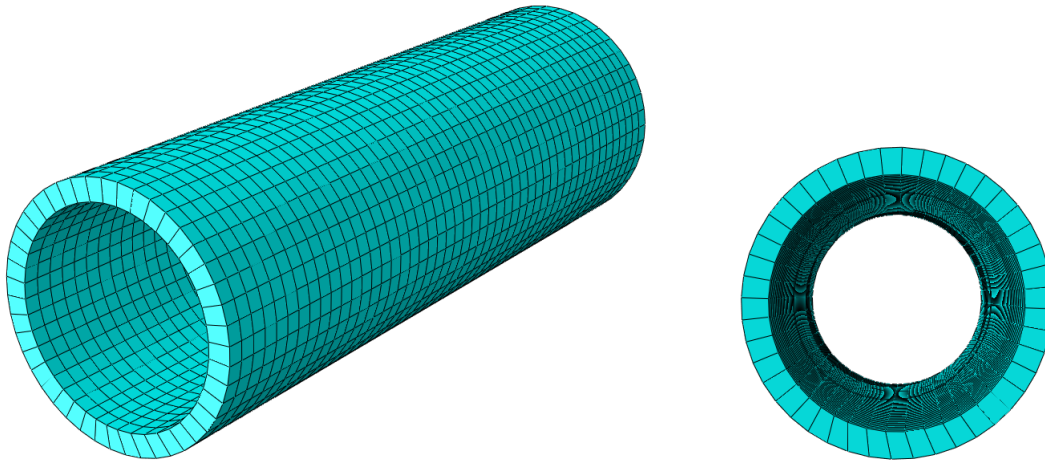


Figure 3.9 – Maillage grossier

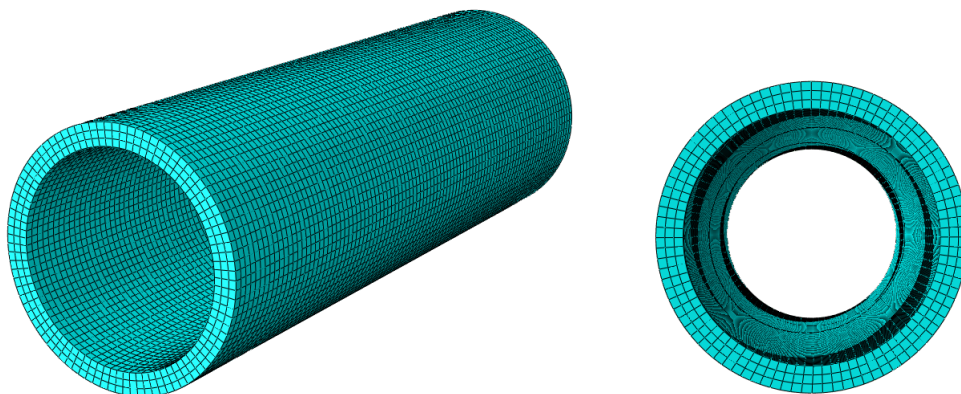


Figure 3.10 – Maillage fin

La figure 3.11 décrit l'influence de la taille maillage sur la reproduction numérique.

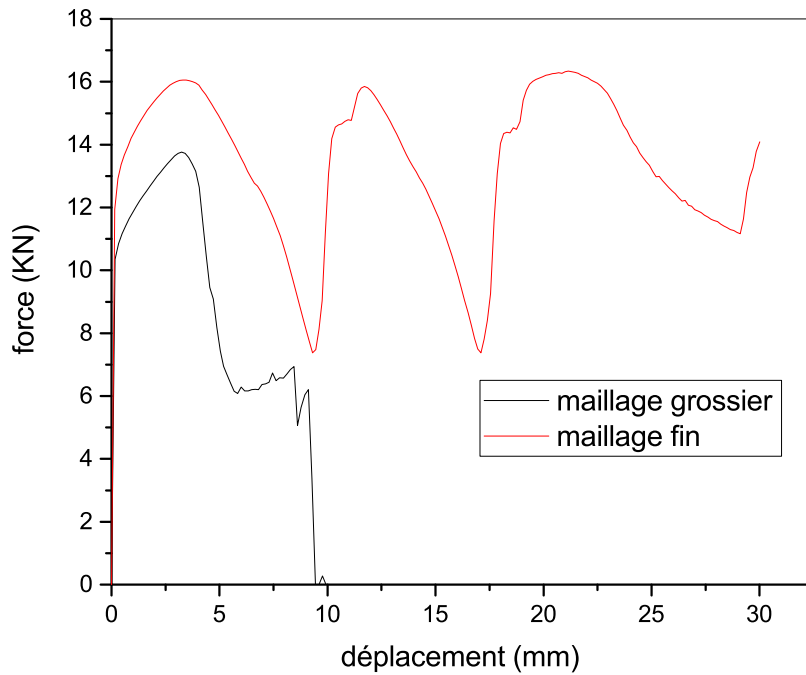


Figure 3.11 – Comparaison entre les courbes force-déplacement dans le cas de maillage fin et grossier.

Les figure 3.12.a et 3.12.b représente les éprouvettes après déformation dans le cas de maillage grossier et fin respectivement.

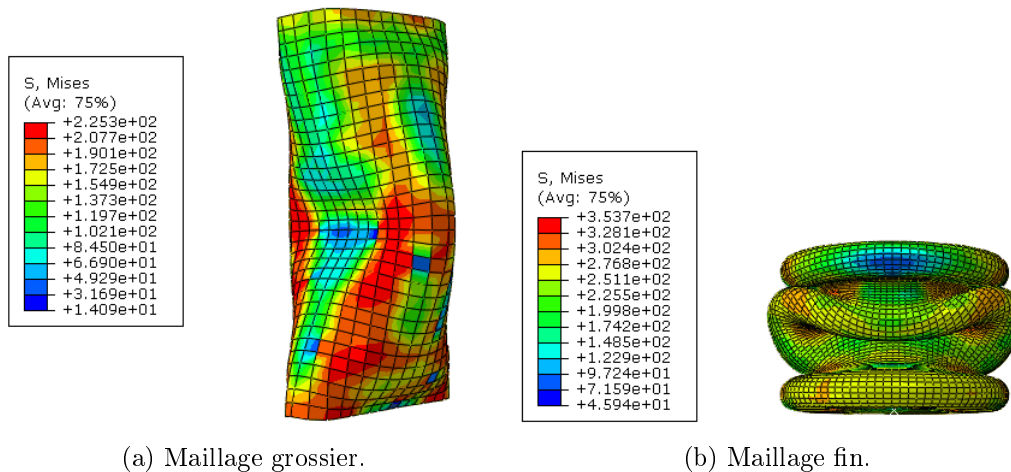


Figure 3.12 – Tubes en aluminium après déformation a) maillage grossier, b) maillage fin.

3.5 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

La figure 3.13 montre une comparaison entre les courbes force-déplacement dans le cas expérimentale et numérique.

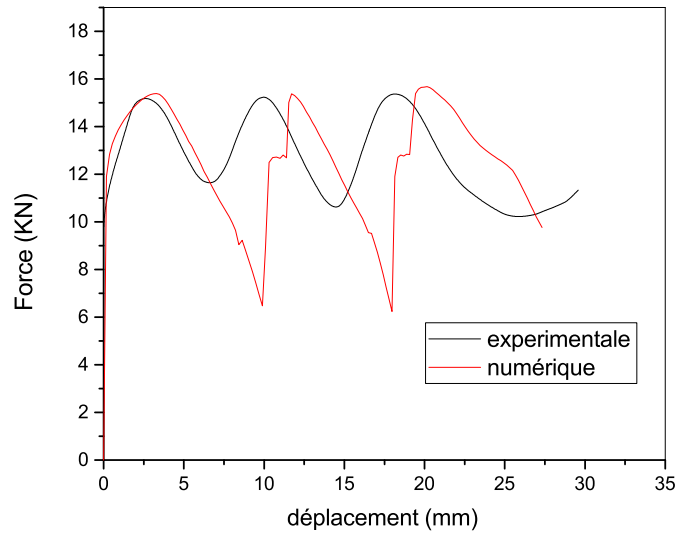
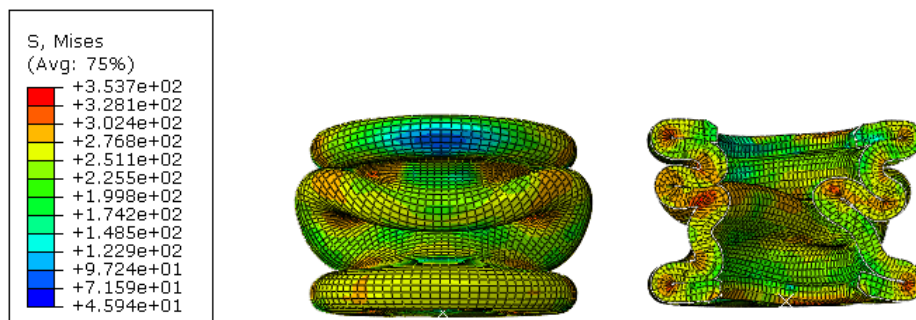


Figure 3.13 – Comparaison entre courbes force-déplacement expérimentale et numérique.

La comparaison entre les éprouvettes écrasées obtenues expérimentalement et numériquement est présentée dans la figure 3.14.



(a) Expérimentale.



(b) numérique.

Figure 3.14 – Tubes en aluminium après déformation a) Expérimentale, b) numérique.

La figure 3.15 représente l'énergie absorbée par l'éprouvette dans le cas expérimentale et numérique.

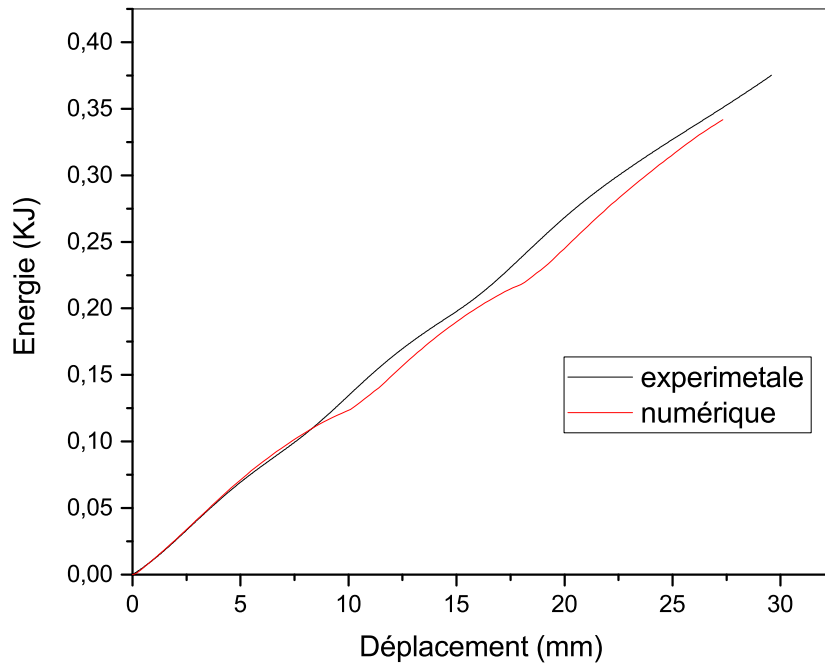


Figure 3.15 – Comparaison entre courbes énergie-déplacement expérimentale et numériques.

Cette étude comparative montre que le modèle de Johnson-Cook reproduit correctement le comportement mécanique des tubes en aluminium non renforcés.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à une simulation numérique avec le code de calcul par éléments finis Abaqus en utilisant le modèle empirique de JOHNSON-COOK. Nous avons effectué une étude paramétrique ainsi qu'une étude sur l'influence de la taille du maillage sur le comportement du tube sous compression uni-axiale. Une simulation de comportement mécanique des tubes en aluminium non renforcés sous chargement de compression est réalisée. A la fin de chapitre, une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux est faite et discutée.

Ce travail nous a permis de tirer les points suivants :

- Les paramètres A , B et n ont une influence sur le comportement des éprouvettes.
- La taille du maillage définit le mode de déformation.
- Les résultats numériques obtenus en utilisant le maillage adéquat ainsi que les bonnes valeurs des paramètres A et B sont similaires à ceux obtenus expérimentalement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous nous sommes focalisé sur le comportement mécanique des tubes en alliage d'aluminium de section circulaire soumis à un effort de compression uni-axiale en régime quasi-statique afin d'évaluer l'énergie absorbée. Pour augmenter le taux d'énergie absorbée nous avons procédé à un renforcement avec différents matériaux de renfort tout en gardant les mêmes dimensions des éprouvettes . Ces structures ont été soumises à des chargements à différentes vitesses de déformation.

Ce travail nous a permis de dégager les points suivants :

- Le mode de déformation des tubes est proportionnel au paramètre géométrique λ pour la même valeur de η .
- La gamme de vitesse de déformation considérée n'a aucun effet sur le mode de déformation ainsi que sur le taux d'énergie absorbée pour tous les spécimens étudiés vides et renforcés.
- Les tubes renforcés avec les copeaux d'aluminium absorbent plus d'énergie par rapport aux tubes vides et autre renforts.
- En vue de la baisse d'énergie absorbée par les tubes renforcés avec le liège naturel et la mousse polyuréthane nous ne trouvons aucune utilité de renforcer les tubes avec le liège et la mousse.
- La taille de maillage influence sur la reproduction numérique du comportement mécanique des tubes écrasés.
- Le modèle de JOHNSON-COOK décrit correctement le comportement des tubes élasto-plastiques.
- Un choix judicieux des paramètres de J-C procure une bonne approche de comportement réel des matériaux.

Et en guise de perspectives nous proposons :

- De réaliser une étude dynamique du comportement mécanique des tubes renforcés.
- D'étudier l'influence des paramètres géométriques λ et η .
- D'effectuer une étude portante sur différentes sections, et choisir d'autres profils : carré, hexagonal. . .
- De nous intéresser à d'autres renforts : composites, polymères, céramiques. . . .

- De déterminer les paramètres du modèle J-C expérimentalement et en utilisant un logiciel d'identification paramétrique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A. ABDULLATIF, R. BALEH, and Z. ABOURA. Some improvements on the energy absorbed in axial plastic collapse of hollow cylinders. *International Journal of Solids and Structures*, 43, 2006.
- [2] W. ABRAMOWICZ and N. JONES. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int. J. Impact Eng*, 4 :243–270, 1986.
- [3] D. ALGALIB and A. LIMAM. Experimental and numerical investigation of static and dynamic axial crushing of circular aluminum tubes. *Thin-Walled Structures*, 42 :1103–1137, 2004.
- [4] M. F. Ashby. Materials selections in mechanical design. *Pergamon presse*, 1992.
- [5] European Aluminium Association. *Généralités sur alumnium*. February 2009.
- [6] J. P. BAILLON and J. M. DORLOT. *Des Matériaux*. Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 3 édition edition, 2000.
- [7] OULD OUALI Mohand BEN CHABANE Nassima, Nardjes DJAOUI. Étude de l’anisotropie de comportement et de l’endommagement ductile d’une tole en aluminium 5454. In *1ère Conférence Internationale de Construction Métallique et Mixte CICOMM’2015.Tlemcen*, 12 et 13 Octobre 2015.
- [8] Y. Brechet. Choix des matériaux. In *Conference CETIM*, Juin 1994.
- [9] CEN. *Metallic Materials Tensile testing part1 Methode of test at ambient temperature*, english version edition, July 2001.
- [10] B. CHALMERS. *Matériaux métalliques*. 2 ème edition, 2008.
- [11] Systeme Dassault. *Abaqus*. www.3ds.com, 6.14 edition.
- [12] R. DEVELAY. Propriétés de l’aluminium et des alliages d’aluminium corroyés. *Techniques de l’Ingénieur*, M440 :pp. 2–26, 1992.
- [13] W. DOBRUCK and J. MISCHKE. Etudes préliminaires et expérimentales du laminage planétaire des tubes. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1 :131—151, 1977.

- [14] Bernard Gilmont. L'aluminium améliore la sécurité des transports. Technical report, European Aluminium Association, 2004.
- [15] D. GUILLON. *Étude des mécanismes d'absorption d'énergie lors de l'écrasement progressif de structures composites à base de fibre de carbone*. PhD thesis, l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace Toulouse, 2008.
- [16] J. E. HATCH. *Aluminium Properties and Physical Metallurgy*. Ohio Metals Park, 1984.
- [17] Z. A. R. E. HR and M. KROGER. Multi objective crash worthiness optimization of circular aluminium tubes. *Thin-Walled Structures*, 44 :301–308, 2006.
- [18] International Aluminium Institut. *Aluminium*. jan 2003.
- [19] G. R. Johnson and W. H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In *Holland*, 1987.
- [20] Claire König. *L'histoire de l'aluminium en quelques dates*, 2015.
- [21] I. LAKHTINE. *Métallographie et traitement thermique des métaux*. Mir Moscow, 4eme édition edition, 1986.
- [22] J. Lanthony. *L'aluminium et alliages légers, non ferreux*. Dunod, Paris-France, 1984.
- [23] D. Leblanc and Bscá. *Evaluation de l'effet de surchauffe des alliages d'aluminium par ultrasons et laser-ultrasons*. PhD thesis, université de Moncton canada, 1999.
- [24] J. LIGNON and R. MAILLEBUAU. *Etude des matériaux II matériaux non ferreux*. Librairie Delagrave, 2010.
- [25] K. Mocellin and E. Vanegas. Laminage de tubes ods. In hal 00679450, editor, *20eme Congres Français de Mécanique - CFM 2011*, Aug 2011.
- [26] Ould Ouali 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*. PhD thesis, Université de Reims Champagne-Ardenne, avril 2007.
- [27] ZAZI Nacer. *Influence des effets de vieillissement et du laminage à froid sur la microstructure, associés aux propriétés mécaniques et chimiques des alliages Al-Mg*. PhD thesis, Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [28] EL. DIN STIRBU. *Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage*. PhD thesis, INSA Lyon France, 2005.
- [29] U.S. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries Aluminum*, January 2017.

- [30] C. VARGEL. *Corrosion de l'aluminium*. Paris, 1999.
- [31] R. Vennekens, B. Verstraeten, and K. Broeckx. *CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM*. 2003.
- [32] J. L. Vignes, T. di Costanzo, S. Bouque, and D. Ferton. Une vie daluminium. *Bulletin de l Union des Physiciens*, pages 790–91, janvier-février 1997.
- [33] www.DOMUS Materiaux.fr. Liège, Juillet 2004.
- [34] Wang XUGUANG. *comportement a l'écrasement de structures tubulaires en multi-matériaux*. PhD thesis, Ecole centrale de Lyon, 1991.

Annexes

Annexe A : Complément chapitre 1

A.1 Introduction

Cette annexe donne un aperçu général des différents types d'aluminium selon la classification américaines (Il existe plus de 400 alliages corroyés et plus de 200 alliages de fonderie [29]).

En Amérique du Nord, l'Aluminium Association Inc. est responsable de la classification des alliages. Tant pour les alliages corroyés que pour les alliages de fonderie, il existe un livre reprenant les différents types d'alliage avec leur composition chimique et leurs propriétés. Les alliages d'aluminium sont subdivisés en groupes sur base de leurs propriétés telles que traitement thermique et mécanique et éléments d'alliage principaux. Les alliages (corroyés) sont désignés par un nombre de quatre chiffres et les alliages de fonderie par un nombre de trois chiffres suivi d'un point et d'un chiffre indiquant s'il s'agit d'une pièce moulée ou d'un lingot.

A.2 Désignation des alliages d'aluminium (corroyés)

Le premier chiffre indique l'élément d'alliage le plus important (Xxxx). Il est également utilisé pour désigner les différentes séries d'alliages d'aluminium telles que séries 1000, 2000 jusque 8000 (voir tableau 3).

SÉRIES D'ALLIAGES	ÉLÉMENTS D'ALLIAGES PRINCIPAUX
1XXX	99% d'aluminium minimum
2XXX	cuivre
3XXX	manganèse
4XXX	silicium
5XXX	magnésium
6XXX	magnésium et silicium
7XXX	zinc
8XXX	autres éléments

Tableau 3.5 – Désignation de l'aluminium corroyés.[31]

Le deuxième chiffre (xXxx), s'il n'est pas nul, indique s'il y a eu modification de l'alliage spécifique. Les troisième et quatrième chiffres identifient un alliage spécifique dans la série. Par ex. pour l'alliage 5183, le chiffre 5 indique qu'il s'agit d'un alliage de magnésium, le chiffre 1 indique qu'il s'agit de la première modification par rapport à l'alliage originel 5083 et le nombre 83 identifie l'alliage dans la série 5xxx. La seule exception dans ce système est la série 1xxx (aluminium pur) où les deux derniers chiffres donnent la teneur en aluminium minimale au-dessus de 99 %. L'alliage 1350 contient donc au moins 99,50 % d'aluminium.

A.3 Désignation des alliages de fonderie

Ce système contient trois chiffres plus une décimale (par ex. 356.0).

SÉRIES D'ALLIAGES	ÉLÉMENTS D'ALLIAGES PRINCIPAUX
1XX.X	99% d'aluminium minimum
2XX.X	cuivre
3XX.X	silicium + cuivre et/ou magnésium
4XX.X	silicium
5XX.X	magnésium
6XX.X	n'existe pas
7XX.X	zinc
8XX.X	étain
9XX.X	autres éléments

Tableau 3.6 – Désignation de l'aluminium de fonderie.[31]

Le premier chiffre (Xxx.x) désigne l'élément d'alliage principal. Les deuxième et troisième chiffres identifient l'alliage spécifique. Le chiffre après le point indique s'il s'agit d'une pièce moulée ou d'un lingot.

A.4 Désignation des traitements thermiques des alliages d'aluminium

Il existe des différences importantes dans les propriétés des différentes séries d'alliages d'aluminium ce qui a également une influence sur leur application.

Le premier chiffre après H désigne le traitement de base	
H1 - uniquement écroui	H3 - écroui et stabilisé
H2 - écroui et partiellement recuit	H4 - écroui et verni ou laqué
Le deuxième chiffre après H désigne le degré d'écrouissage	
HX2 - 1/4 dur	HX8 - 4/4 dur (pleinement écroui)
HX4 - 1/2 dur	HX9 - extra dur
HX6 - 3/4 dur	

Tableau 3.7 – Subdivision H-écrouissage.[31]

Il existe deux catégories totalement différentes parmi les séries surnommées : les alliages susceptibles de durcissement par traitement thermique et les alliages non susceptibles de durcissement. Cette distinction est très importante quand on examine l'influence du soudage sur ces deux catégories de matériaux. Les séries 1000, 3000 et 5000 ne peuvent être durcis que par écrouissage. Les alliages des séries 2000, 6000 et 7000 sont susceptibles de durcissement par traitement thermique. La série 4000 contient les deux catégories. Les alliages de fonderie des séries 200, 300, 400 et 700 sont susceptibles de durcissement par traitement thermique. L'écrouissage n'est généralement pas utilisés sur ces alliages.

- **Les alliages susceptibles de durcissement** : obtiennent leurs propriétés mécaniques optimales par traitements thermiques. Le plus utilisées la trempe après mise en solution suivi d'un vieillissement artificiel. Lors de la trempe après mise en solution, l'alliage est porté à une température de ± 280 °C afin d'avoir une mise en solution des éléments d'alliage. On réalise ensuite une trempe (souvent dans de l'eau) et on obtient ainsi une solution sursaturée à température ambiante. On applique ensuite souvent un traitement de vieillissement qui provoque une précipitation d'une partie des éléments d'alliage pour obtenir ainsi les propriétés souhaitées. Il existe deux types de processus de vieillissement : premièrement, le vieillissement naturel qui se passe à température ambiante et deuxièmement, le vieillissement artificiel qui se produit à température plus élevée. De nombreux alliages susceptibles de durcissement sont utilisés dans des constructions soudées à l'état trempé après mise en solution et vieilli artificiellement.

LETTRE	SIGNIFICATION
F	<u>Etat brut de fabrication</u> - Cette désignation est d'application pour les produits n'ayant subi aucun contrôle spécial en ce qui concerne les conditions thermiques ou de durcissement.
O	<u>Etat recuit</u> - D'application pour les produits ayant subi un traitement thermique ce qui donne les propriétés de résistance les plus faibles afin d'améliorer la ductilité et la stabilité dimensionnelle.
H	<u>Etat durci par écrouissage</u> - D'application pour les produits écrouis par déformation à froid qui peut être suivie d'un traitement thermique ce qui diminue la résistance en partie. La lettre H est toujours suivie de deux chiffres (voir tableau 6)
W	<u>Etat trempé après mise en solution</u> - État instable qui n'est appliqué que sur des alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante.
T	<u>Etat traité thermiquement</u> - Afin d'avoir un état stable après recuit (autre que F, O et H). D'application pour des produits traités thermiquement, parfois avec un écrouissage supplémentaire, afin d'avoir un produit stable. La lettre T est toujours suivie d'un ou plusieurs chiffres (voir Tableaux 7a et 7b).

Tableau 3.8 – Désignation de l'état de livraison.[31]

- **Les alliages non susceptibles de durcissement** : atteignent leurs propriétés mécaniques optimales après écrouissage (la résistance augmente avec l'importance de l'écrouissage). Le système pour la désignation du traitement thermique est repris au tableau 5. Une série de lettres et de chiffres est ajoutée au nombre désignant l'alliage (ex. 6061-T6). En plus de ces désignations de base, il y a encore deux subdivisions : l'une concerne la lettre H et l'autre la lettre T (traitement thermique).

T1	refroidi après transformation à chaud et mûri
T2	refroidi après transformation à chaud, écroui et mûri
T3	mis en solution, écroui et mûri
T4	mis en solution et mûri
T5	refroidi après transformation à chaud puis revenu
T6	mis en solution puis revenu
T7	mis en solution puis sur-revenu
T8	mis en solution, écroui puis revenu
T9	mis en solution, revenu puis écroui
T10	écroui après refroidissement et transformation à chaud et mûri
Des chiffres complémentaires indiquent que des traitements ont été appliqués (diminution des tensions propres)	
TX51 ou TXX51	- diminution des tensions par détensionnement par traction
TX52 ou TXX52	- diminution des tensions par détensionnement par compression

	Mise en solution	Transformation à chaud	Ecrouissage	Vieillessement naturel	Vieillessement artificiel	Ecrouissage
T1		X		X		
T2		X	X	X		
T3	X		X	X		
T4	X			X		
T5		X			X	
T6	X				X	
T7	X				X*	
T8	X		X		X	
T9	X				X	X
T10		X	X		X	

* survenu = stabilisé

(a) Subdivision de T-traitements thermiques (b) Subdivision e T-traitement thermique dans l'ordre chronologique

Tableau 3.9 – Traitement thermique des alliages d'aluminium.[31]

A.5 Les séries d'alliages d'aluminium et leurs propriétés.

- **Série 1000 (aluminium pur)** : Cette série ne peut pas être traitée thermiquement. La résistance à la traction varie de 69 à 186 N/mm². Elle a une excellente résistance à la traction dans un large domaine de température. Cette série est souvent désignée comme aluminium pur (min. 99,00 % Al). Ces alliages sont soudables mais ont un faible intervalle de fusion de sorte que des procédures de soudage acceptables demandent quelque attention. Comme ces alliages ont des propriétés mécaniques relativement faibles, ils sont rarement utilisés dans les constructions. Ils sont cependant utilisés en raison de leur résistance élevée à la corrosion et leur bonne conductibilité électrique. Ces alliages sont soudés avec un métal d'apport en aluminium pur ou de la série 4000 (alliage de silicium).
- **Série 2000 (alliage de Cu)** : Ces alliages peuvent être traités thermiquement. La résistance à la traction varie de 186 à 427 N/mm². Ce sont des alliages d'aluminium-cuivre (0,7 - 6,8 %) à résistance élevée, souvent utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale. Certains de ces alliages sont considérés comme non soudables (fissuration à chaud et sensibilité à la corrosion sous tension). D'autres peuvent être soudés avec des procédés de soudage à l'arc quand on suit une procédure de soudage correcte. Comme métal d'apport, on utilise la série 2000 (si on exige la même résistance) ou la série 4000 (avec du silicium ou aluminium et cuivre) en fonction de l'application.
- **Série 3000 (alliage de Mn)** : Ce sont des alliages aluminium manganèse (0,05 - 1,8 % Mn). La résistance maximale à la traction est de 110 à 283 N/mm². Ce sont des alliages ayant une résistance modérée avec une bonne résistance à la corrosion et une bonne capacité de mise en juvre et pouvant être utilisés à haute température casseroles et poêles, échangeurs de chaleur, ...). Ces alliages peuvent être soudés avec un métal d'apport de la série 1000 (à déconseiller), la série 4000 et la série 5000, en fonction de la composition et de l'application.
- **Série 4000 (alliage de Si)** : C'est la seule série qui contienne des alliages susceptibles de durcissement par traitement thermique et non susceptibles de durcissement. Ce sont des alliages aluminium-silicium (0,6 - 21,5 % Si). Quand on allie du silicium à de l'aluminium, on a un point de fusion plus faible et une meilleure fluidité à l'état fondu. Ces propriétés sont souhaitables tant pour le soudage que pour le brasage. Quand on ajoute un peu de silicium, l'alliage n'est pas susceptible de durcissement par traitement thermique. Ces alliages avec du magnésium ou du cuivre, en plus du silicium, peuvent être trempés après mise en solution. Ces métaux d'apport ne peuvent être appliqués que quand la construction soudée est ensuite traitée thermiquement.
- **Série 5000 (alliage de Mg)** : Ce sont des alliages d'aluminium magnésium (0,2 - 6,2 % Mn) ayant une résistance à la traction de 125 à 352 N/mm². Ils ne sont pas susceptibles de durcissement par traitement thermique et ont la résistance la plus élevée de ce groupe. Ces alliages sont très soudables et peuvent donc être utilisés pour diverses applications. Ces alliages sont souvent soudés avec des métaux d'apport choisis sur base de la composition du métal

de base et de l'application. Les alliages de cette série ayant plus de 3 % Mg ne peuvent être utilisés au-dessus de 65 °C car ils peuvent alors devenir sensibles à la corrosion sous tension. Les alliages ayant moins de 2,5 % Mg peuvent être soudés avec des métaux d'apport des séries 5000 et 4000. Avec plus de 2,5 Mg, seule la série 5000 peut être utilisée comme métal d'apport avec une composition appropriée au métal de base.

- **Série 6000 (alliage de Mg-Si)** : Les alliages de cette série sont susceptibles de durcissement par traitement thermique. La résistance à la traction varie de 125 à 400 N/mm². Ce sont des alliages d'aluminium-magnésium silicium (Mg et Si = ±1%) qui sont souvent utilisés dans des applications soudées. La plupart sont des produits extrudés. Ces alliages sont sensibles à la fissuration à chaud et doivent donc être soudés avec suffisamment de métal d'apport. Un métal d'apport des séries 4000 ou 5000 peut être utilisé.

- **Série 7000 (alliage de Zn)** : Ce sont des alliages d'aluminium zinc (0,8 - 12 % Zn) susceptibles de durcissement par traitement thermique avec une résistance variant de 220 à 605 N/mm². Ils appartiennent aux alliages d'aluminium ayant la résistance la plus élevée. Comme pour la série 2000, certains sont considérés comme non soudables avec des procédés de soudage à l'arc, les autres biens. Les alliages soudables, comme par exemple les alliages 7000, peuvent être soudés avec des métaux d'apport de la série 5000.

Annexe B : Le code de calcul par éléments finis Abaqus

B.2 le code de calcul par éléments finis Abaqus

Un solveur (Standard, Explicit, Implicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier d'entrée (.inp) et dont il écrit la solution vers un fichier de sortie (.odb) (ou fichier de résultats)

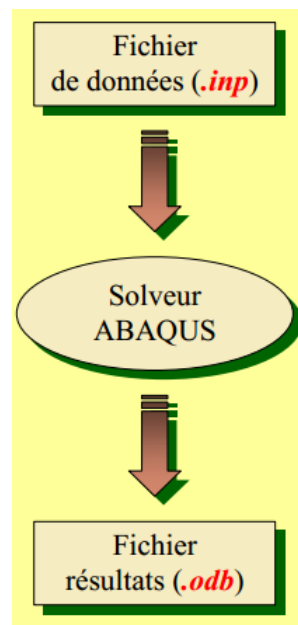


Figure 3.16 – Les fichiers d'entrée et de sortie dans le solveur Abaqus.

Les étapes de simulation sont résumées :

- 1- Preprocessing(Abaqus/CAE)
- 2- Simulation(Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit)
- 3- Postprocessing(Abaqus/CAE)

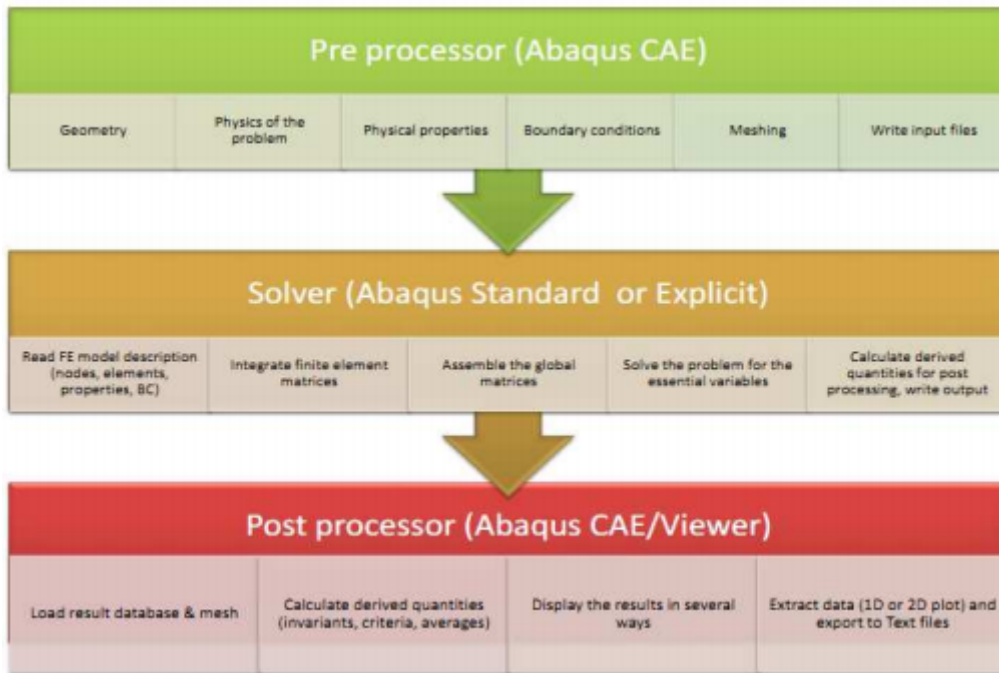


Figure 3.17 – Étapes de simulation dans le code de calcul par éléments finis Abaqus.

Les fichiers de sortie sont :

- **Le fichier (à texte) de données** : Extension : `.inp` Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions limites...;
- **Le fichier de résultats** : Extension : `.odb` Contenu : contours et courbes résultats Les autres fichiers créés pendant le calcul ;
- **Le Fichier .com** : exécutable de votre calcul ;
- **Le Fichier .dat** : Fichier résumé de votre modélisation Messages d'erreur concernant votre modélisation Temps de calcul ;
- **Le Fichier .msg** : Fichier résumé du calcul en cours Messages d'erreur lors du déroulement du calcul.

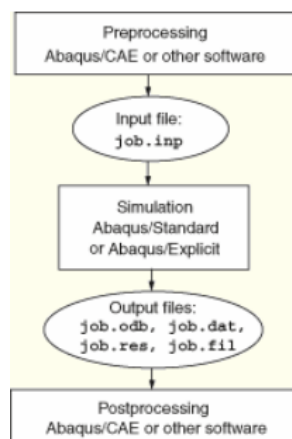


Figure 3.18 – Les fichiers de sortie après les calculs.

B.3 Description de l'interface ABAQUS CAE

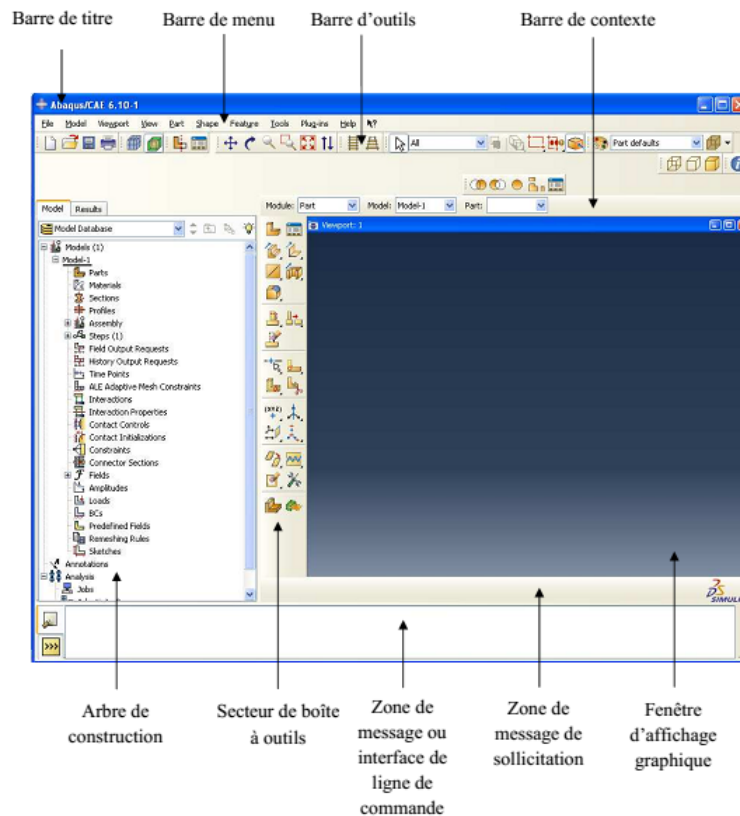


Figure 3.19 – Interface Abaqus.[11]

- **Barre de menu** : La barre de menu contient tous les menus disponibles ; les menus donnent l'accès à toutes les fonctionnalités du produit.
- **Barre d'outils** : Y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)
- **Barre de contexte** : Barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
- **Secteur de boîte à outils** : On dispose d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
- **Zone de message de sollicitation** : L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel Abaqus vous parle : les messages affichés à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise.
- **Arbre de construction** : L'arbre donne une description visuelle de la hiérarchie des objets du modèle. Tous les objets (comme des pièces, des matériaux, des étapes, des charges) sont indiqués par de petites icônes avec en parenthèses le nombre de ces objets. L'ordre de l'arbre

reflète l'ordre classique d'élaboration du modèle. A partir de cet arbre il est possible de retrouver la plupart des fonctionnalités de la barre de menu principale.

B.4 Les modules principaux d'Abaqus

B.4.1 ABAQUS/Standard

Résolution par EF les problèmes :

- Linéaires et non-linéaires
- Géométries 1D, 2D, Axis ou 3D
- Nombreuses procédures d'analyses dans le domaine temporel ou fréquentiel

B.4.2 ABAQUS/Explicit

Résolution par EF les problèmes :

- Analyse non-linéaire, transitoire et dynamique de structures Méthode explicite d'intégration du temps
- Mais possibilités d'analyses quasi-statiques où il existe un comportement non-linéaire.

B.5 Compléments de modules

- **ABAQUS/CAE** : environnement complet pour la création des modèles, le lancement d'une analyse et le traitement des résultats
- **ABAQUS/Post** : post-traitement Affichage déformée, iso-contours, graphiques...
- **ABAQUS/Viewer** : environnement interactif du post-traitement
- **ABAQUS ABAQUS/Design** : paramétrage des modèles ABAQUS et analyses de sensibilité
- **ABAQUS/Safe** : durée de vie d'une structure
- **Interfaces** : Catia, I-DEAS, Pro/Engineer... ADAMS, C-MOLD, Moldflow...
- **Informations supplémentaires** : <http://www.abaqus.com>

B.6 Les principaux Modules d'Abaqus

- **Le module PART** : Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans Abaqus CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.
- **Le module PROPERTY** : Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
- **Le module ASSEMBLY** : Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.
- **Le module STEP** : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.
- **Le module INTERACTION** : Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.
- **Le module LOAD** : Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.
- **Le module MESH** : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage. Le module n° JOB z. Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.
- **Le module VISUALIZATION** : Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations. . .

Annexe C : Impact de utilisation d'aluminium dans le secteur automobile

C.1 Introduction

Les matériaux en aluminium sont largement utilisés dans les secteurs automobile et ferroviaire, et ce pour augmenter les capacité de survie des accidents violent. Les véhicules doivent être conçus de manière à maintenir la déformation hors des zones occupées et à amortir le choc subi par les occupants[14]. En ce qui concerne les véhicules industriels, après avoir imposé les dispositifs anti encastrement frontaux, latéraux et arrière, l'Europe semble à présent vouloir aller plus loin afin de sauver des vies, en introduisant des critères d'absorption de l'énergie. En effet, certains constructeurs affirment que l'introduction d'une zone déformable à l'avant des poids lourds réduirait le nombre de morts de 900 unités par an sur les routes européennes.

C.2 Le principe

Un véhicule en mouvement possède une quantité d'énergie cinétique proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse. Pour le ralentir en cas d'urgence, la majorité de l'énergie cinétique doit être dissipée sous la forme de chaleur(les freins et les pneus). Quand cette énergie dissipée est insuffisante, la collision est inévitable et le véhicule absorbe la majeure partie de l'énergie résiduelle par déformation plastique . il convient d'éviter la déformation de l'habitacle grâce à une déformation contrôlée des parties non habitées. Les zones destinées à être écrasées seront donc moins résistantes que l'habitacle.

C.3 Trouver un compromis entre la décélération la plus douce et la légèreté

Pour mieux comprendre ce que cela signifie, examinons deux tubes métalliques cylindriques dans le cas simple d'un choc axial dans des conditions de laboratoire.

Pour une quantité définie d'énergie à absorber, on recherche la solution la plus compacte et la plus légère possible, on choisira un tube très résistant, court et épais, dont tout le volume subira des déformations plastiques importantes. Cette solution permet d'absorber près de 50 kilojoules (kJ) d'énergie par kg d'aluminium, elle est très compacte, mais impose une forte décélération aux passagers en cas d'accident.

Si une solution douce est requise, on choisira un élément moins résistant et moins épais, qui s'écrasera comme une canette de boisson. Étant donné que de nombreuses zones resteront planes et pratiquement non déformées, l'absorption d'énergie sera limitée à environ 25 kJ par kg d'aluminium et un élément plus long sera requis. Au plan des avantages, la décélération en cas d'accident sera beaucoup plus douce.

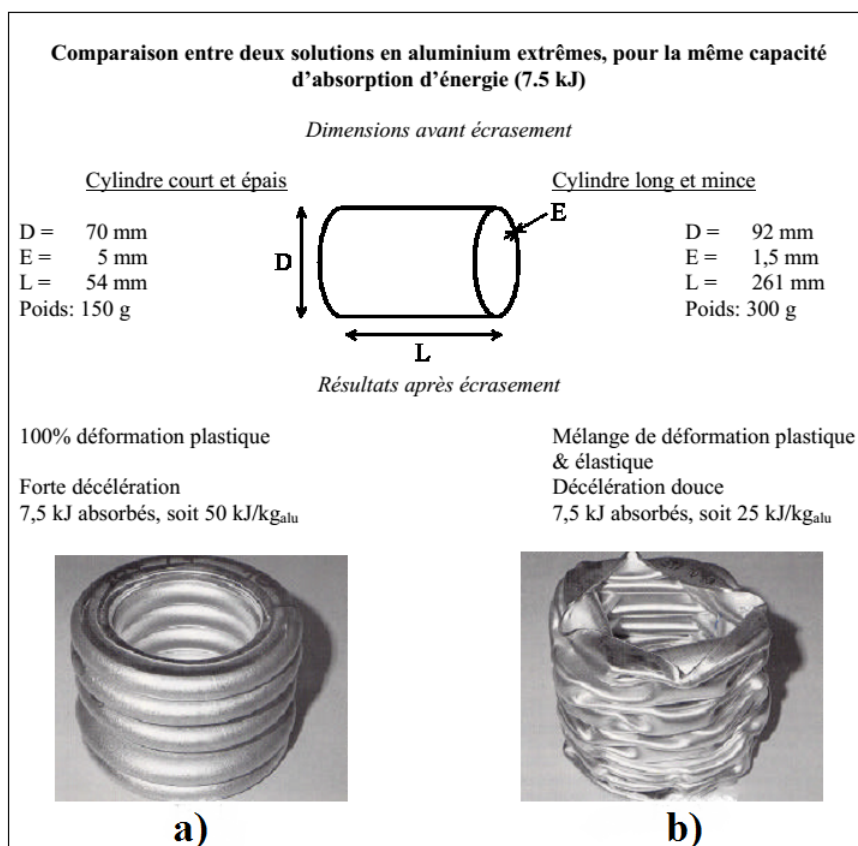


Figure 3.20 – Comparaison entre deux solutions en aluminium extrêmes, pour la même capacité d'absorption d'énergie (7.5 kJ).[14]

En pratique, il n'est pas possible d'obtenir 100% de déformation plastique et il faut généralement trouver un compromis entre les deux philosophies. Il existe une multitude de solutions intermédiaires, et les sections peuvent être beaucoup plus complexes (rectangulaire, multichambre, à épaisseur variable, etc.). Les solutions les plus fréquemment utilisées dans le secteur automobile permettent d'absorber de 20 à 35 kJ par kg d'aluminium et d'assurer un taux de décélération acceptable. Des systèmes qui se déforment selon le mode axisymétrique sont utilisés dans le secteur ferroviaire. En pratique, les scénarios de choc sont beaucoup plus complexes et les systèmes d'absorption d'énergie ne sont pas limités à un seul élément. .

C.4 Exemples dans le domaine automobile

Elue en 2003 voiture de l'année, la Renault Mégane II est équipée d'un pare-chocs avant en aluminium et de deux "crash boxes" en aluminium[14]. Parmi d'autres critères, le système est conçu pour absorber l'énergie d'un choc à une vitesse d'impact de 16 km/h. Cela permet d'éviter la déformation de la structure du véhicule lors d'accidents urbains typiques et facilite les réparations.



Figure 3.21 – RENFORCEMENT BARRE DE PARE CHOCS .(www.eurofrance)

Résultat : à performance égale avec des solutions traditionnelles, l'allègement offert par l'ensemble en aluminium dépasse 40% 6 . Le gain de poids réalisé sur le pare-chocs avant améliore également la tenue de route du véhicule dans les virages. Les pare-chocs avant et arrière en aluminium ont déjà conquis un tiers du marché automobile européen.