

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

**Comportement d'une tôle en aluminium sous chargement
thermomécanique. Aspects expérimentaux et
modélisation**

Réalisé par :

M. ARGAZ Youcef
M. GADOUM Mustapha

Soutenue le 07/10/2017 devant la Commission d'Examen

M. SAAL Mohamed	UMMTO	Président
M. ILLOUL Chérif	UMMTO	Examineur
M. OULD OUALI Mohand	UMMTO	Encadreur
M. ZEROUKI Marzak	UMMTO	Co-Encadreur

Promotion 2016/2017

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

**Comportement d'une tôle en aluminium sous chargement
thermomécanique. Aspects expérimentaux et
modélisation**

Réalisé par :

M. ARGAZ Youcef
M. GADOUM Mustapha

Soutenue le 07/10/2017 devant la Commission d'Examen

M. SAAL Mohamed	UMMTO	Président
M. ILLOUL Chérif	UMMTO	Examineur
M. OULD OUALI Mohand	UMMTO	Encadreur
M. ZEROUKI Marzak	UMMTO	Co-Encadreur

Promotion 2016/2017

Remerciements

Nos sincères gratitude à nos encadreur M. Ould Ouali Mohand et co-encadreur M. Zerouki Marzak pour la qualité de leurs enseignement, leurs conseils et leur intérêt incontestable qu'il porte à tous les étudiants.

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire

Nous Tenons à remercier les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Leurs disponibilités et leurs suggestions sont énormément appréciées.

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

Argaz Youcef

Gadoum Mustapha

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

Gadoum Mustapha

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Argaz Youcef

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Table des matières	IV
Table des figures	VIII
Liste des tableaux	XII
Liste des symboles	XIII
Résumé	XIV
Abstrat	XV
Introduction générale	1
1 Aluminium et ses alliages	2
1.1 Introduction	2
1.2 L'aluminium et ses alliages	2
1.2.1 Les alliages de corroyage	2
1.2.2 Les alliages de moulage	2
1.3 Les nuances des alliages d'aluminium	3
1.4 Les principales propriétés de l'aluminium	4
1.4.1 Légèreté.	4
1.4.2 Conductivité électrique et thermique.	5
1.4.3 Tenue à la corrosion	5

1.4.4	Propriétés mécaniques	5
1.5	Les domaines d'applications de l'aluminium	5
1.5.1	Dans le domaine de l'automobile	5
1.5.2	Dans le domaine de l'aérospatiale	6
1.5.3	Dans le domaine de l'Alimentation	6
1.5.4	Dans le domaine de la construction	6
1.5.5	Dans le domaine de l'électricité.	6
1.6	Mise en forme des tôles	6
1.6.1	Procédés de laminage	7
1.6.2	Procédé de L'hydroformage de tôles	7
1.6.3	Procédé de repoussage	8
1.6.4	Les procédés de cintrage et de pliage des tôles	8
1.6.5	Le procédé de formage incrémental	9
1.6.6	Le procédé d'emboutissage	9
1.7	Caractérisation mécanique du comportement des alliages d'aluminium	10
1.7.1	Essai de traction sur éprouvette plate normalisée	10
1.7.2	Grandeurs mécaniques obtenues de la courbe de traction	11
1.7.3	Les Courbes nominales et rationnelles	12
1.7.4	Effet de la vitesse déformation et de la température	12
1.7.4.1	Effet de la Vitesse de déformation	12
1.7.4.2	Effet de la Température	13
1.8	L'anisotropie	14
1.9	Écrouissage	15
1.10	Conclusion	16
2	Etude expérimentale	17
2.1	Introduction	17
2.2	Le matériau étudié	17
2.3	Caractérisation de matériau d'étude	20
2.4	Traction à différentes vitesses de déformation à température ambiante	22
2.4.1	Traction avec une vitesse de chargement $v= 1$ mm/min	22

2.4.2	Traction avec une vitesse de chargement $v= 10 \text{ mm/min}$	24
2.4.3	Etude comparative	25
2.5	Traction à différente vitesse de déformation à $T=290^\circ$	27
2.5.1	Traction avec une vitesse de chargement $v= 1 \text{ mm/min}$ à $T=290^\circ$.	27
2.5.2	Traction avec une vitesse de chargement $v= 10 \text{ mm/s}$ à $T=290^\circ$. .	29
2.5.3	Etude comparative des vitesses	31
2.6	Etude comparative	32
2.7	Conclusion	34
3	Simulation numérique	35
3.1	Introduction	35
3.2	Généralités sur le code de calcul par éléments finis Abaqus	35
3.2.1	Description de l'interface ABAQUS CAE	36
3.2.2	Les principaux Modules d'Abaqus	37
3.2.3	Les systèmes d'unités	37
3.2.4	Phases de mises en données	38
3.2.5	Schéma de résolution	38
3.2.5.1	Schéma Statistique Implicite	38
3.2.5.2	Schéma dynamique explicite	39
3.3	Quelques modèles numériques de comportement	39
3.3.1	Modèle élastique Abaqus	39
3.3.2	Modèle plastique Abaqus	40
3.3.3	Le critère d'anisotropie de Hill Abaqus	40
3.3.4	Modèle dépendant à la vitesse de déformation	41
3.3.5	Modèle d'endommagement par cisaillement (shear damage)	41
3.3.6	Chaleur spécifique	42
3.4	Préparatif de la simulation numérique	42
3.4.1	Condition aux limites	42
3.4.2	Le maillage	43
3.5	Simulation numérique	43

3.5.1	Traction à température ambiante	43
3.5.2	Traction à température $T=290^{\circ}$	46
3.6	Conclusion	48
	Conclusion générale	49
	Bibliographie	50
	A Les Modèles numériques	51

Table des figures

1.1	Diagramme des déformations rencontrées en mise en forme des tôles.[7]	6
1.2	Procédé de laminage.	7
1.3	Principe de procédé hydroformage, a) état initial et b) état final.[1]	7
1.4	Principe du procédé de repoussage.[6]	8
1.5	Principe du procédé de cintrage.	8
1.6	Les différents étapes du formage incrémental un point pour des trajectoires circulaires.[9]	9
1.7	Principaux modes de déformation par emboutissage. a) expansion, b) rétreint.[7]	9
1.8	Essai de traction normalisé.	10
1.9	Eprouvette de traction plane.	11
1.10	Essai de traction normalisé.	11
1.11	Les courbes conventionnelles et rationnelles.	12
1.12	Influence de vitesse de déformation.	13
1.13	Influence de température sur le comportement mécanique globale.	13
1.14	Courbe contrainte vraie et déformation vraie a déférente température.	13
1.15	Des éprouvettes selon les trois directions de laminage.	14
1.16	L'influence de coefficient d'écrouissage sur le comportement mécanique globale.	15
2.1	La tôle d'aluminium étudiée.	17
2.2	Micrographie du matériau étudié selon l'épaisseur et selon la longueur.	18
2.3	Eprouvettes de traction prélevées selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage.	18
2.4	Éprouvette de traction selon la norme ASTM-E10002.	19

2.5	Éprouvette de traction selon la norme ASTM-E10002 dans le cas de température $T=290^{\circ}$	19
2.6	Machine hydraulique IBERTEST.	19
2.7	Enceinte thermique utilisé dans notre étude (département de génie mécanique, UMMTO).	20
2.8	Courbes contrainte-déformation des éprouvette de traction selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^{\circ}, 45^{\circ}$ et 90°	20
2.9	Eprouvettes de traction avant et après déformation selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^{\circ}, 45^{\circ}$ et 90°	21
2.10	Variation de la limite à la traction selon les trois directions orthotropie par rapport a la direction de laminage.	22
2.11	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage.	22
2.12	Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de chargement $v=1\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage.	22
2.13	Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=1\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage.	23
2.14	Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie.	23
2.15	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie.	23
2.16	Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^{\circ}, 45^{\circ}$ et 90°	24
2.17	Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois direction de laminage.	24
2.18	Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie.	25
2.19	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie.	25
2.20	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour les vitesses $v=1\text{ mm/min}$ et $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois direction de laminage.	26
2.21	Variation d'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^{\circ}, 45^{\circ}$ et 90° pour les vitesse $v=1\text{ mm/min}$ et $v=10\text{ mm/min}$	26
2.22	Variation de la limite à la traction selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^{\circ}, 45^{\circ}$ et 90° . pour les vitesse $v=1\text{ mm/min}$ et $v=10\text{ mm/min}$	27

2.23	Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de $v=1\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage dans le cas d'une température $T=290^\circ$	28
2.24	Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=1\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie dans le cas $T=290^\circ$	28
2.25	Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie pour $v=1\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$	29
2.26	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie pour $v=1\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$	29
2.27	Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage à $T=290^\circ$	29
2.28	Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions de laminage à $T=290^\circ$	30
2.29	Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie pour une vitesse $v=10\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$	30
2.30	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie pour $v=10\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$	30
2.31	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour les vitesses $v=1\text{ mm/min}$ et $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie à $T=290^\circ$	31
2.32	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° dans le cas $v=1\text{mm/min}$ et $v=10\text{mm/min}$ à une température $T=290^\circ$	31
2.33	Variation de la limite à la traction en fonction des trois directions d'orthotropie dans le cas $v=1\text{mm/min}$ et $v=10\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$	32
2.34	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation à différentes températures et selon les trois directions d'orthotropie pour une vitesse de chargement $v=1\text{mm/min}$	32
2.35	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation à différentes températures et selon les trois directions d'orthotropie pour une vitesse de chargement $v=10\text{mm/min}$	33
2.36	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation à différent température et selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage, pour les vitesse de chargement $v=1\text{mm/min}$ et $v=10\text{ mm/min}$	33

2.37	Variation de la limite de traction selon les trois directions d'orthotropie pour les vitesses $v=1 \text{ mm/min}$ et $v=10\text{mm/min}$ à température ambiante et $T=290^\circ$.	34
2.38	Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie les vitesses $v=1 \text{ mm/min}$ et $v=10\text{mm/min}$ à température ambiante et $T=290^\circ$.	34
3.1	L'interface Abaqus.	36
3.2	shéma implicite	38
3.3	schéma explicit	39
3.4	Conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction.	42
3.5	Conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction.	42
3.6	Type de maillage choisi pour l'éprouvette de traction.	43
3.7	Type de maillage choisi pour l'éprouvette de traction.	43
3.8	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation des résultats numérique et expérimentaux pour une vitesse $v=10\text{mm/min}$.	44
3.9	Eprouvette de traction avant et après déformation de la simulation numérique selon la direction 0° DL.	45
3.10	Comparaison entre les courbes contrainte-déformation des résultats numérique et expérimentaux pour une vitesse $v=10\text{mm/min}$.	46
3.11	Eprouvette de traction après déformation de la simulation numérique pour une vitesse $v=10\text{mm/min}$.	47
A.1	interfaces material elastic	51
A.2	Modèle plastique sur Abaqus.	52
A.3	Critère Hill Abaqus.	52
A.4	Yield stress rations	53
A.5	shear damage	54
A.6	Évolution shear damage.	54
A.7	Conductivity	55
A.8	Expansion	55
A.9	Inelastic heat fraction.	56
A.10	Latent heat	56
A.11	Specific heat	57

Liste des tableaux

1.1	Les nuances des alliages d'aluminium.[5]	3
1.2	Nuances d'aluminium en fonction de mode de durcissement.[8]	4
2.1	Composition chimique de la tôle en aluminium.	18
2.2	Les caractéristique mécaniques de matériau étudié.	21
2.3	Les coefficients de Lankford.	21
2.4	Les coefficients de Lankford pour une vitesse de $v= 1 \text{ mm/min}$.	23
2.5	Les coefficients de Lankford pour une vitesse de $v= 10 \text{ mm/min}$.	25
2.6	Les coefficients de Lankford pour une vitesse de chargement $v= 1 \text{ mm/min}$ à $T=290^\circ$.	28
2.7	Les coefficients de Lankford pour une vitesse de $v= 10 \text{ mm/min}$ à une température $T=290^\circ$.	30
3.1	Systèmes d'unités.	37

Liste des symboles

σ_{eq} : La Contrainte équivalente de Von Mises.

R_e : La limite élastique du matériau.

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

$\bar{\varepsilon}^{pl}$: Déformation plastique plastique équivalente.

σ^* : La triaxialité.

K_T : Opérateur tangent.

ω_{max} : La plus grande valeur propre du système

Δt : pas de temps.

F_{int} : force intérieure

F_{ext} : extérieur

σ_H : contrainte de Hill

F, G, H : coefficient d'anisotropie de Hill

α : l'angle entre la direction de laminage de la tôle et la direction longitudinale de l'échantillon prélevé.

r_0 : coefficients de Lankford selon 0° par rapport à la direction de laminage

r_{45} : coefficients de Lankford selon 45° par rapport à la direction de laminage

r_{90} : coefficients de Lankford selon 90° par rapport à la direction de laminage

Résumé

Ce présent travail, est consacré à l'étude expérimentale et la simulation numérique de comportement mécanique de l'alliage d'aluminium-magnésium (tôle) à différentes vitesses de déformation et différentes températures (chargement thermomécanique).

Pour bien munir cette étude, nous avons entamé notre travail par une recherche bibliographique sur quelques notions générales sur les alliages d'aluminium, leurs propriétés mécaniques, et leurs utilisations dans le secteur industriel. Les procédés de mise en forme et la formabilité des tôles ainsi que les différents essais mécaniques sont abordés. (Chapitre I)

En suite, nous avons abordé l'aspect expérimental de notre travail. En première étape, nous avons focalisés sur la caractérisation mécanique de matériau d'étude. Dans la deuxième étape, les essais de traction sont réalisés sur des éprouvettes plates découpés selon trois directions de laminage 0° 45° 90° à des vitesses et températures différentes. Pour finir, une étude comparative est faite entre les différentes courbes obtenues afin de conclure l'effet de la vitesse de déformation et de la température sur le comportement mécanique de matériau d'étude. (Chapitre II)

Finalement, une initiation et des généralités sont exposées sur le code de calcul par éléments finis Abaqus, ainsi que les modèles numérique utilisés dans notre simulation. Nous terminons avec une étude comparative entre les résultats numériques et expérimentaux. (Chapitre III).

Mots clés : Abaqus/explicit, Hill, thermomécanique, Aluminium

Abstrat

This work is devoted to the experimental study and the numerical simulation of the mechanical behavior of the aluminum-magnesium alloy (sheet) at different deformation rates and different temperatures (thermomechanical loading).

In order to provide this study well, we began our work with a bibliographic search on some general notions about aluminum alloys, their mechanical properties and their uses in the industrial sector. The shaping processes and the formability of the sheets as well as the mechanical tests are discussed. (Chapter I)

As a result, we discussed the experimental aspect of our work. In the first stage, we focused on the mechanical characterization of study material. In the second step, the tensile tests are carried out on flat specimens cut in three directions of rolling 0° 45° 90° at different speeds and temperatures. Finally, a comparative study is made between the different curves obtained in order to conclude the effect of deformation velocity and temperature on the mechanical behavior of study material. (Chapter II)

Finally, an introduction and general information are presented on the Abaqus finite element code, as well as the numerical models used in our simulation. We conclude with a comparative study between numerical and experimental results. (Chapter III).

Keywords : Abaqus / explicit, anistorpe, therrmomécanique, endomagement, Aluminum

Introduction générale

L'aluminium et ses alliages arrivent en seconde position dans le classement des matériaux métalliques les plus utilisés dans le domaine industriel, et ce grâce à ses propriétés remarquables. Ses applications sont répandues dans plusieurs domaines tel que : l'aéronautique, le maritime et l'automobile..

Ce présent travail est consacré à l'étude expérimentale et la simulation numérique du comportement mécanique d'une tôle en alliages d'aluminium sous chargement thermomécanique. Pour mener à terme cette étude, nous avons d'abord réalisé une caractérisation du matériau à l'échelle microstructural. Puis étudier le comportement mécanique à différentes températures et vitesses de chargement. Finalement des simulations numériques ont été réalisées. Ce mémoire est structuré en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons exposé d'une manière globale des généralités sur l'aluminium et ses alliages en énumérant ses atouts. Nous avons ensuite présenté ses domaines d'application ainsi que les techniques de caractérisation de leurs comportements.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisé sur l'étude expérimentale du comportement mécanique d'un alliage d'aluminium-magnésium (Al-Mg) de série 5045 à différentes vitesses de chargement et différentes températures. Nous avons tout d'abord découpé des éprouvettes planes selon les trois directions d'orthotropie 0° , 45° et 90° . Ensuite, nous avons réalisé des essais de traction uni-axiale à des vitesses et températures différentes afin de déterminer l'effet de la vitesse de chargement, la température et l'anisotropie sur le comportement mécanique de matériau étudié. Les résultats obtenus sont interprétés et discutés.

Dans le dernier chapitre de notre travail, nous avons réalisé des simulation numérique avec le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS. En premier lieu, nous avons donné un aperçu rapide sur le code de calcul par éléments finis Abaqus. En suite nous avons cité les différents modèles utilisées dans la simulation numérique. Finalement une comparaison est effectuée entre les résultats expérimentaux et numériques.

Chapitre 1

Aluminium et ses alliages

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre de notre travail, nous présentons des généralités sur aluminium et ses alliages, en citant ces principales nuances ainsi que leurs caractéristiques mécanique et physique, en suite nous rappelons ses domaine d'utilisation et d'application. La caractérisation mécanique de comportement mécanique des alliages d'aluminium est abordé dans ce chapitre. En suite une vue générale est présenté sur l'anisotropie et l'érouissage.

1.2 L'aluminium et ses alliages

Il existe plusieurs centaines d'alliages commerciaux. On distingue deux grandes catégories d'alliages d'aluminium :

- * Les alliages de corroyage ;
- * Les alliages de moulage.

1.2.1 Les alliages de corroyage

Obtenus par (corroyage = déformation à chaud), coulés en plaques ou billettes puis transformés à chaud par laminage, forgeage, matriçage...etc. Les principales propriétés requises de ces alliages sont, selon les applications : Résistance mécanique, ductilité, résistance à la fatigue, résistance aux multiples formes de corrosion.

1.2.2 Les alliages de moulage

Obtenus par coulés dans des moules d'où sortent des produits semi-finis. Ils ne subissent donc pas de déformation importante mais doivent présenter, Parmi ses propriétés apprê-

ciées : la coulabilité, le retrait faible à la solidification, aucune formation de criques...etc. Une grande part des alliages de moulage provient de métal recyclé fondu. Les traitements thermiques et la déformation agissent sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des alliages d'aluminium en modifiant la microstructure et les contraintes internes résiduelles.[12]

1.3 Les nuances des alliages d'aluminium

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont permis de proposer une large gamme de nuances bien adaptées aux utilisations envisagées. En basant sur la nature des éléments d'alliages principaux, les alliages d'aluminium sont classés dans huit grandes familles (ex : 2000 pour le Cuivre).

Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
1000	Aucun		Cuivre
3000	Manganèse	0,5 – 1,5	Magnésium – cuivre
5000	Magnésium	0,5 - 5	Manganèse – Chrome
8000	Fer et silicium	Si : 0,3 – 1 Fe : 0,6 - 2	Nickel
Famille	Élément d'alliage	% en masse	Additions possibles
6000	Magnésium et silicium	Mg : 0,5 – 1,5 Si : 0,5 – 1,5	Silicium – magnésium- manganèse
2000	Cuivre	2 - 6	
7000	Zinc et magnésium	Zn : 5 – 7 Mg : 1 - 2	Cuivre
4000	Silicium	0,8 – 1,7	-

Tableau 1.1 – Les nuances des alliages d'aluminium.[5]

Les familles des alliages d'aluminium se divisent en deux groupes, et ce en fonction de mode de durcissement (Tableau 1.2).

Les alliages à durcissement par écrouissage : les familles **1000, 3000, 5000 et 8000**. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le durcissement plastique.

Les alliages à durcissement structural : les familles **2000, 4000, 6000 et 7000**. Les propriétés mécaniques de ces alliages sont déterminées par le traitement thermique.

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

1. Les alliages de la famille 5000 sont soudables résistants à la corrosion.
2. La famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique[4].
3. Les alliages de la série 3000 se caractérisent par : Une résistance mécanique faible mais qui peut être augmentée par écrouissage, une bonne aptitude à la mise en forme, au soudage et au brasage et une excellente résistance à la corrosion dans les conditions normales d'utilisation[8] .

	Système	Série	Phase principale	Domaine de résistance mécanique (MPa)							
				0	100	200	300	400	500	600	700
SANS DURCISSEMENT STRUC TURAL	Al	1000	Al-Fe-Si								
	Al-Mn	3000	Al ₃ -Mn								
	Al-Mg	5000	Al ₃ Mg ₂								
AVEC DURCISSEMENT STRUC TURAL	Al-Mg-Si	6000	Mg ₂ Si								
	Al-Cu	2000	Al ₂ Cu (Mg)								
	Al-Zn-Mg	7000	Mg Zn ₂								
	Al-Zn-Mg-Cu	7000 + Cu	Mg Zn ₂ (Cu)								

Tableau 1.2 – Nuances d'aluminium en fonction de mode de durcissement.[8]

1.4 Les principales propriétés de l'aluminium

1.4.1 Légèreté.

L'aluminium est légère et de plus présente des caractéristiques mécaniques très élevées telles que (sa bonne plasticité entant que métal, et sa résistance à la traction qui se rapproche de celle des aciers lorsque'il est allié à d'autres éléments). Il constitue de ce fait 80% du poids des avions actuels. Il est très utilisé dans les transports terrestres rapides (TGV) et maritimes, et de plus en plus dans l'automobile.[5]

1.4.2 Conductivité électrique et thermique.

L'aluminium offre une excellente conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. C'est pour cette raison qu'on le retrouve de plus en plus utilisé pour les lignes hautes tension.

1.4.3 Tenue à la corrosion

L'aluminium et ses alliages ont en général une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain, industriel. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics (grande arche de la défense, pyramide de Louvre) que pour les habitations individuelles.

1.4.4 Propriétés mécaniques

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, par addition d'éléments d'alliage ou par traitements thermiques.

L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité par rapport aux aciers. L'aluminium a une température de fusion relativement basse, d'environ 660°C. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. Sa ductilité à l'état solide permet de l'usiner facilement.

Parmi les principales différences avec l'acier notons l'élasticité (module de Young) et la densité qui sont trois fois moins élevées. La résistance mécanique et la résistance à la fatigue de l'aluminium sont tout aussi différentes de celles de l'acier. Contrairement à l'acier, la soudure de l'aluminium peut présenter certaines difficultés.

1.5 Les domaines d'applications de l'aluminium

1.5.1 Dans le domaine de l'automobile

Sa légèreté permet de réduire la consommation et les émissions de carburant. Son utilisation réduit le bruit et les vibrations. Son absorption de l'énergie cinétique fait que, dans un accident, une grande partie du choc est absorbée par la structure en aluminium. La longévité d'une pièce en aluminium est trois à quatre fois supérieure à celle de l'acier.[12]

1.5.2 Dans le domaine de l'aérospatiale

L'aluminium est très présent du fait surtout de sa légèreté. Il permet d'économiser le carburant, de réduire les émissions et d'augmenter la charge utile d'un avion [5].

1.5.3 Dans le domaine de l'Alimentation

Boîtes de conserves, papier aluminium, canettes, barquettes, ustensiles de cuisine. Cependant, l'aluminium en cas d'ingestion importante peut parfois avoir des effets néfastes pour le système nerveux.[3].

1.5.4 Dans le domaine de la construction

Le poids et la polyvalence de l'aluminium font de lui un matériau idéal pour les bâtiments et les revêtements. Sa résistance à la corrosion l'exempt pratiquement d'entretien .

1.5.5 Dans le domaine de l'électricité.

Lignes aériennes, câbles électriques de distribution et de transport d'énergie électrique, câbles d'énergie pour usage industriel. L'aluminium est en particulier adapté à cette utilisation en raison de sa conductivité électrique élevée, de sa base densité et sa bonne résistance à la corrosion. [10]

1.6 Mise en forme des tôles

La figure 1.1 indique la répartition des différents modes de déformation dans le plan $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, ε_1 correspond aux déformations principales maximales tandis qu' ε_2 aux déformations principales minimales ($\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2$).

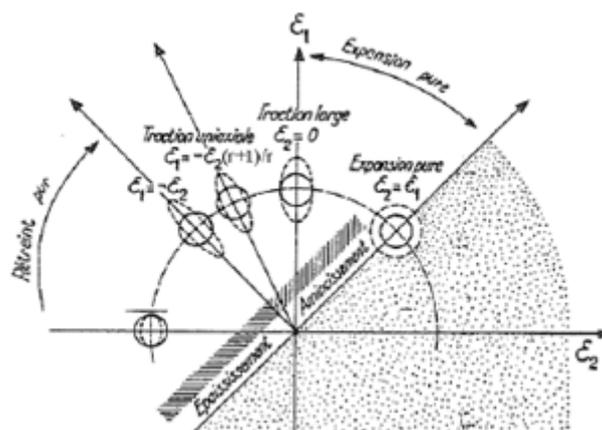


Figure 1.1 – Diagramme des déformations rencontrées en mise en forme des tôles.[7]

1.6.1 Procédés de laminage

Le laminage est le procédé de déformation le plus utilisé et consiste à faire passer une tôle entre deux cylindres dont l'écartement est inférieur à l'épaisseur initiale du lingot. Les deux cylindres du laminoir tournent dans des sens opposés (figure 1.2). La réduction d'épaisseur du lingot s'obtient d'une façon discontinue par passes successives dans le même laminoir ou en continu en utilisant des laminoirs placés en série. La déformation plastique du métal se fait essentiellement dans le sens du déplacement du lingot dont la longueur augmente à chaque passe.

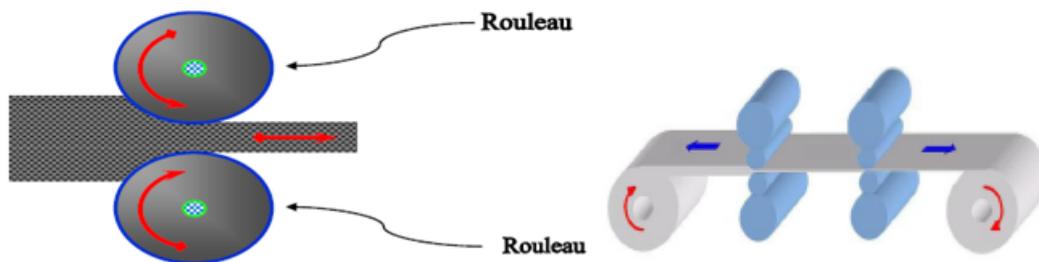


Figure 1.2 – Procédé de laminage.

Le laminage à froid et de laminage à chaud sont deux méthodes de travail sur les métaux. Les deux impliquent un serrage de métal entre deux ou plusieurs rouleaux, qui allongent et minces de gros morceaux de métal. La différence entre les deux méthodes est la température utilisée et les résultats finaux du laminage, y compris la force, la flexibilité et la finition de métal.

1.6.2 Procédé de L'hydroformage de tôles

L'hydroformage de tôles est un procédé de formage dans lequel des tôles métalliques sont mises en forme par l'action interne d'un fluide sous pression. Le principe est expliqué sur le schéma de la figure 1.3. L'hydroformage de tôles nous permis d'obtenir des formes complexe. Une répartition homogène et régulière de la pression.

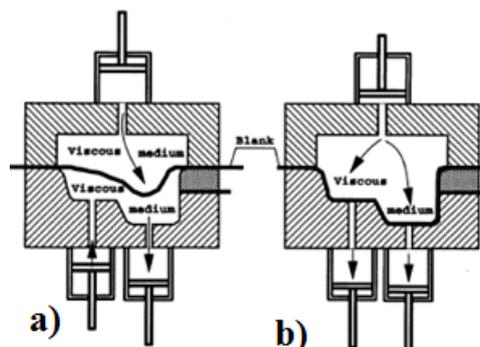


Figure 1.3 – Principe de procédé hydroformage, a) état initial et b) état final.[1]

1.6.3 Procédé de repoussage

Le repoussage est un procédé de formage rotatif qui permet de façonner des corps creux à partir de disques métalliques. La figure 1.3 présente le principe du repoussage. Les tôles sont appliquées sur un mandrin ayant la forme de la pièce désirée, grâce à des repousseurs, généralement à molette.

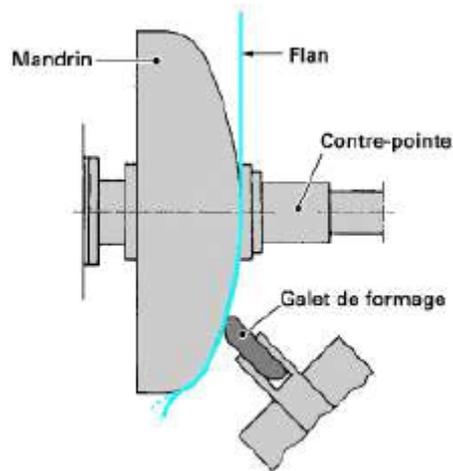


Figure 1.4 – Principe du procédé de repoussage.[6]

1.6.4 Les procédés de cintrage et de pliage des tôles

Le cintrage consiste à déformer une tôle de manière à lui donner une courbure et à réaliser des surfaces cylindriques ou coniques. Le principe du cintrage est présenté sur la figure 1.4. Cette déformation est réalisée par le passage des tôles entre des rouleaux convenablement étagés.

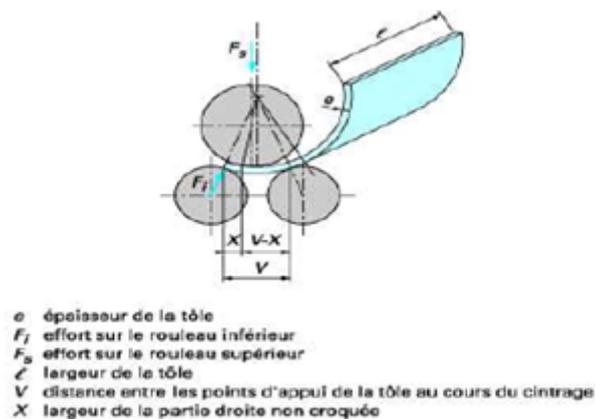


Figure 1.5 – Principe du procédé de cintrage.

1.6.5 Le procédé de formage incrémental

Un poinçon hémisphérique de petite taille devant les dimensions de la tôle vient déformer plastiquement la tôle. Ce poinçon suit une trajectoire prédéterminée et déforme localement la tôle de manière incrémentale.

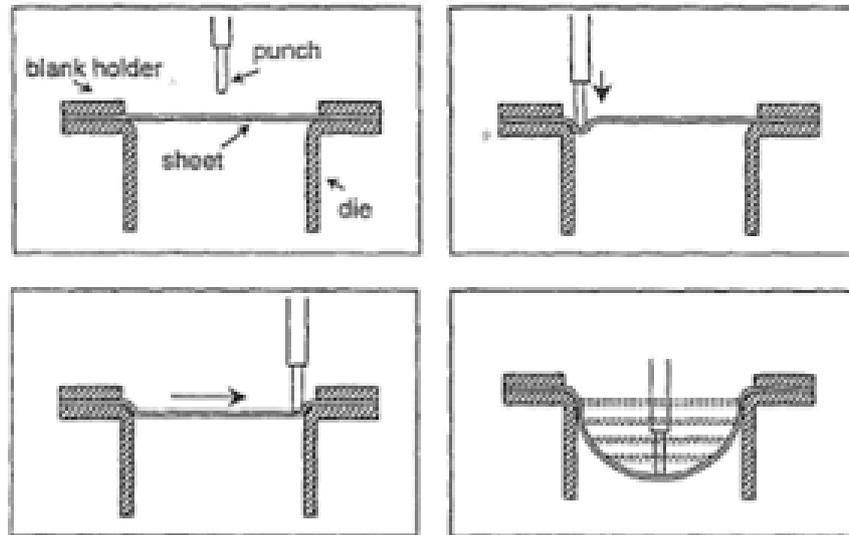


Figure 1.6 – Les différents étapes du formage incrémental un point pour des trajectoires circulaires.[9]

1.6.6 Le procédé d'emboutissage

L'emboutissage est un procédé de formage qui consiste à obtenir par déformation plastique de tôles minces, des pièces de formes plus ou moins complexes, non développables en général. L'obtention de la forme se fait par l'entraînement de la tôle sous l'action du poinçon dans la matrice.

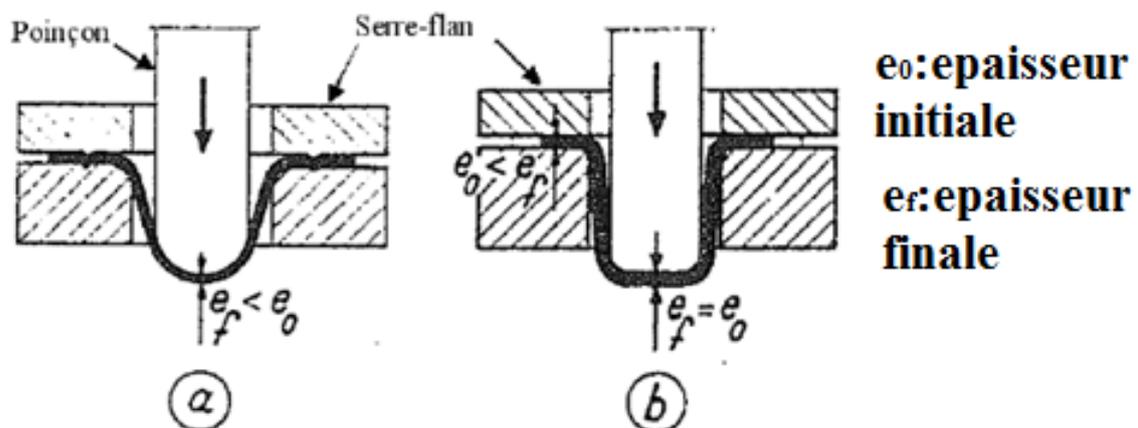


Figure 1.7 – Principaux modes de déformation par emboutissage. a) expansion, b) rétreint.[7]

1.7 Caractérisation mécanique du comportement des alliages d'aluminium

La réponse mécanique d'un matériau est différente selon le type de sollicitations qui est appliqué. Un matériau déformé en cisaillement n'aura pas le même comportement qu'un matériau déformé en compression ou en traction. Donc, il existe plusieurs types de tests pour étudier les différentes propriétés d'un matériau. Parmi ces techniques se retrouvent les essais de traction, les essais de compression, les essais de flexion et d'autres essais spécialement conçus pour représenter des conditions particulières ou une application spécifique.

L'essai de traction consiste à soumettre un spécimen à une force de traction et à mesurer la déformation qui s'ensuit (figure 1 a). Il est ainsi possible de mettre en relation la contrainte appliquée et la déformation mesurée pour connaître le module d'élasticité, caractériser le comportement de déformation plastique, mesurer la ductilité et la limite d'élasticité, etc. Ces informations peuvent ensuite être mises en lien avec la structure du matériau.

1.7.1 Essai de traction sur éprouvette plate normalisée

La figure 1.8 illustre une machine de traction conventionnelle ainsi qu'une courbe de traction typique. Par contre la figure 1.9 montre une éprouvette de traction plate.

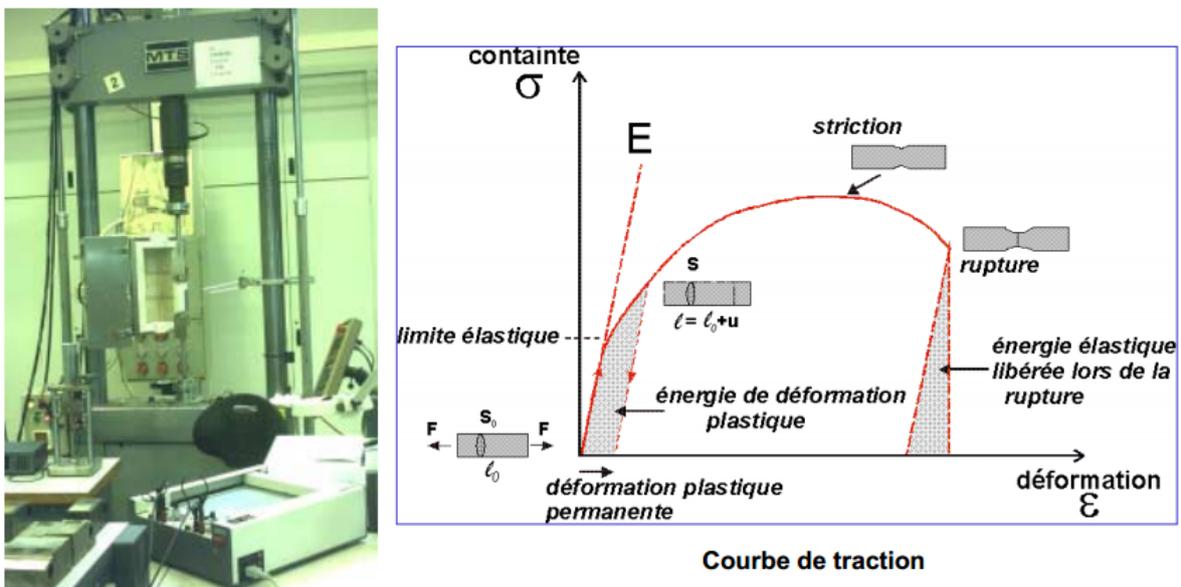


Figure 1.8 – Essai de traction normalisé.



Figure 1.9 – Eprouvette de traction plane.

1.7.2 Grandeurs mécaniques obtenues de la courbe de traction

La figure 1.10 illustre une courbe de traction conventionnelle d'un matériau ductile. Plusieurs grandeur caractéristiques sont tirées

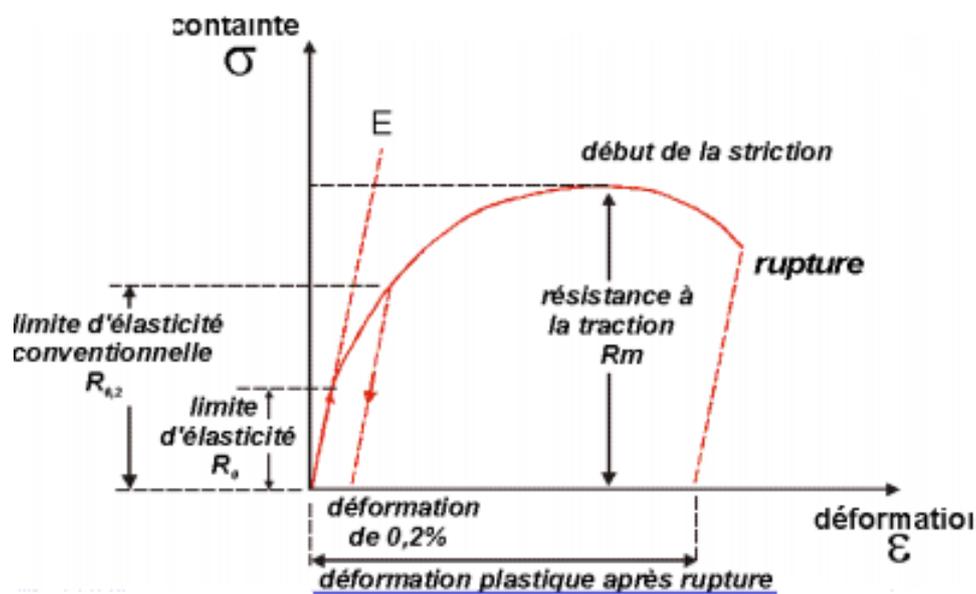


Figure 1.10 – Essai de traction normalisé.

Limite d'élasticité R_e

Limite d'élasticité conventionnelle $R_{p0.2}$

Résistance à la traction R_m

Module de Young E

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1.1)$$

Contrainte nominale σ_n

$$\sigma_n = \frac{F}{S_0} \quad (1.2)$$

Contrainte vraie σ

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1.3)$$

Déformation nominale ε_n

$$\varepsilon_n = \frac{u}{l_0} \quad (1.4)$$

Allongement à la rupture A_r

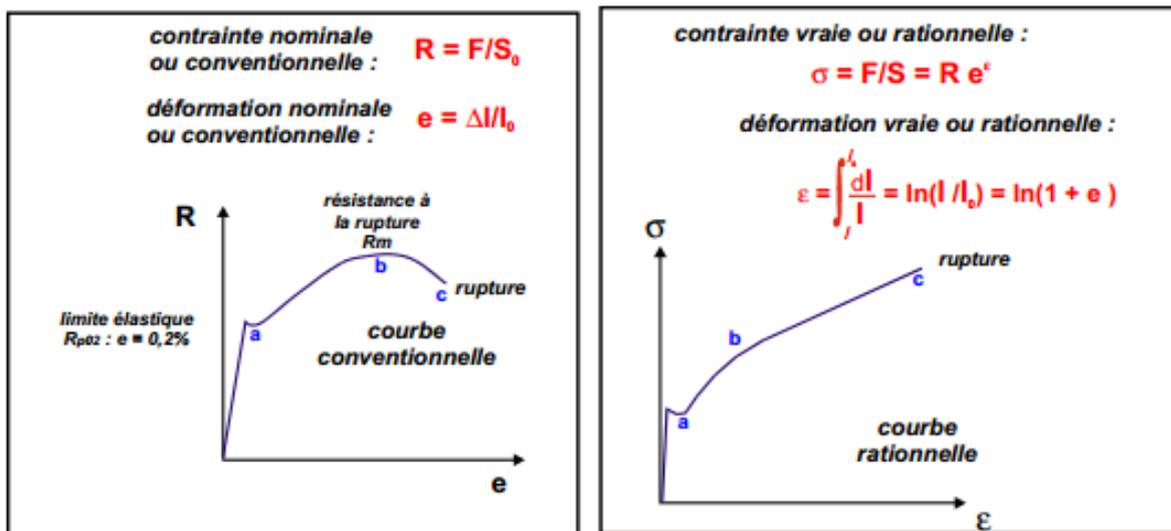
$$A_r = 100 \frac{l_{rup} - l_0}{l_0} \quad (1.5)$$

Coefficient de striction Z

$$Z = 100 \frac{S_{rup} - S_0}{S_0} \quad (1.6)$$

1.7.3 Les Courbes nominales et rationnelles

Les figures 1.11.a et 1.11.b représentent une comparaison entre les courbes conventionnelles et rationnelles ainsi que les grandeurs obtenues.



(a) La courbe conventionnelle

(b) La courbe rationnelle

Figure 1.11 – Les courbes conventionnelles et rationnelles.

1.7.4 Effet de la vitesse déformation et de la température

1.7.4.1 Effet de la Vitesse de déformation

Quand la vitesse de déformation augmente, la contrainte doit être plus élevée pour se déformer.

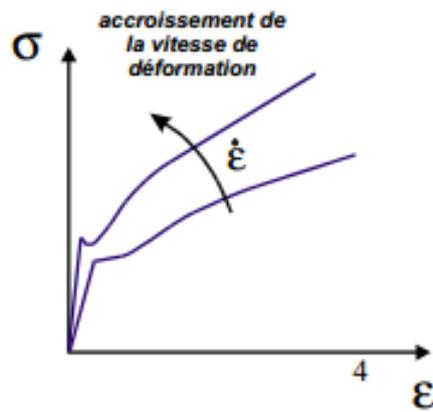


Figure 1.12 – Influence de vitesse de déformation.

1.7.4.2 Effet de la Température

Quand la température augmente la déformation plastique est plus facile.

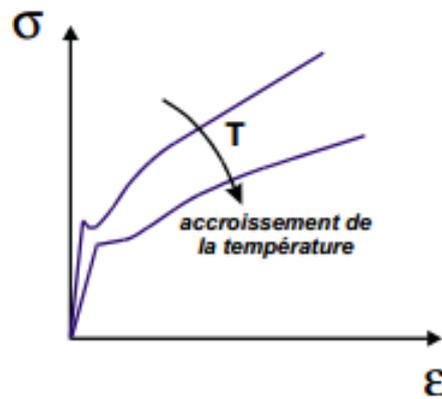


Figure 1.13 – Influence de température sur le comportement mécanique globale.

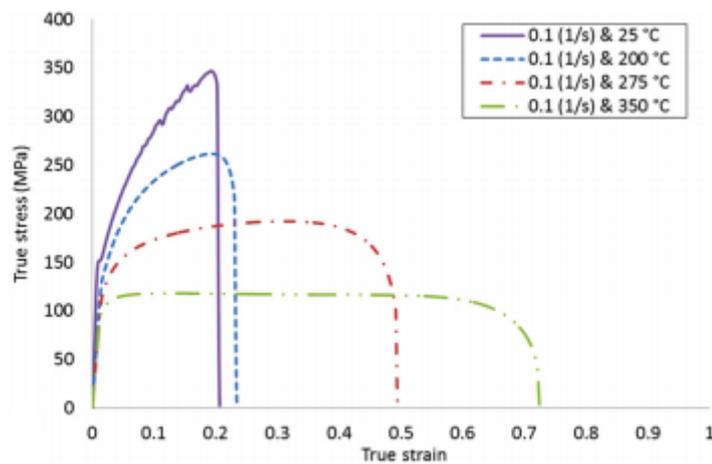


Figure 1.14 – Courbe contrainte vraie et déformation vraie a déferente température.

1.8 L'anisotropie

L'anisotropie macroscopique résulte d'une anisotropie élémentaire, qui est celle des éléments homogènes de la microstructure, et d'une anisotropie d'organisation, attachée à l'agencement spatial des éléments homogènes, ainsi que la composition de ces deux formes d'anisotropie.[11].

L'anisotropie des tôles d'aluminium est induite par les procédés du laminage, elle entraîne des défauts lors de l'opération de mise en forme des pièces par déformation. L'étude de l'anisotropie d'un matériau peut se faire :

- Par une caractérisation de la texture cristallographique du matériau en question : cette technique consiste à la détermination des orientations préférentielles des grains par rapport à un référent extérieur lié au mode de mise en forme de l'échantillon (direction du laminage dans le cas des tôles laminées).
- Par essais mécaniques de traction uniaxiale selon de différentes directions.

L'anisotropie (mécanique) plastique est évaluée grâce au coefficient d'anisotropie (coefficient de Lanckford r) :

$$r = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} \quad (1.7)$$

ε_2 ; ε_3 sont les déformations en directions respectivement de la largeur et de l'épaisseur, obtenues lors d'un essai de traction.

Le coefficient de Lankford, également appelé coefficient d'anisotropie plastique. Il représentatif du degré d'anisotropie plastique du matériau. Il se détermine au cours d'un essai de traction par l'évolution de la déformation plastique transversale par rapport à celle engendrée en épaisseur. Il permet de déterminer la résistance du matériau à l'amincissement et donc sa capacité à la formabilité.

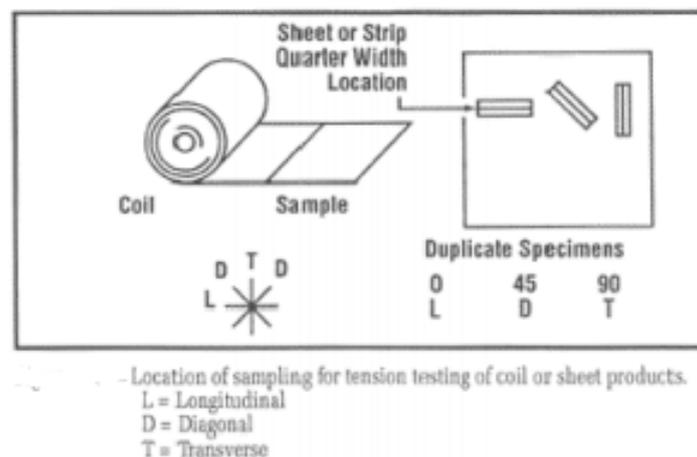


Figure 1.15 – Des éprouvettes selon les trois directions de laminage.

La valeur du coefficient de Lankford pour un matériau isotrope est de $r = 1$. Par convention, les valeurs de r sont habituellement déterminées pour un allongement de 20%. Les expériences prouvent que r dépend de la direction dans un plan[2]. Après avoir déterminé sur une tôle les valeurs du coefficient Lankford (r) pour trois directions du plan de laminage (0° , 45° , 90°) par rapport à la direction du laminage, on obtient le coefficient d'anisotropie normale à partir de l'équation :

$$r_n = \frac{r_0 + r_{90} + 2r_{45}}{4} \quad (1.8)$$

1.9 Écrouissage

L'écrouissage est un durcissement du matériau suite à une déformation à froid, de nombreux défauts sont introduits en particulier une forte densité de dislocation. l'énergie interne du matériau écroui est supérieure à celle du matériau non écroui et l'écrouissage induit une nouvelle orientation préférentielle du matériau.

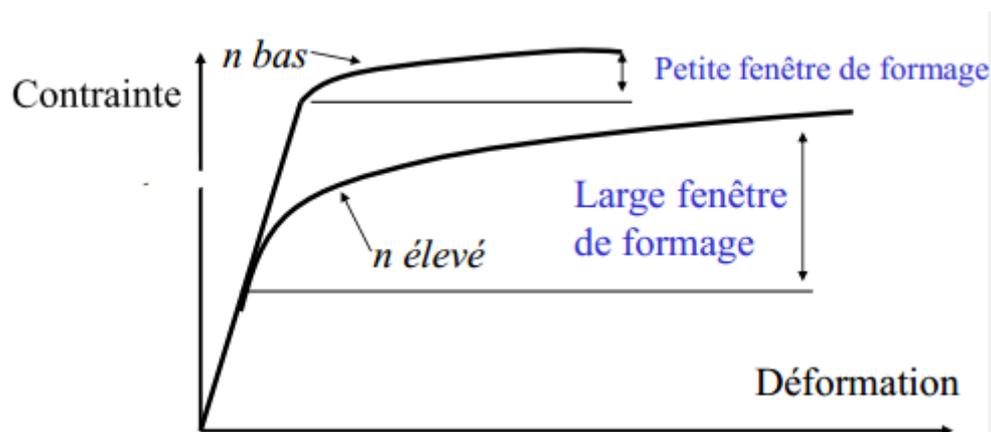


Figure 1.16 – L'influence de coefficient d'écrouissage sur le comportement mécanique globale.

Le coefficient d'écrouissage est mesuré lors de l'essai de traction, et la relation de Holloman a été proposée pour rendre compte de la forme de la courbe de traction, cette relation est valable uniquement pour les métaux doux cette relation est donner par l'équation :

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.9)$$

Ou n représente le coefficient d'écrouissage, σ représente la contrainte vraie et ε représente la déformation vraie, le coefficient d'écrouissage est calculé à partir de du tracé de courbe rationnelle en coordonnées logarithmique.

1.10 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de consolider nos connaissances concernant les alliages d'aluminium ainsi que les procédés de formage des tôles et la caractérisation mécanique des métaux.

Chapitre 2

Etude expérimentale

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous abordons l'aspect expérimental de notre étude. En premier temps, nous caractérisons le matériau d'étude en déterminant ses propriétés mécaniques, En suite nous réalisons des essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes plates normalisée à différentes vitesses de déformations et différentes températures. Les résultats expérimentaux obtenus sont interprétés et discutés.

2.2 Le matériau étudié

Le matériau étudié est un alliages d'aluminium AlMgMn de la série 5045, qui se présente sous forme d'une tôle laminée à froid d'une épaisseur de 5 mm. La figure 2.1 montre la tôle en aluminium étudiée.

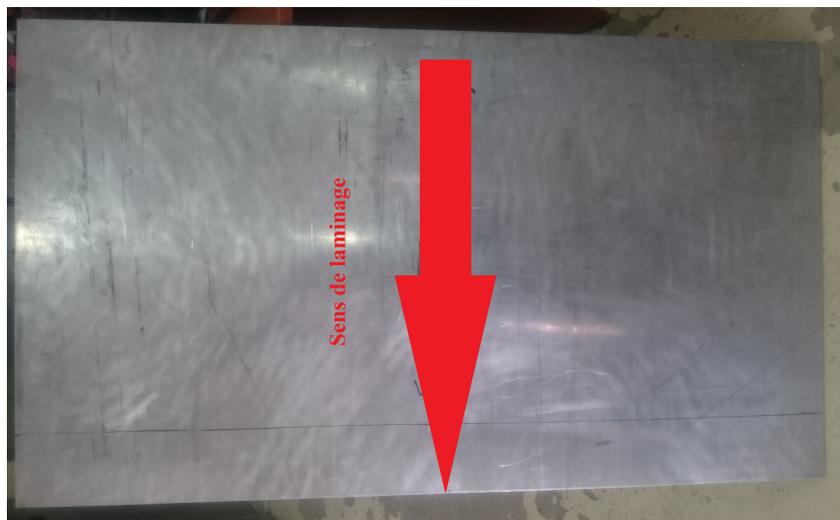


Figure 2.1 – La tôle d'aluminium étudiée.

La composition chimique de matériau étudié est donnée dans le tableau 2.1.

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

Tableau 2.1 – Composition chimique de la tôle en aluminium.

La figure 2.2 présente la micrographie du matériau étudié réalisé avec un microscope optique après une attaque chimique avec le solution de Killer (NaOH) avec un temps de maintien $t=20s$. La micrographie est réalisé selon l'épaisseur et la longueur de la tôle respectivement.

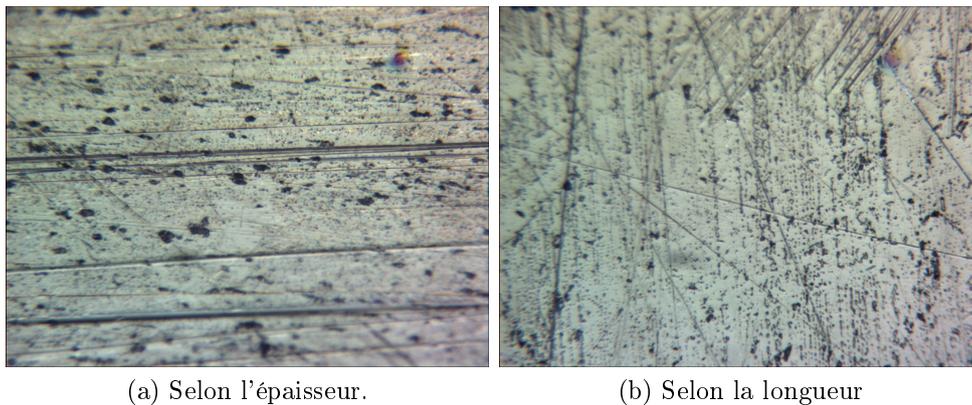


Figure 2.2 – Micrographie du matériau étudié selon l'épaisseur et selon la longueur.

Les essais de traction sont effectués sur des éprouvettes planes en alliages d'aluminium découpées selon les trois directions d'orthotropie 0° , 45° et 90° par rapport à la direction de laminage (Figure 2.3). La figure 2.4 illustre l'éprouvette de traction utilisée dans les essais de traction selon la norme ASTM-E10002.



Figure 2.3 – Éprouvettes de traction prélevées selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage.

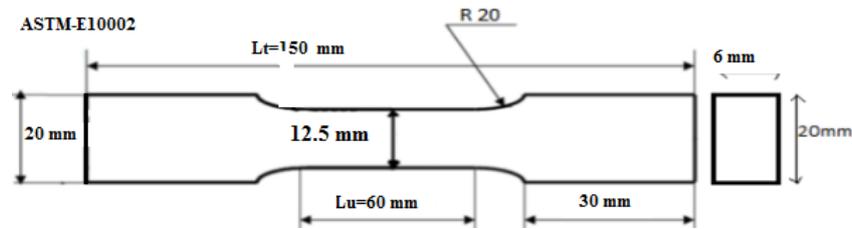


Figure 2.4 – Éprouvette de traction selon la norme ASTM-E10002.

La figure 2.5 montre les dimensions de l'éprouvette de traction utilisée dans le cas de température $T=290^{\circ}$. Les éprouvettes sont prélevées selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage 0° , 45° et 90° .

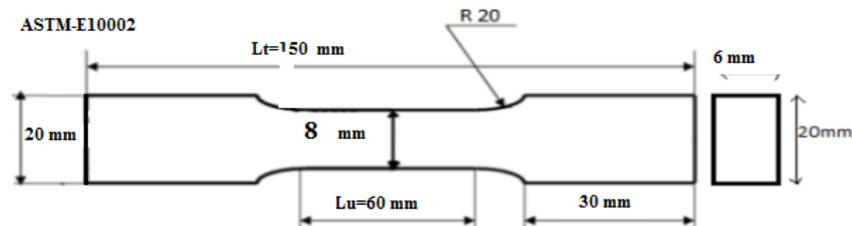


Figure 2.5 – Éprouvette de traction selon la norme ASTM-E10002 dans le cas de température $T=290^{\circ}$.

Dans cette étude nous avons utilisé une machine de traction hydraulique IBERTEST, avec acquisition par ordinateur localisée. La figure 2.7 montre l'enceinte thermique utilisée dans notre étude. Les éprouvettes de traction sont maintenues pendant $t=5$ min sous une température $T=290^{\circ}$.



Figure 2.6 – Machine hydraulique IBERTEST.

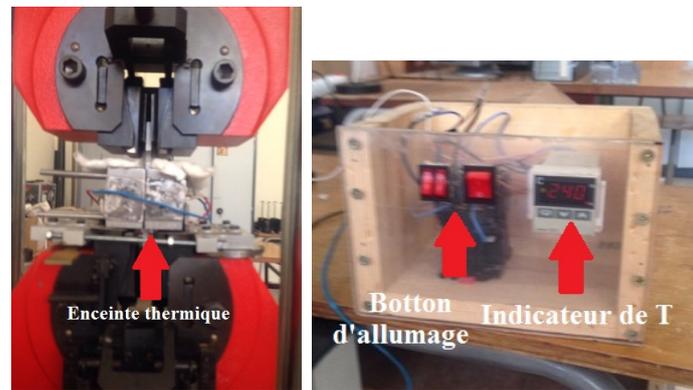


Figure 2.7 – Enceinte thermique utilisé dans notre étude (département de génie mécanique, UMMTO).

L'enceinte thermique est étalonnée par l'équation suivante :

$$T = \frac{T_{iréel} + 7.0028}{1.2426} \quad (2.1)$$

tel que T est la température affichée sur l'indicateur de température ; et $T_{iréel}$: la température souhaitée.

2.3 Caractérisation de matériau d'étude

La figure 2.8 donne les courbes contrainte-déformation obtenues selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage. Les résultats obtenus dévoilent que l'anisotropie se manifeste sensiblement à des déformation élevées, de plus l'éprouvette découpée à 90° enregistre une élévation de la limite de traction par rapport 0° et 45° .

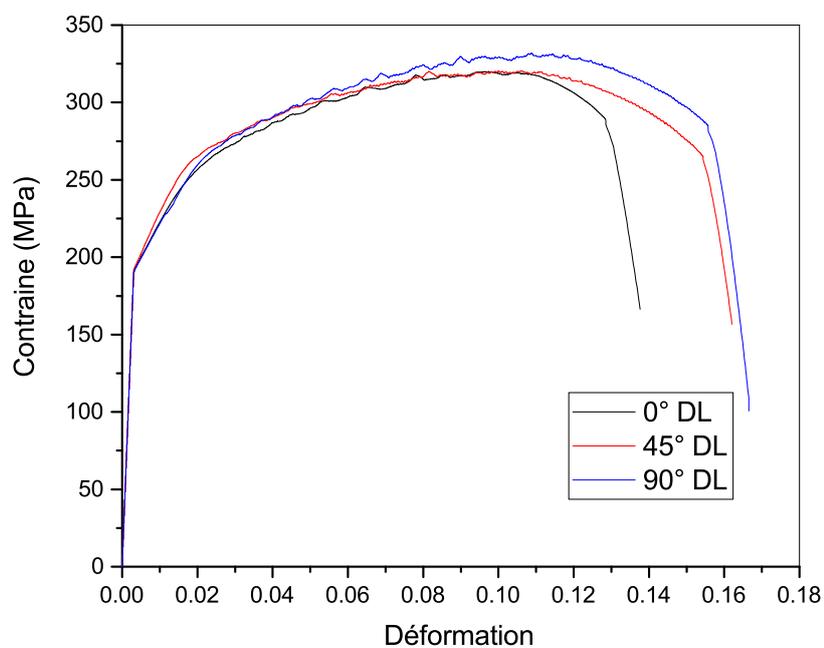


Figure 2.8 – Courbes contrainte-déformation des éprouvette de traction selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage 0° , 45° et 90° .

Les éprouvettes de traction avant et après déformation selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage sont présentées dans la figure 2.9. La rupture de l'éprouvette est enregistrée au milieu selon un angle de de 45° par rapport à la direction de chargement selon l'épaisseur.

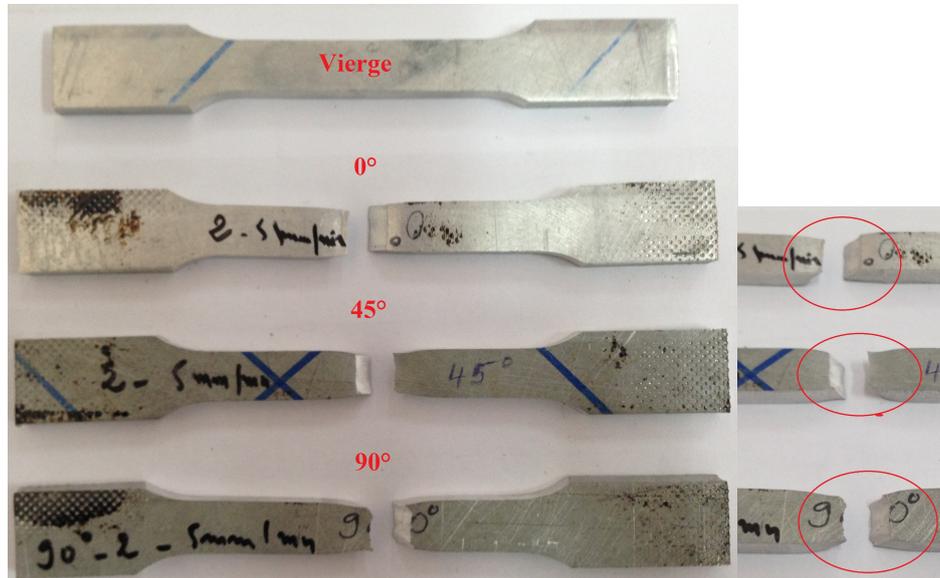


Figure 2.9 – Epreuves de traction avant et après déformation selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage 0°,45° et 90°.

Les caractéristiques mécaniques de matériau d'étude sont regroupées dans le tableau 2.2.

Module de Young E(MPa)	Limite élastique Re(MPa)	Coef. de poisson ν	La limite de traction Rm
69000	186	0.33	316

Tableau 2.2 – Les caractéristique mécaniques de matériau étudié.

Le tableau 2.3 regroupe les coefficient de Lankford (anisotropie) selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage 0°,45° et 90°, ainsi que le coefficient de Lankford moyen.

r_0	r_{45}	r_{90}	r
0.73	1.04	1.12	0.98

Tableau 2.3 – Les coefficients de Lankford.

Les figures 2.10 et 2.11 montrent la variation de la limite de traction et de l'allongement à la rupture, respectivement, selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage. La limite de traction reste inchangé pour les directions 0° et 45°, mais elle enregistre une augmentation pour la directions 90°. Par contre l'allongement à la rupture est dépendant de la direction de laminage.

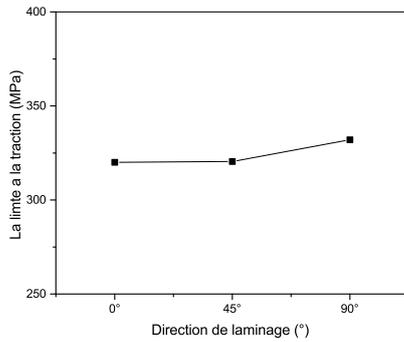


Figure 2.10 – Variation de la limite à la traction selon les trois directions orthotropie par rapport a la direction de laminage.

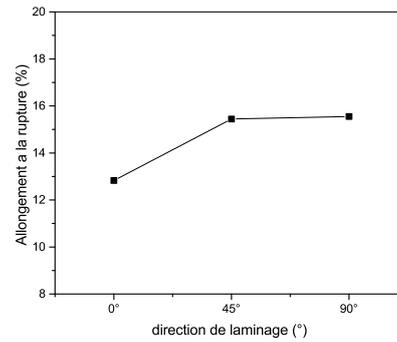


Figure 2.11 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage.

2.4 Traction à différentes vitesses de déformation à température ambiante

2.4.1 Traction avec une vitesse de chargement $v = 1 \text{ mm/min}$

La figure 2.12 illustre une comparaison entre les courbes contrainte-déformation obtenues selon les trois directions orthotropie avec une vitesse de chargement $v = 1 \text{ mm/s}$. Cette comparaison montre une anisotropie de comportement mécanique. nous observons que la limite d'élasticité de l'éprouvette découpée par rapport a 90° est supérieur a celle des éprouvettes faisant 0° et 45° .

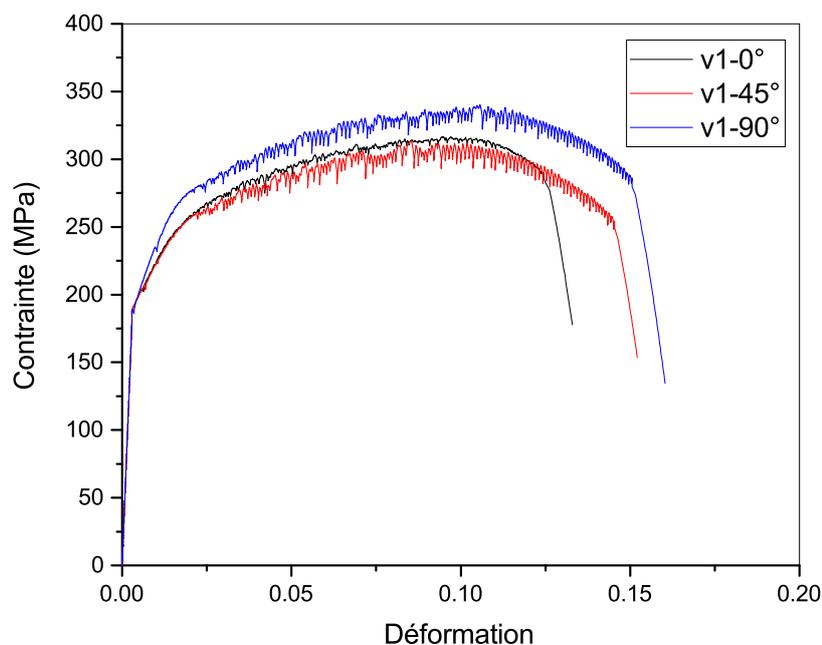


Figure 2.12 – Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de chargement $v = 1 \text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage.

Les éprouvettes de traction avant et après déformation pour une vitesse de chargement $v=1\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage sont exposées dans la figure 2.13. La rupture de l'éprouvette se manifeste en milieu avec un angle de 45° .

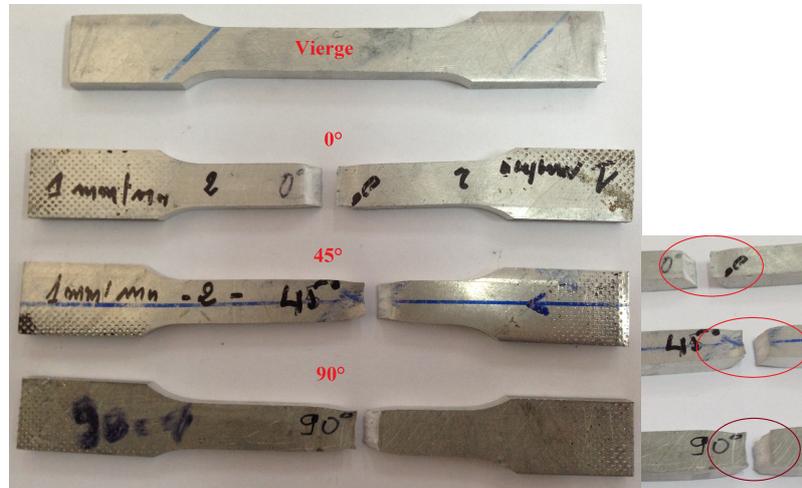


Figure 2.13 – Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=1\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage.

Le tableau 2.4 donne les coefficients de Lankford selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° , ainsi que et le coefficient de Lankford moyen pour une vitesse de chargement $v=1\text{ mm/min}$.

r_0	r_{45}	r_{90}	r
0.68	1.13	1.06	0.99

Tableau 2.4 – Les coefficients de Lankford pour une vitesse de $v=1\text{ mm/min}$.

Les figures 2.14 et 2.15 montrent la variation de la limite de traction et de l'allongement à la rupture, respectivement, selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage. La limite de traction reste inchangé pour les directions 0° et 45° , mais enregistre une augmentation pour la directions 90° , par contre l'allongement à la rupture est dépendant de la direction de laminage.

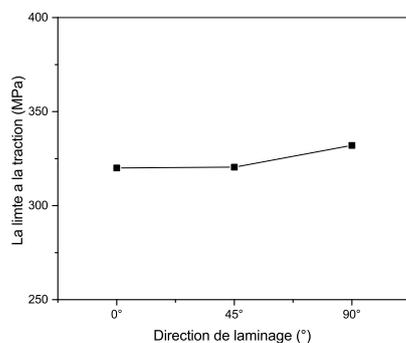


Figure 2.14 – Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie.

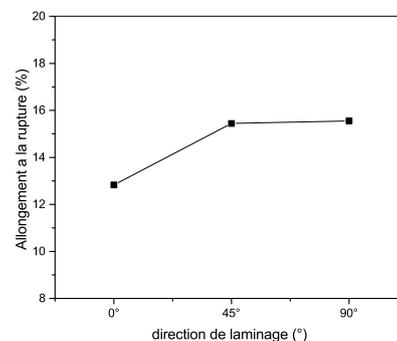


Figure 2.15 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie.

2.4.2 Traction avec une vitesse de chargement $v=10\text{ mm/min}$

La figure 2.16 représente une comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour une vitesse de déformation $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° . Cette étude comparative montre que le comportement mécanique de matériau d'étude est anisotrope.

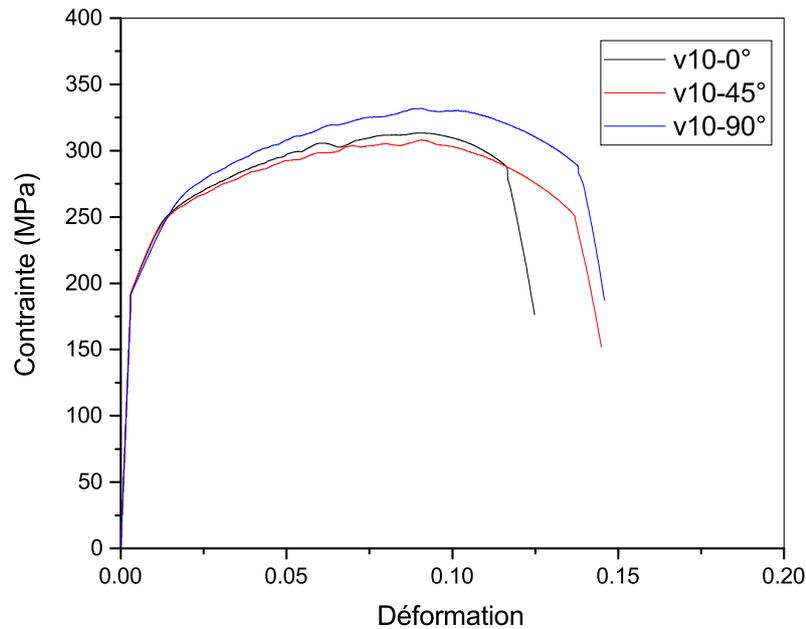


Figure 2.16 – Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° .

La figure 2.17 montre les éprouvettes de traction avant et après déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° . La rupture des éprouvettes est enregistrée en milieu avec un angle de 45° .

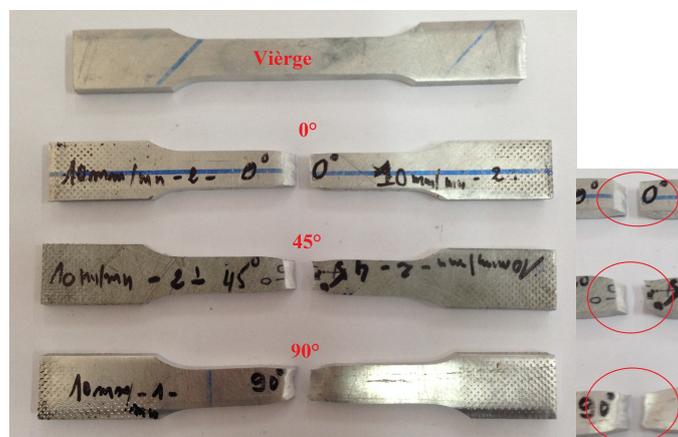


Figure 2.17 – Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois direction de laminage.

Le tableau 2.5 donne les coefficients de Lankford selon les trois directions d'orthotropie 0° , 45° et 90° , ainsi que le coefficient de Lankford moyen.

r_0	r_{45}	r_{90}	r
0.84	0.98	0.18	0.74

Tableau 2.5 – Les coefficients de Lankford pour une vitesse de $v=10$ mm/min.

Les figures 2.18 et 2.19 présentent la variation de la limite de traction et de l'allongement à la rupture, respectivement, en fonction des trois directions de laminage. La limite à la traction augmente pour la directions 90° , l'allongement à la rupture est dépendant des trois directions de laminage.

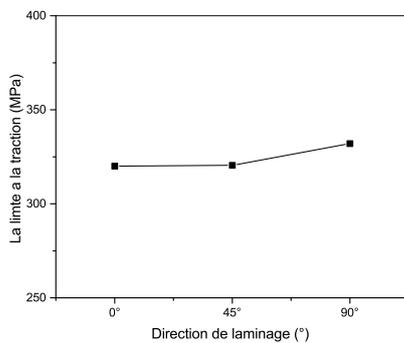


Figure 2.18 – Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie.

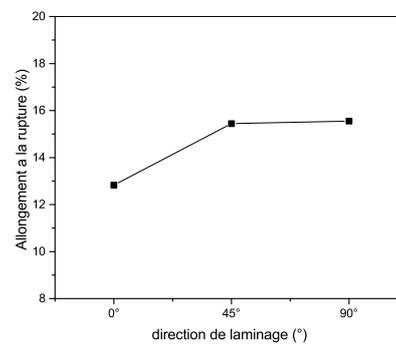


Figure 2.19 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie.

2.4.3 Etude comparative

La figures 2.20 illustre une comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min selon les trois directions de laminage.

Nous constatons que l'endommagement est dépendant de la vitesse de déformation et direction de laminage.

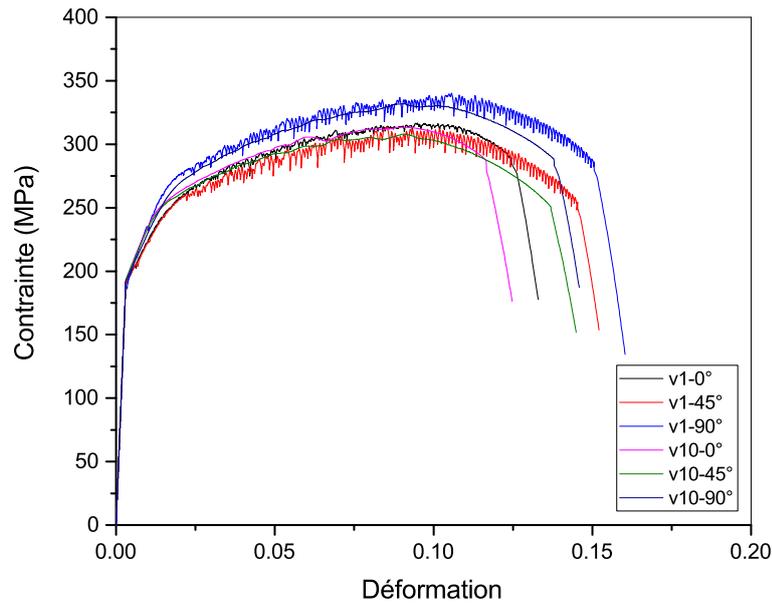


Figure 2.20 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min selon les trois direction de laminage.

La figure 2.21 montre une variation d'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° , pour les vitesse $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min. Nous constatons que la vitesse de déformation et la direction de laminage n'ont pas une grande influence sur la valeur de l'allongement à la rupture.

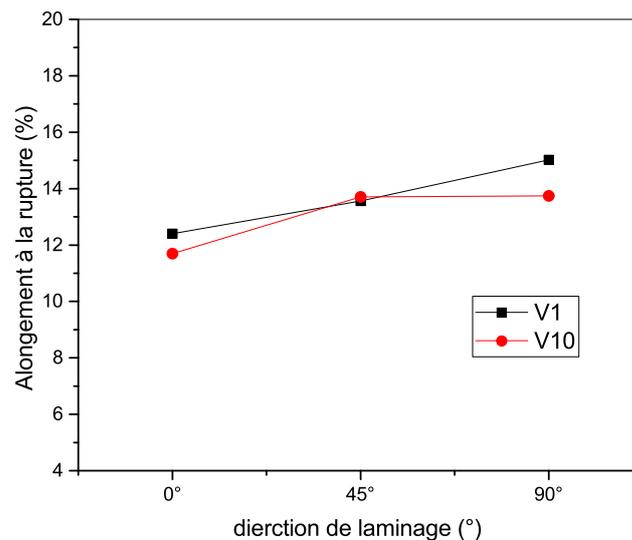


Figure 2.21 – Variation d'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° pour les vitesse $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min.

La figure 2.22 évoque la variation de la limite à la traction selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° , pour les vitesse $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min. La vitesse de déformation et les directions de laminage ont une légère influence sur la limite en traction.

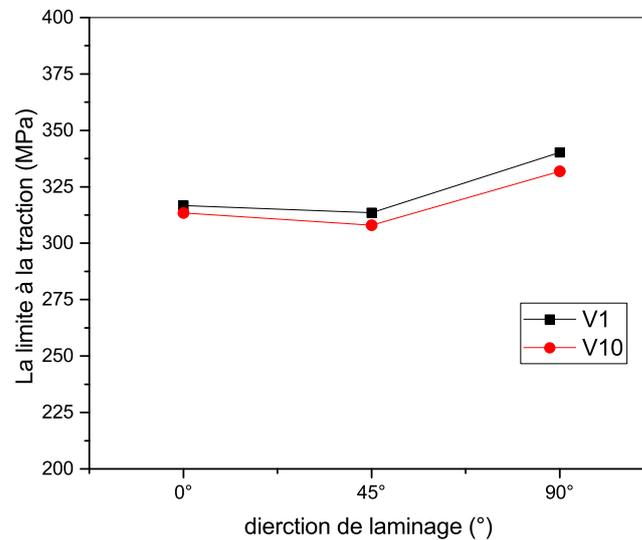


Figure 2.22 – Variation de la limite à la traction selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° . pour les vitesse $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min.

2.5 Traction à différente vitesse de déformation à $T=290^\circ$

2.5.1 Traction avec une vitesse de chargement $v=1$ mm/min à $T=290^\circ$

La figure 2.23 illustre les courbes contrainte-déformation obtenues avec une vitesse de chargement $v=1$ mm/min selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° , dans le cas de une température $T=290^\circ$. Une anisotropie est enregistré sur le comportement mécanique de matériau d'étude.

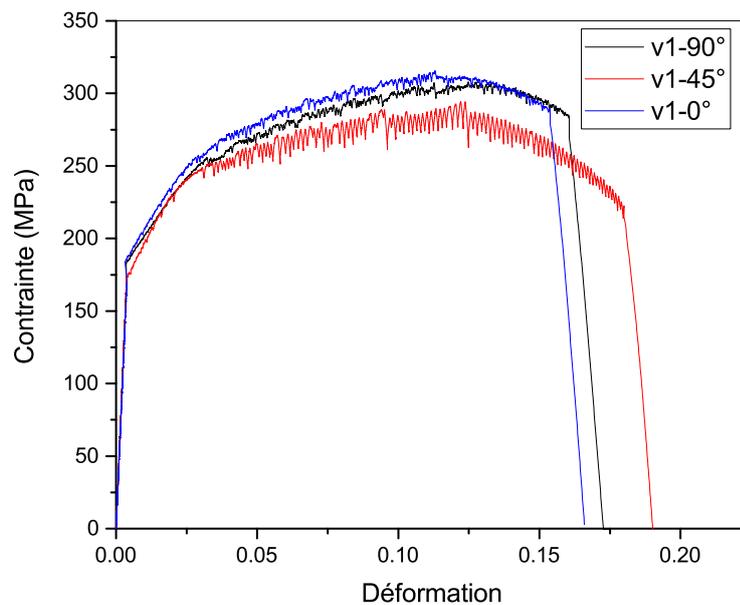


Figure 2.23 – Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de $v=1 \text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage dans le cas d'une température $T=290^\circ$.

La figure 2.24 présente une comparaison entre les éprouvettes de traction avant et après déformation à $v=1\text{mm/min}$ selon les trois directions de laminage à $T=290^\circ$. La rupture de l'éprouvette est enregistrée au milieu avec un angle de 45° .



Figure 2.24 – Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v=1 \text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie dans le cas $T=290^\circ$.

Le tableau 2.6 donne les coefficients de Lankford et le coefficient de Lankford moyen.

r_0	r_{45}	r_{90}	r
0.16	0.70	0.97	0.64

Tableau 2.6 – Les coefficients de Lankford pour une vitesse de chargement $v=1 \text{ mm/min}$ à $T=290^\circ$.

Les figures 2.25 et 2.26 montrent la variation de la limite de traction et de l'allongement à la rupture, respectivement, selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage 0° , 45° et 90° . La limite de traction reste inchangé pour les directions 0° et 45° , mais elle enregistre une augmentation pour la directions 90° , par contre l'allongement à la rupture est dépendant de la direction de laminage.

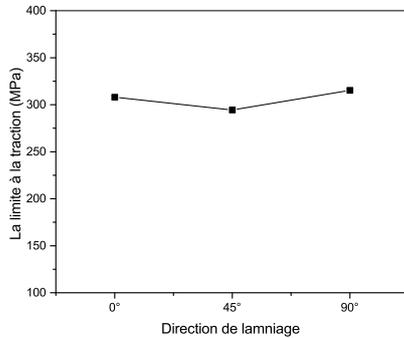


Figure 2.25 – Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie pour $v=1\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$.

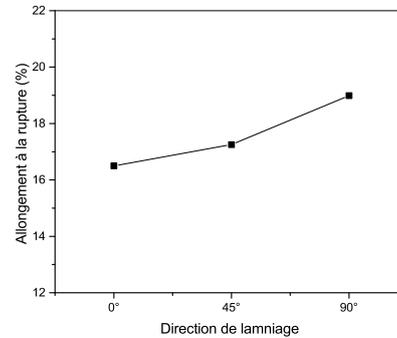


Figure 2.26 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie pour $v=1\text{mm/min}$ à $T=290^\circ$.

2.5.2 Traction avec une vitesse de chargement $v=10\text{ mm/s}$ à $T=290^\circ$

La figure 2.27 illustre les courbes contrainte-déformation obtenues avec une vitesse de chargement $v=1\text{mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage 0° , 45° et 90° , dans le cas d'une température $T=290^\circ$. Une anisotropie est enregistrés sur le comportement mécanique de matériau d'étude.

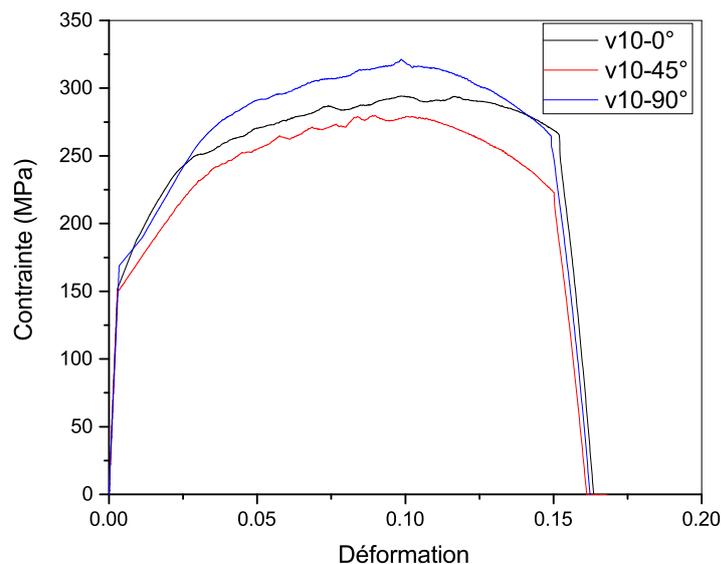


Figure 2.27 – Courbes contrainte-déformation pour une vitesse de $v=10\text{ mm/min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage à $T=290^\circ$.

La figure 2.28 présente une comparaison entre les éprouvettes de traction avant et après déformation à $v = 1\text{mm}/\text{min}$ selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° , à une température $T=290^\circ$. La rupture de l'éprouvette est enregistrée en milieu avec un angle de 45° .



Figure 2.28 – Les éprouvettes avant et après déformation pour une vitesse de $v = 10 \text{ mm}/\text{min}$ selon les trois directions de laminage à $T=290^\circ$.

Le tableau 2.7 donne les coefficients de Lankford et le coefficient de Lankford moyen.

r_0	r_{45}	r_{90}	r
0.52	1.0694	0.98	0.63

Tableau 2.7 – Les coefficients de Lankford pour une vitesse de $v = 10 \text{ mm}/\text{min}$ à une température $T=290^\circ$.

Les figures 2.29 et 2.30 montrent la variation de la limite de traction et de l'allongement à la rupture, respectivement, en fonction des trois directions de laminage. La limite de traction reste inchangée pour les directions 0° et 45° , mais elle enregistre une augmentation pour la directions 90° , par contre l'allongement à la rupture est dépendant de la direction de laminage.

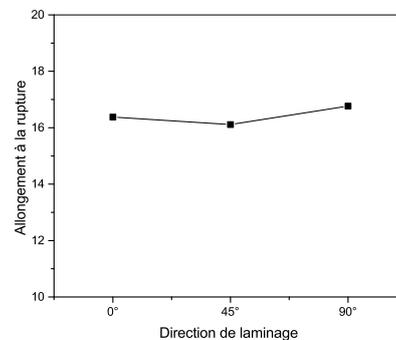
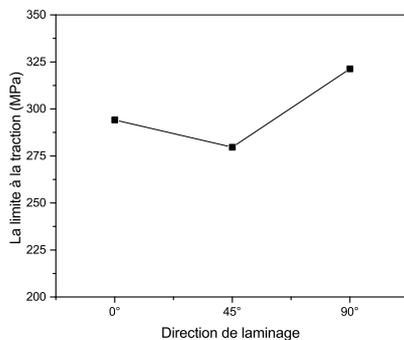


Figure 2.29 – Variation de la limite en traction selon les trois directions d'orthotropie pour une vitesse $v=10\text{mm}/\text{min}$ à $T=290^\circ$.

Figure 2.30 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie pour $v=10\text{mm}/\text{min}$ à $T=290^\circ$.

2.5.3 Etude comparative des vitesses

La figure 2.31 illustre une comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° . Nous constatons que l'endommagement est dépendant de vitesse de déformation et direction de laminage.

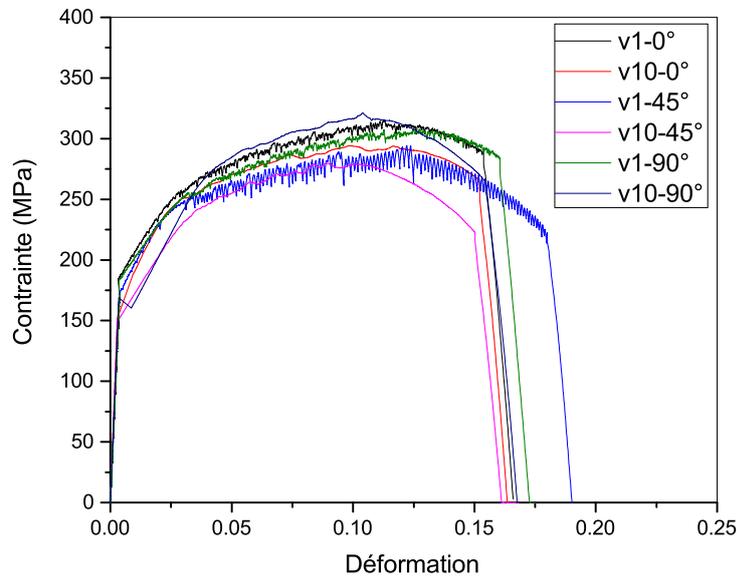


Figure 2.31 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min selon les trois directions d'orthotropie à $T=290^\circ$.

La figure 2.32 évoque la variation de la limite à la traction par rapport à la direction de laminage pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min. La vitesse de déformation et les directions d'orthotropie ont une légère influence sur la limite de traction.

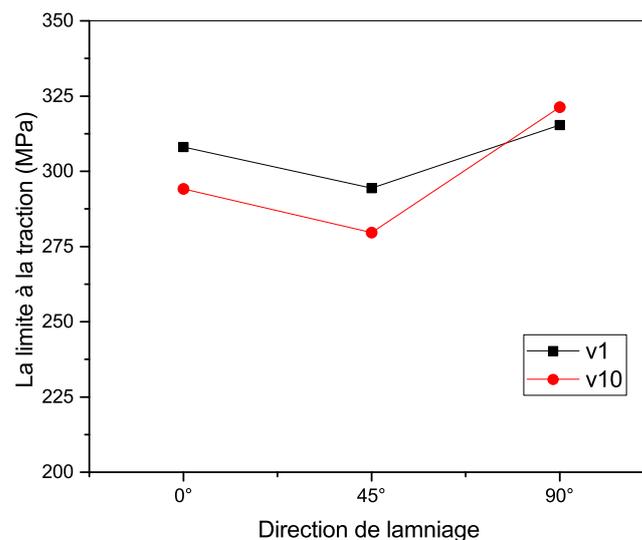


Figure 2.32 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie par rapport à la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° dans le cas $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min à une température $T=290^\circ$.

La figure 2.33 présente la variation de l'allongement à la rupture par rapport à la direction de laminage pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min. Nous observons que la vitesse de déformation et la direction de laminage influencent la valeur de l'allongement à la rupture.

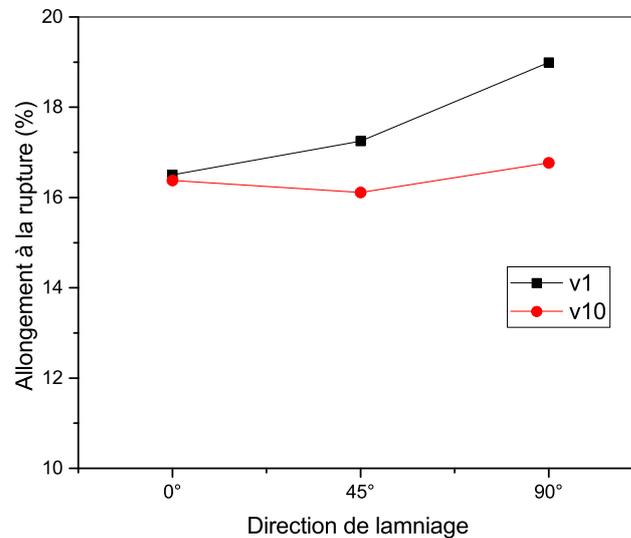


Figure 2.33 – Variation de la limite à la traction en fonction des trois directions d'orthotropie dans le cas $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min à $T=290^\circ$.

2.6 Etude comparative

Les figures 2.34 et 2.35 présentent une étude comparative entre les courbes contrainte déformation pour différentes vitesses et températures selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90° .

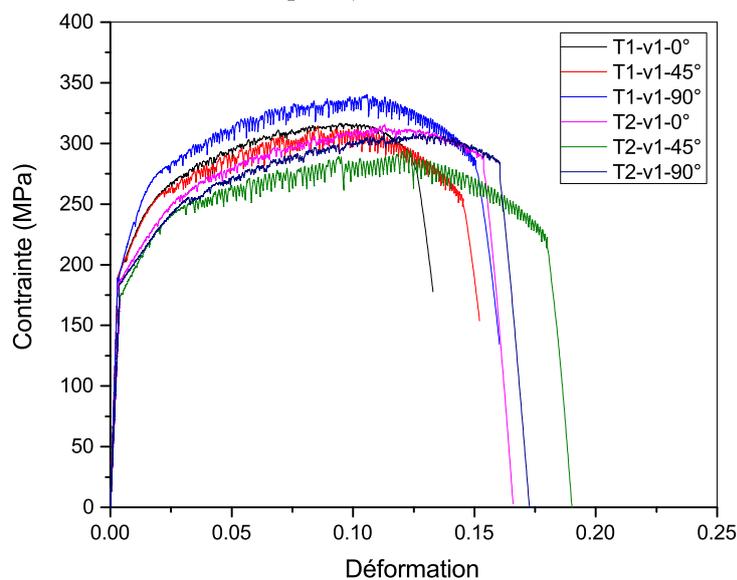


Figure 2.34 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation à différentes températures et selon les trois directions d'orthotropie pour une vitesse de chargement $v=1$ mm/min.

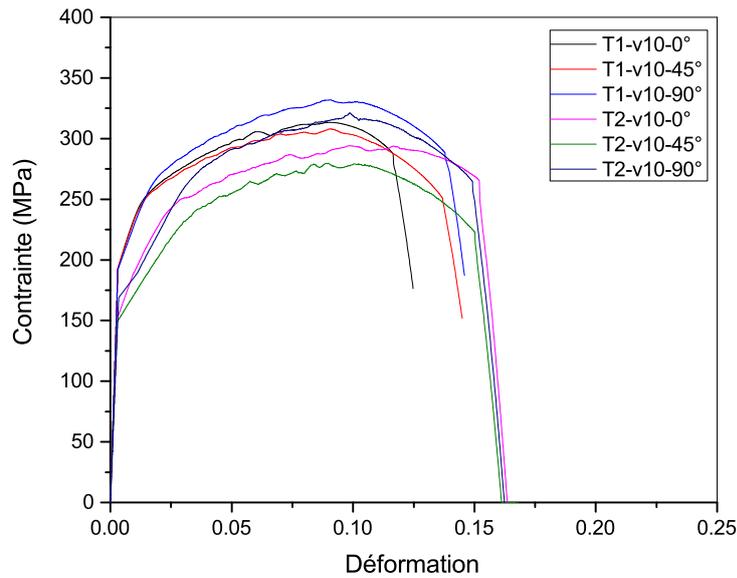


Figure 2.35 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation à différentes températures et selon les trois directions d’orthotropie pour une vitesse de chargement $v=10\text{mm/min}$.

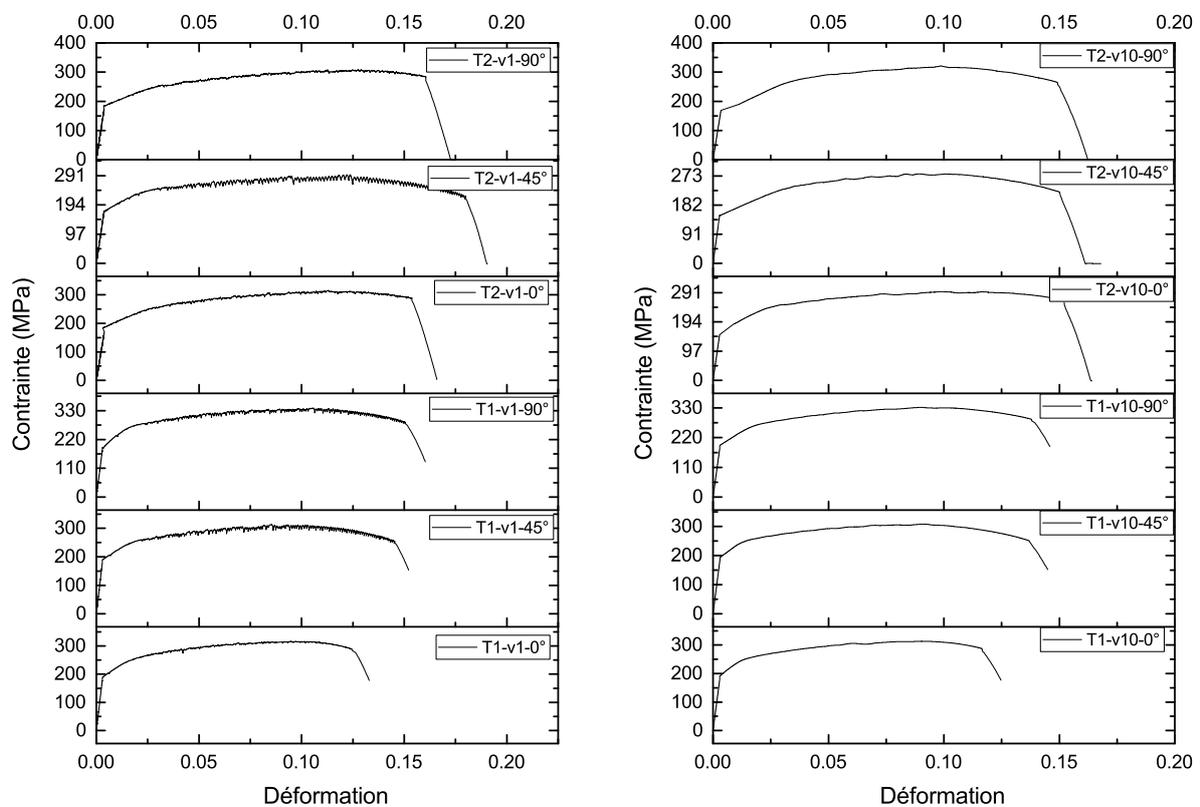


Figure 2.36 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation à différent température et selon les trois directions d’orthotropie par rapport a la direction de laminage, pour les vitesse de chargement $v=1\text{mm/min}$ et $v=10\text{ mm/min}$.

Les figures 2.37 et 2.38 montrent, respectivement, une étude comparative entre les courbes la limite à la traction et allongement à la rupture différentes vitesses et températures selon les trois directions d'orthotropie par rapport a la direction de laminage $0^\circ, 45^\circ$ et 90°

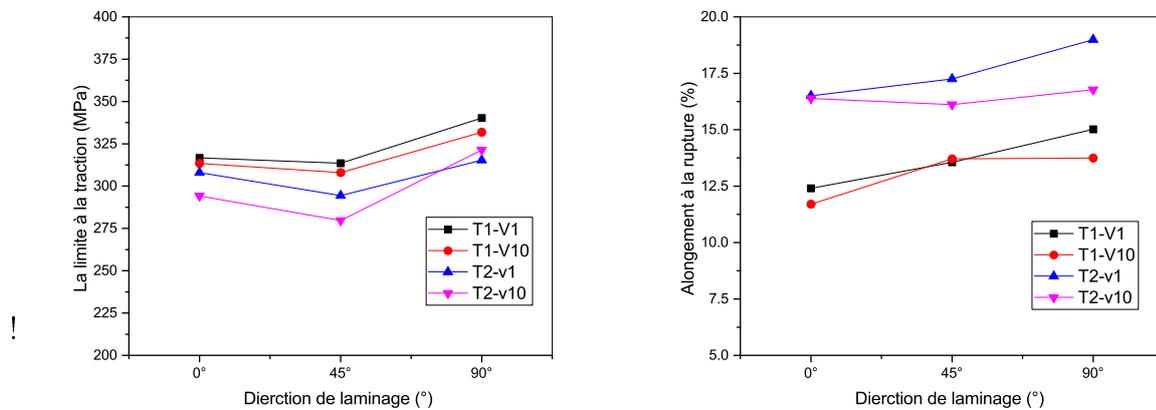


Figure 2.37 – Variation de la limite de traction selon les trois directions d'orthotropie pour les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min à température ambiante et $T=290^\circ$.
 Figure 2.38 – Variation de l'allongement à la rupture selon les trois directions d'orthotropie les vitesses $v=1$ mm/min et $v=10$ mm/min à température ambiante et $T=290^\circ$.

2.7 Conclusion

Cette étude expérimentale présentée dans ce chapitre, nous a permis d'étudier l'influence de l'anisotropie, la vitesse de déformation et la température sur le comportement mécanique d'une tôle en aluminium (série 5045). Les essais réalisés nous permet de conclure que :

- La vitesse de déformation a un effet sur la zone d'endommagement de comportement mécanique du matériau étudié.
- La température a pour effet de diminuer la limite à la traction accompagner d'une augmentation de l'allongement à la rupture.
- L'anisotropie influence le comportement de la tôle.

Chapitre 3

Simulation numérique

3.1 Introduction

Ce dernier chapitre de notre travail est consacré à la simulation numérique de comportement mécanique d'une tôle en alliages d'aluminium sous chargement thermomécanique. Nous avons présenté en premier lieu, un brève aperçu sur le logiciel de calcul par éléments finis Abaqus, ainsi que les modèles numériques utilisées. En deuxième lieu, nous avons réalisée des simulation numériques de traction à différentes vitesses de chargement et températures.

3.2 Généralités sur le code de calcul par éléments finis Abaqus

ABAQUS est un progiciel de calcul par éléments finis développé par Dassault Systèmes. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE.

- **ABAQUS/Standard** : est un solveur généraliste qui recourt à un schéma traditionnel d'intégration implicite.
- **Le solveur ABAQUS/Explicit** : emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi statiques non linéaires.
- **•ABAQUS/CAE** : constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications.

Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La gestion de l'interface graphique est assurée par FOX Toolkit. ABAQUS

est très largement utilisé dans les industries automobiles et aéronautiques. En raison du large spectre de ses capacités d'analyse et de sa bonne ergonomie, il est également très populaire dans les milieux universitaires, pour la recherche et l'éducation.

3.2.1 Description de l'interface ABAQUS CAE

On retrouve dans l'interface Abaqus CAE les éléments essentiels suivant :

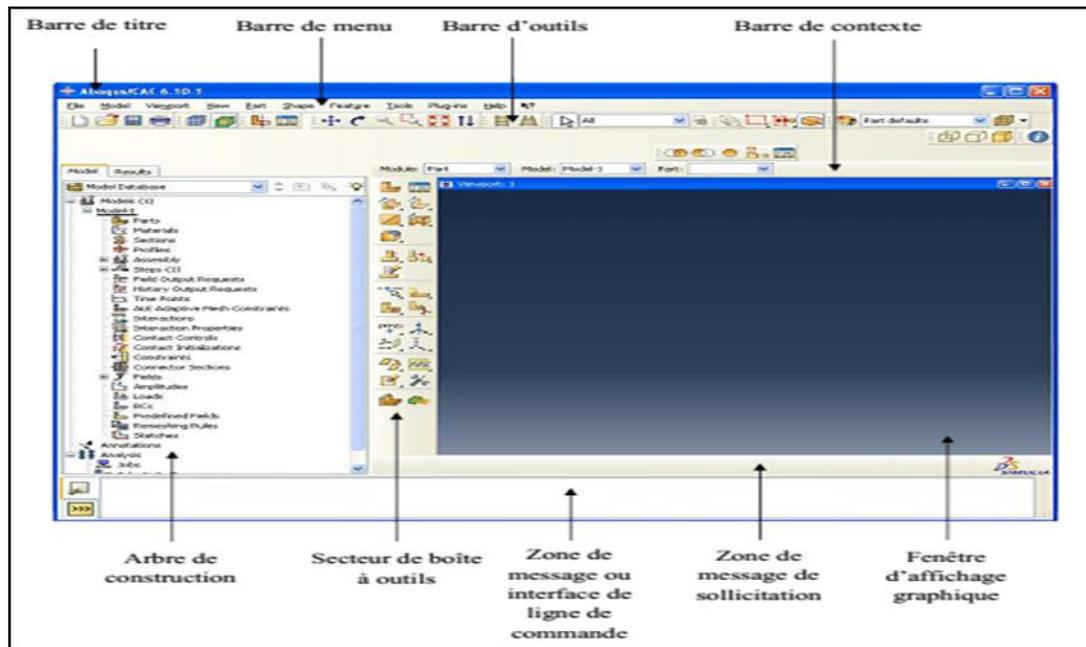


Figure 3.1 – L'interface Abaqus.

- **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** : disposées les icônes correspondantes 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** : 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).

3.2.2 Les principaux Modules d'Abaqus

- **Module Part** : C'est dans ce module qu'est définie la géométrie des entités du modèle. Elles comprennent à la fois les parties déformables et les parties rigides.
- **Module Property** : définit les propriétés des matériaux (des parties déformables du modèle) et la masse des corps rigides si nécessaire.
- **Module Assembly** : , il s'agit de créer une (voire plusieurs) instance(s) à partir des entités que vous avez définies dans le module Part.
- **Module Step** : Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement.
- **Module Interaction** : on définit les interactions entre différentes entités du modèle, ce qui peut prendre la forme d'un contact ou d'équations de liaison entre degrés de liberté.
- **Module Load** : Vous définirez ici le chargement , les conditions limites et les vitesses initiales...etc.
- **Module « Mesh »** : Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.
- **Module Job Le « lancement »** : Lancement des calculs.
- **Module « Visualization »** : Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...etc
- **Module « Sketch »** : Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet.

3.2.3 Les systèmes d'unités

Comme dans beaucoup de logiciels, il n'y a pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système. Généralement, nous utilisons l'un des systèmes suivants :

Quantity	SI	SI(mm)	SI
Length	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>
Force	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>kN</i>
Mass	<i>kg</i>	<i>tonne (10³kg)</i>	<i>tonne</i>
Time	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>s</i>
Stress	<i>Pa (N/m²)</i>	<i>MPa (N/mm²)</i>	<i>kPa</i>
Energy	<i>J</i>	<i>mJ (10⁻³J)</i>	<i>KJ</i>
Density	<i>kg/m³</i>	<i>tonne/mm³</i>	<i>tonne/m³</i>

Tableau 3.1 – Systèmes d'unités.

3.2.4 Phases de mises en données

Pour les applications courantes, on peut distinguer 4 phases dans la mise en données :

- **Phase 1** : construction géométrique et génération du maillage (nœuds, éléments);
- **Phase 2** : Propriétés des matériaux (mécanique, physique, thermique);
- **Phase 3** : Conditions aux limites;
- **Phase 4** : Étape de calcul et traitement des résultats.

3.2.5 Schéma de résolution

La méthode utilisée pour résoudre le problème mécanique; est basée sur la technique de différences finies centrées. Si la réponse du système est fortement non-linéaire, cette méthode doit être employée avec un incrément de temps variable.

3.2.5.1 Schéma Statistique Implicite

Le schéma Statistique Implicite correspond à la situation où le terme d'inertie peut être négligé.

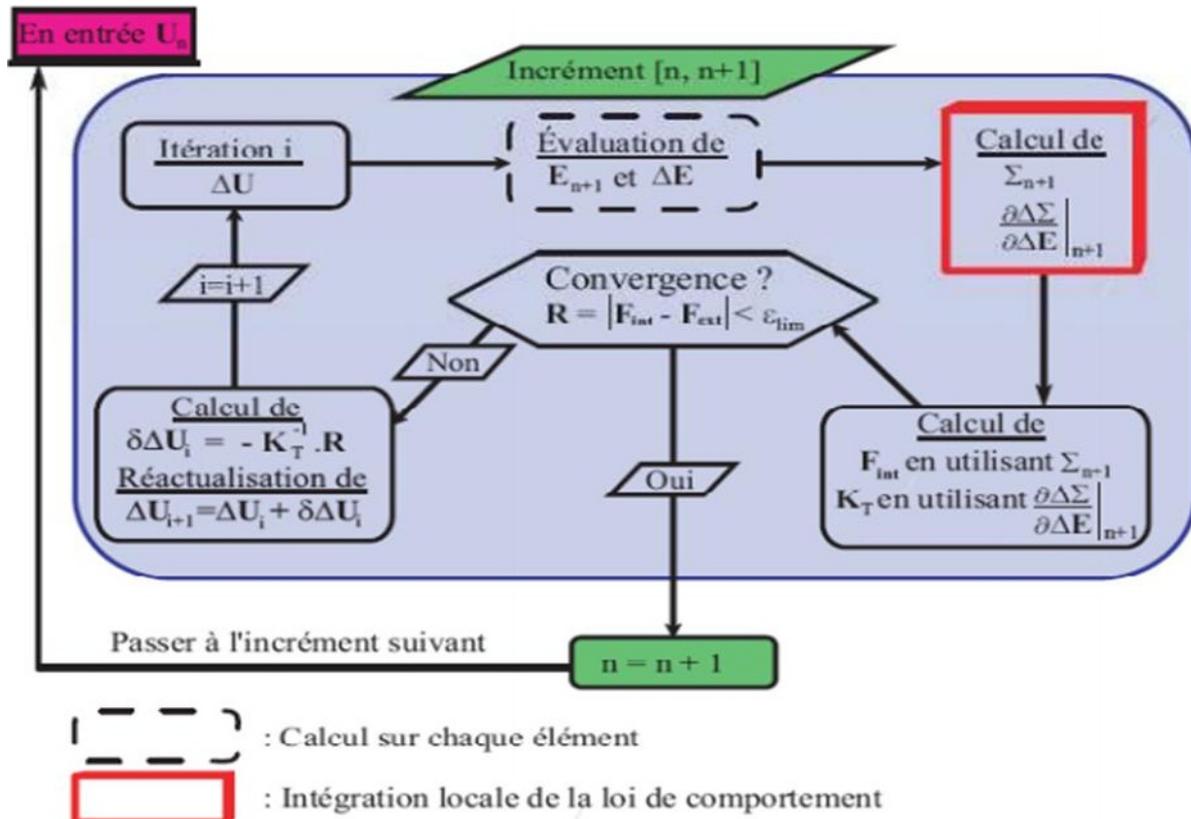


Figure 3.2 – schéma implicite

3.2.5.2 Schéma dynamique explicite

A l'opposé de la méthode implicite le schéma de résolution explicite n'est pas itératif. Il consiste en une résolution explicite de l'équation du mouvement. De plus cet algorithme ne nécessite pas le calcul de la matrice tangente qui peut s'avérer une tâche ardue pour certains modèles de comportement. Cette procédure est souvent utilisée pour les forts non-linéarités géométriques.

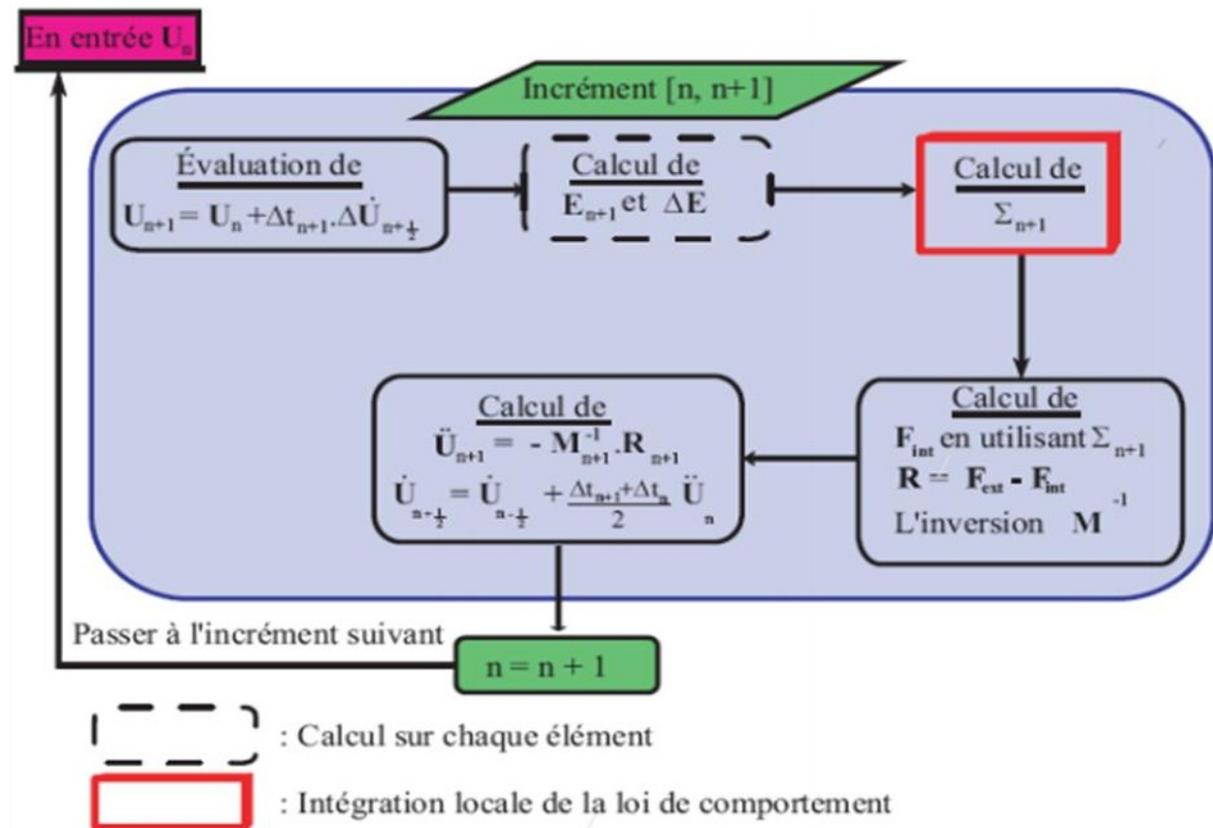


Figure 3.3 – schéma explicite

La stabilité et la précision de la résolution dépendent fortement du pas de temps Δt . Une bonne estimation est proposée dans Abaqus :

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \tag{3.1}$$

3.3 Quelques modèles numériques de comportement

3.3.1 Modèle élastique Abaqus

La contrainte dans le domaine élastique est défini par la loi de Hook généralisée :

$$\sigma = D^{el} \varepsilon^{el} \quad (3.2)$$

avec

σ : tenseur des contraintes de Cauchy ;

D^{el} : Tenseur des coefficients élasticité de quatrième ordre ;

ε^{el} : tenseur des déformations élastiques ;

3.3.2 Modèle plastique Abaqus

Ce modèle est défini par les contraintes en fonctions des déformations plastiques équivalentes. La contrainte équivalente de Von Mises s'écrit :

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2\sigma_{23}^2 + M\sigma_{31}^2 + N\sigma_{12}^2} \quad (3.3)$$

3.3.3 Le critère d'anisotropie de Hill Abaqus

La forme de ce critère (couramment utilisée sur les matériaux anisotropes tels que les résines fibrées) est justifiée par les mêmes considérations physiques et mathématiques que celles du critère de Von Misès.

Dans le repère principal d'anisotropie, ce critère se présente sous forme quadratique symétrique des composantes du tenseur des contraintes :

$$\sigma_H = F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{33} - \sigma_{22}) + H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \quad (3.4)$$

Dans cette expression, F, G, H, L, M et N sont les coefficients d'anisotropie.

$$F = \frac{\sigma_e}{2} \left(-\frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (3.5)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (3.6)$$

$$H = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (3.7)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\sigma_{23}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (3.8)$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\sigma_{13}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (3.9)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau_0}{\sigma_{12}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (3.10)$$

Avec

$$\tau_0 = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3.11)$$

3.3.4 Modèle dépendant à la vitesse de déformation

La relation de la dépendance d'écouissage avec la vitesse de déformation est donnée par la relation suivante :

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 (\bar{\varepsilon}_{pl}) R \left(\dot{\bar{\varepsilon}}_{pl} \right) \quad (3.12)$$

avec :

$\bar{\sigma}$: la contrainte équivalente ;

$\bar{\varepsilon}_{pl}$: la déformation plastique équivalente ;

$\dot{\bar{\varepsilon}}_{pl}$: la vitesse de déformation équivalente ;

Le modèle **Cowper-Symonds** est donné par la relation 24.

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{pl} = D (R - 1)^n \quad (3.13)$$

n, D, R paramètres de matériau

3.3.5 Modèle d'endommagement par cisaillement (shear damage)

Le critère "Shear damage" c'est un modèle phénoménologique qui s'appuie sur la formation de bandes de cisaillement.

$$\bar{\varepsilon}_s^{pl} \left(\theta_s, \dot{\bar{\varepsilon}}_{pl} \right) \quad (3.14)$$

tel que :

$$\theta_s = (q + k_s p) / \tau_{max} \quad (3.15)$$

3.3.6 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'une substance est définie comme la quantité de chaleur requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'un degré. Mathématiquement, cette définition physique peut s'exprimer comme suit :

$$C = \frac{\partial Q}{d\theta} = \theta \frac{ds}{d\theta} \quad (3.16)$$

3.4 Préparatif de la simulation numérique

3.4.1 Condition aux limites

La figure 3.4 présente les conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction. Un encastrement est imposées sur un coté de l'éprouvette et une vitesse de chargement est imposée sur l'autre.

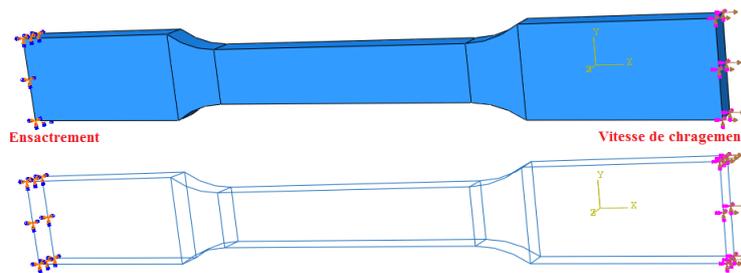


Figure 3.4 – Conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction.

La figure 3.5 montre les conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction dans le cas d'une température $T=290$. Un encastrement est imposées sur un coté de l'éprouvette, une vitesse de chargement est imposée sur l'autre et une température sur la Longueur utile de l'éprouvette.

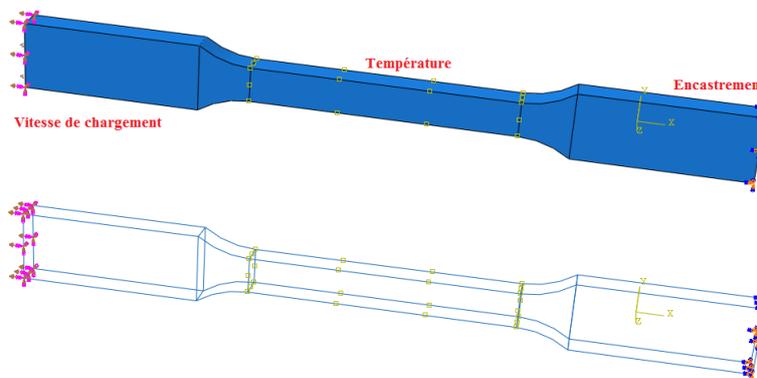


Figure 3.5 – Conditions aux limites imposées sur l'éprouvette de traction.

3.4.2 Le maillage

Les figures 3.6 et 3.7 montrent, respectivement, le maillage adopté pour notre étude dans le cas de température ambiante et température élevée . Nous avons utilisé un maillage de type C3D8R.

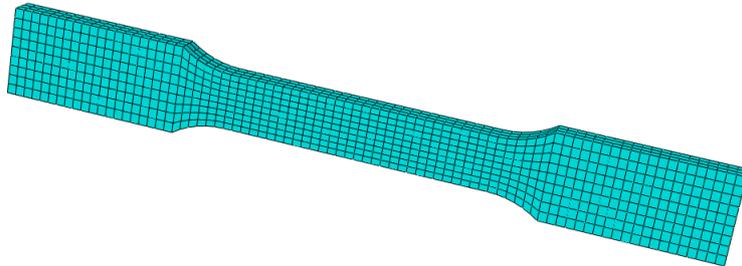


Figure 3.6 – Type de maillage choisi pour l'éprouvette de traction.

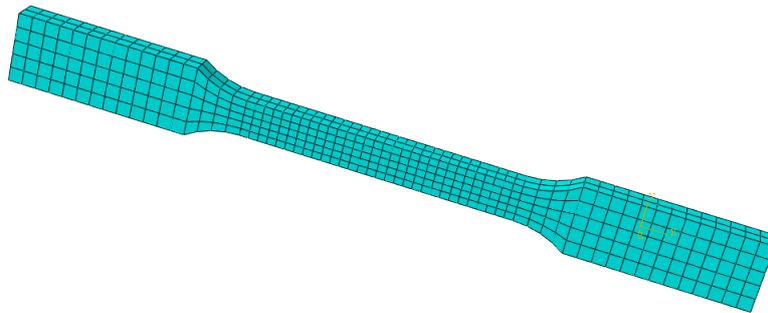
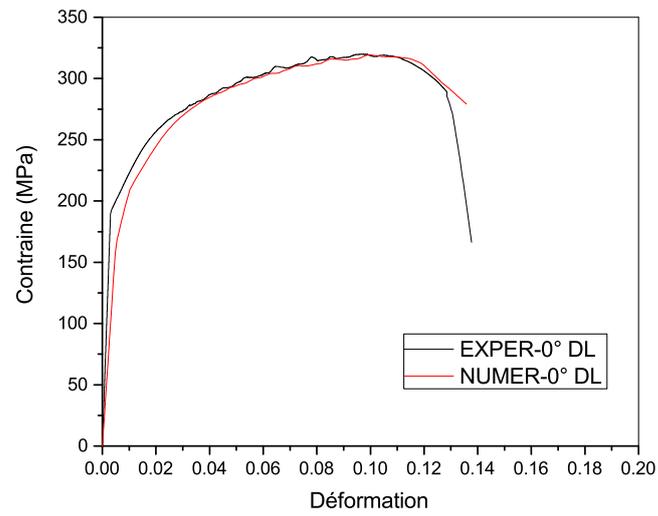


Figure 3.7 – Type de maillage choisi pour l'éprouvette de traction.

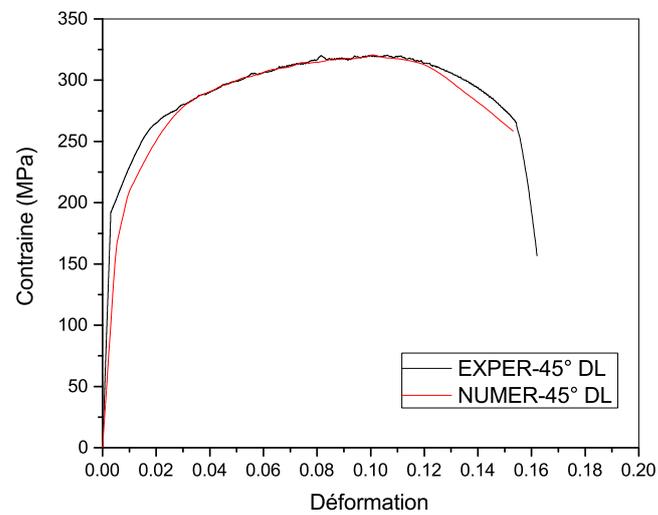
3.5 Simulation numérique

3.5.1 Traction à température ambiante

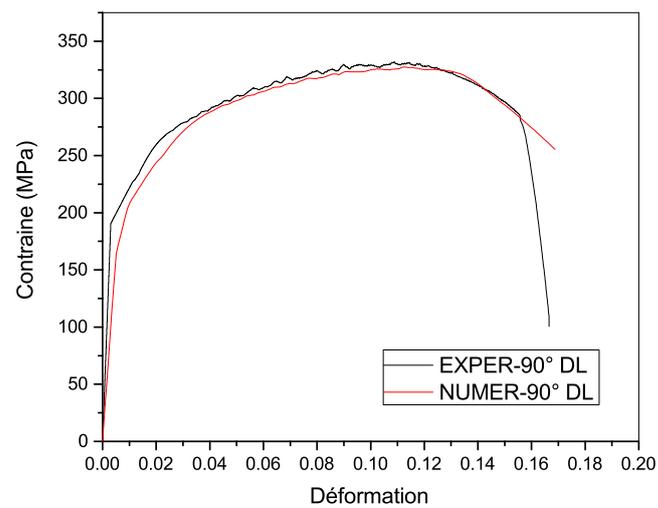
Les figure 3.8.a,b et c présentent la superposition des courbes contrainte déformation des résultats numérique et expérimentaux à température ambiante et avec une vitesse de chargement $v=10\text{mm}/\text{min}$. Cette comparaison démontre que les modèles numérique utilisés reproduit correctement le comportement de l'éprouvette de traction.



(a) 0°



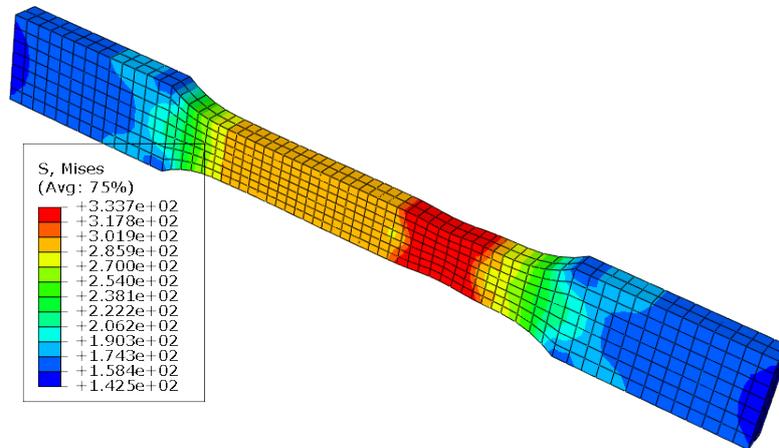
(b) 45°



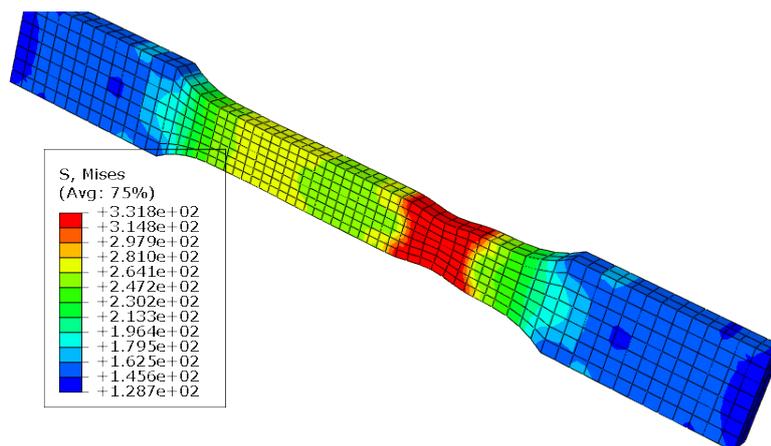
(c) 90°

Figure 3.8 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation des résultats numérique et expérimentaux pour une vitesse $v=10\text{mm/min}$.

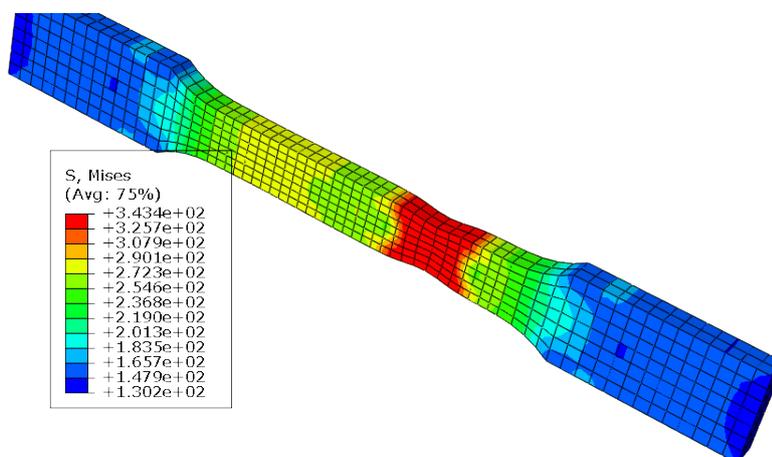
Les figures 3.9.a,b et c montrent les éprouvettes de traction après déformation obtenues par la simulation numérique selon les trois directions d'orthotropie pour une vitesse de chargement $v=10\text{mm}/\text{min}$ et à température ambiante.



(a) selon 0° DL.



(b) selon 45° DL.

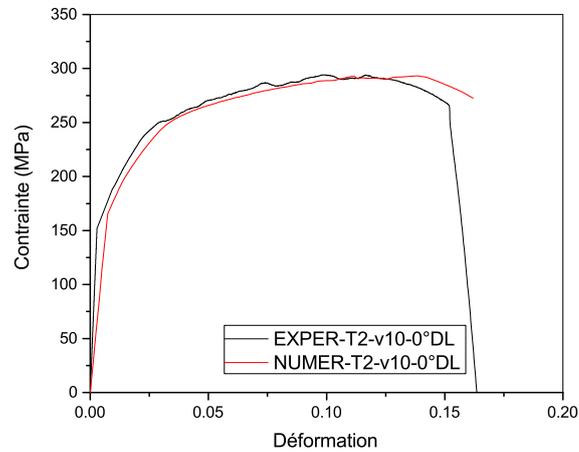


(c) selon 90° DL.

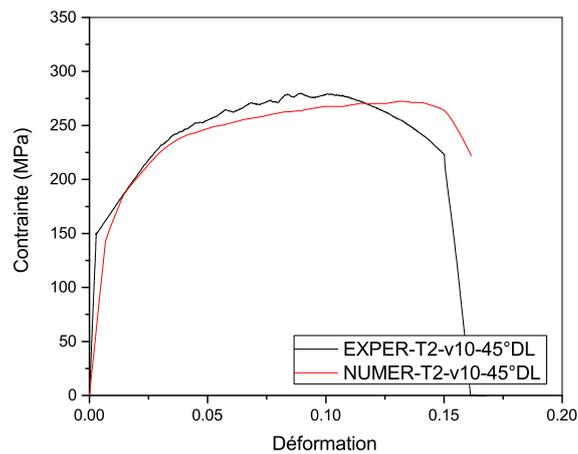
Figure 3.9 – Eprouvette de traction avant et après déformation de la simulation numérique selon la direction 0° DL.

3.5.2 Traction à température $T=290^\circ$

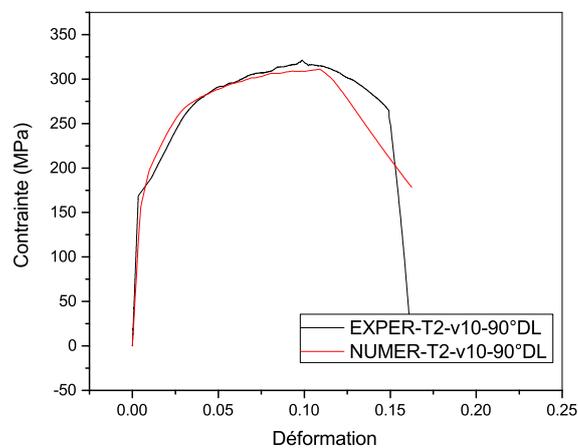
Les figures 3.10.a,b et c présentent la comparaison des courbes contrainte déformation des résultats numérique et expérimentaux.



(a) 0° DL



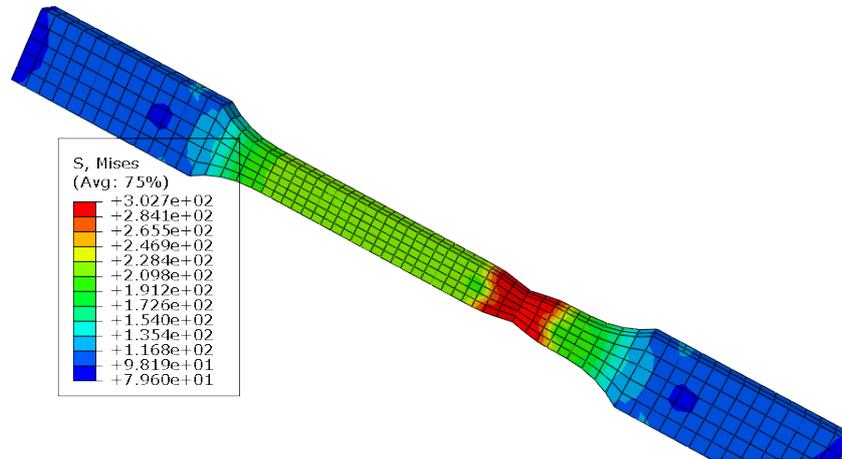
(b) 45° DL



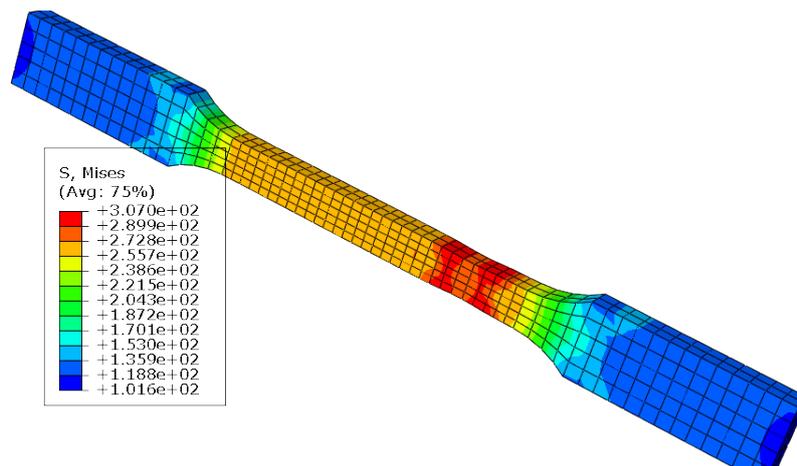
(c) 90° DL

Figure 3.10 – Comparaison entre les courbes contrainte-déformation des résultats numérique et expérimentaux pour une vitesse $v=10\text{mm/min}$.

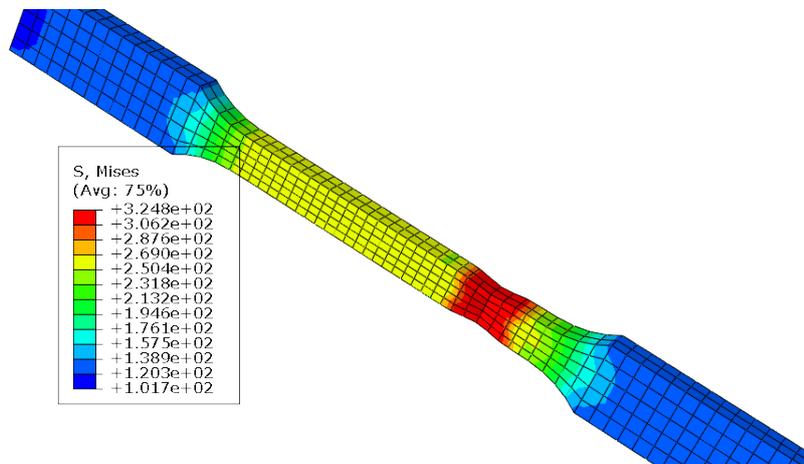
Les figures 3.11.a,b et c illustrent les éprouvettes de traction après déformation obtenues par la simulation numérique selon les trois directions orthotropie pour une vitesse de déformation $v=10\text{mm}/\text{min}$ et une température $T=290^\circ$.



(a) selon 0° DL.



(b) selon 45° DL.



(c) selon 90° DL.

Figure 3.11 – Eprouvette de traction après déformation de la simulation numérique pour une vitesse $v=10\text{mm}/\text{min}$.

3.6 Conclusion

Les simulations numériques ,des essais de traction à différentes vitesses et températures ; réalisées avec le code de calcul par éléments finis Abaqus, nous permettent de constater que les modèles numériques utilisés reproduisent correctement le comportement mécanique de matériau d'étude.

Conclusion générale

Notre travail porte sur l'étude expérimentale et la simulation numérique du comportement mécanique d'un alliages d'aluminium (série 5045) sous chargement thermomécanique. Ce travail a été abordé selon trois aspects : une étude bibliographique, une étude expérimentale et une simulation numérique de comportement mécanique de l'alliage d'aluminium avec le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS.

L'étude bibliographique nous a révélé les diverses caractéristiques de l'aluminium et ses alliages tel que : sa durabilité, sa conductivité, sa légèreté, sa résistance à la corrosion et recyclabilité...etc. Les alliages d'aluminium sont des matériaux fiables, sûr et économiques, qui peuvent répondre aux nouvelles exigences de performance et de protection de l'environnement. Parmi ses avantages, on peut citer le gain de poids, la résistance à la corrosion et la sécurité accrue. Les techniques d'analyses mécaniques et structurales sont utilisées pour évaluer les propriétés structurales, mécaniques et chimiques des alliages aluminium.

Nous avons constaté que :

- Le comportement mécanique de matériau étudié est indépendant de la vitesse de déformation dans la gamme des vitesses choisies.
- La température engendre une augmentation de l'allongement à la rupture et une diminution de la limite à la traction pour les températures étudiées.
- La simulation numérique réalisée sur le logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS montre une bonne cohérence entre les résultats numériques et expérimentaux.

En guise de perspectives nous proposons d'étudier le comportement mécanique de cette tôle en régime mécanique et a des températures plus élevées.

Bibliographie

- [1] *Developments in hydroforming*, number 236-244, 1999.
- [2] Tekkaya A.E. Banabic .D Bunge H.J, Pöhlandt .K. *Formability of metallic materials*, springer edition, 2000.
- [3] C.Vargel. corrosion de l'aluminium. page 501, 1999.
- [4] Elena DIN-STIRBU. *Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobiles pour la fabrication de radiateur de chauffage*. PhD thesis, Université de Pitesti Roumanie, 2005.
- [5] American Society for Metals. *Aluminum*, design and application edition, 1967.
- [6] C. Jarbouï. Equipements sous pression - procédés et technologie du formage. *Technique de l'ingénieur*, BM 6560, 2004.
- [7] R. Martin. Formage a la presse travail des métaux en feuilles. *Tehcnique de l'ingénieur*, B7510-4, 1995.
- [8] P.Meyer M.C.Reboul. intergranular and exfoliation corrosion study of al-li-cu- mg-zr,alloys. In journal de physique, editor, *colloque C3*, volume 48, pages 881–888, 1987.
- [9] International Journal of Mechanical Sciences, editor. *Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process*, volume 42, 2000.
- [10] S.Payan. *Comportement à la corrosion galvanique de matériaux composites à matrice d'alliages d'aluminium renforcée par des fibres en carbone haute module*. PhD thesis, science chimique Université de Bordeaux, 2001.
- [11] B. Grzegorzcyk W. Ozgowicz. Analysis of the portevin -le chatelier effect in tin bronzes at elevated temperatures. *Achievements in Materials 2 and Manufacturing Engineering*, 31 :281–289, 2008.
- [12] W.S.Miller, L.Zhuang, J.Bottima, A.J.Witterbrood, P De Smet, A.Haszler, and A.Viergege. Recent developpement in aluminium alloys for the automotive industry. *Materials science and engeniring*, 280 :37–49, 2000.

Annexe A

Les Modèles numériques

Modèle élastique Abaqus

Input File Usage : *ELASTIC

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→Mechanical Elasticity

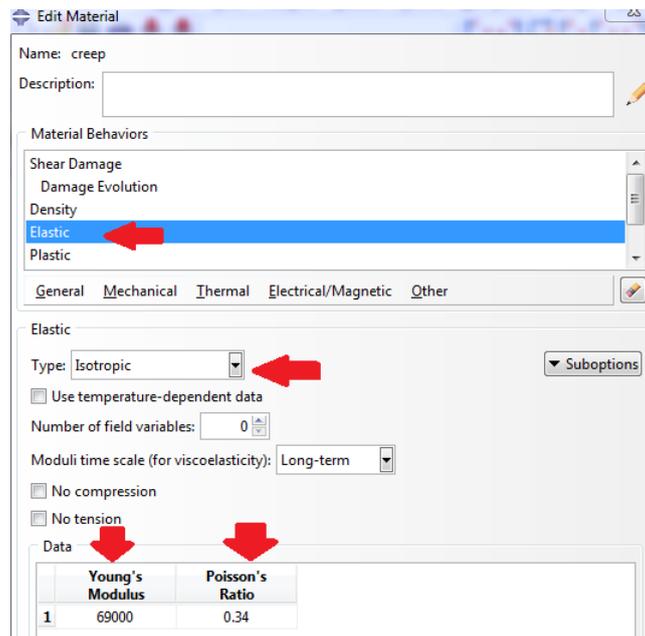


Figure A.1 – interfaces material elastic

Modèle plastique Abaqus

Input File Usage : *PLASTIC

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→Mechanical Plasticity
→Plastic

Input File Usage : *PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→Mechanical Plasticity Plastic→ Hardening→Isotropic

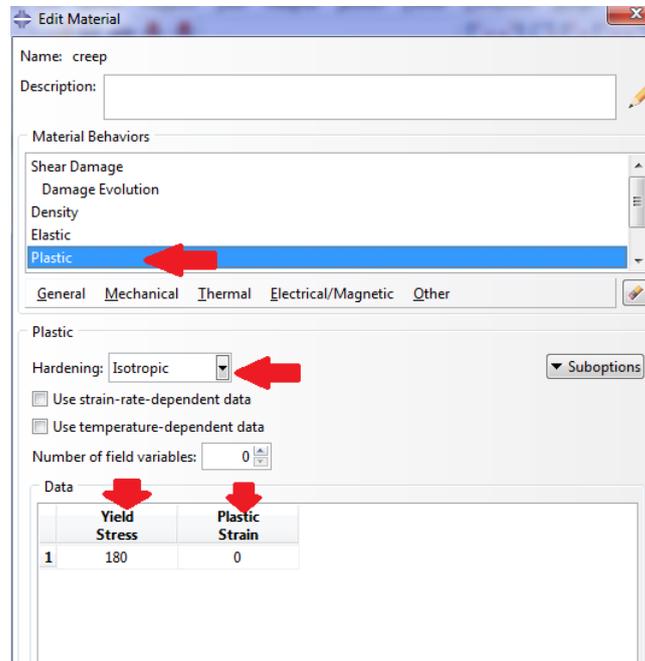


Figure A.2 – Modèle plastique sur Abaqus.

Le critère d’anisotropie de Hill Abaqus

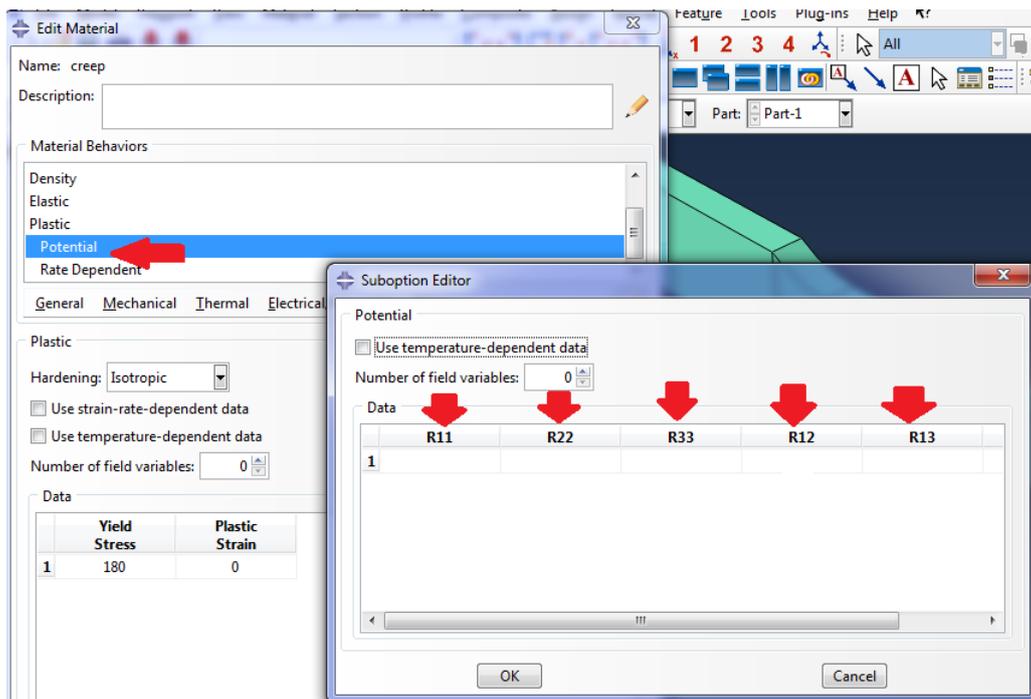


Figure A.3 – Critère Hill Abaqus.

Modèle dépendant de la vitesse de déformation

Input File Usage : *RATE DEPENDENT, TYPE=POWER LAW

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→Mechanical Plasticity Plastic : Suboptions→Rate Dependent→Hardening→Power Law

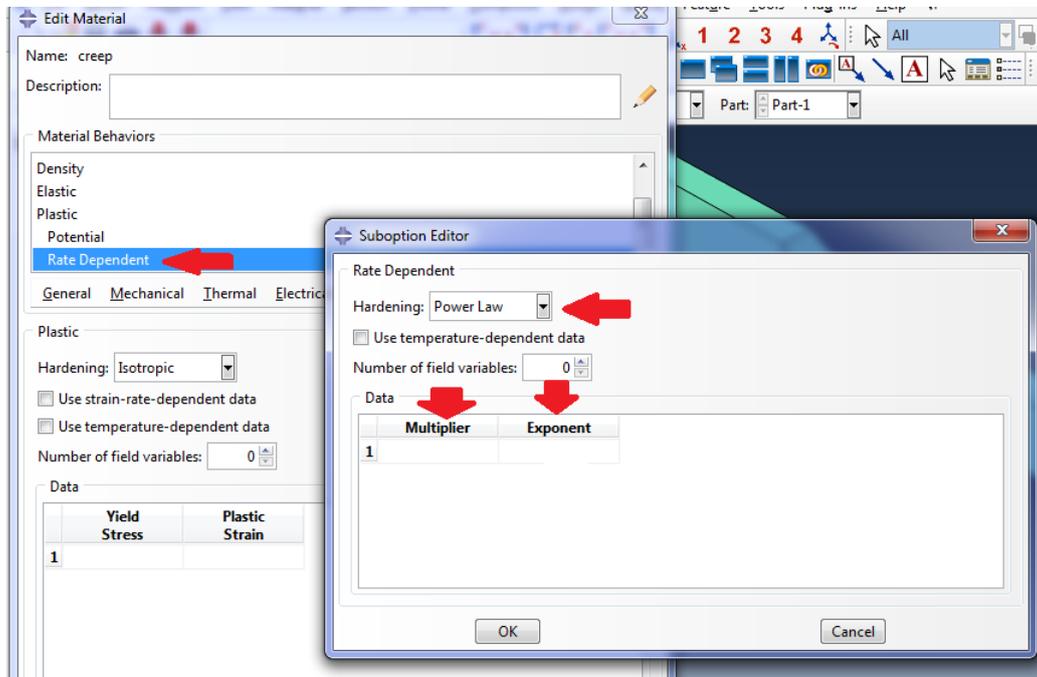


Figure A.4 – Yield stress ratios

Modèle d'endommagement par cisaillement (shear damage)

Input File Usage : *DAMAGE INITIATION, CRITERION=SHEAR, KS= , DEPENDENCIES=n

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→Mechanical Damage for Ductile Metals→ Shear Damage

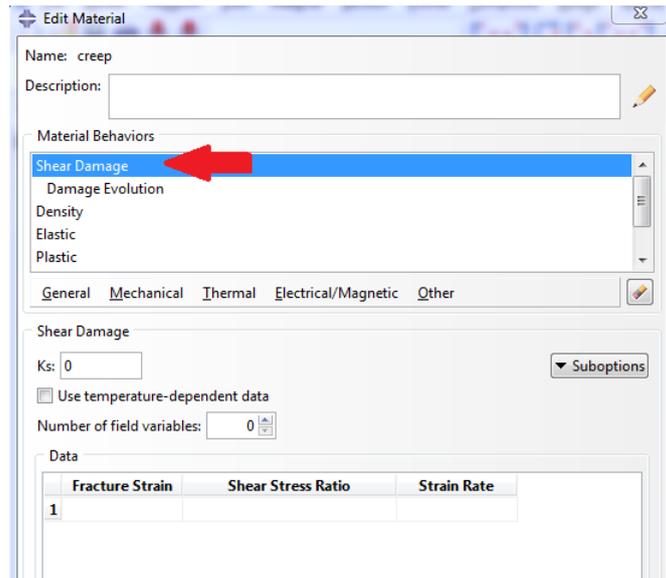


Figure A.5 – shear damage

Input File Usage : *PLASTIC *DAMAGE INITIATION *DAMAGE EVOLUTION

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→Mechanical Damage for Ductile Metals→Suboptions→Damage Evolution→Damage evolution

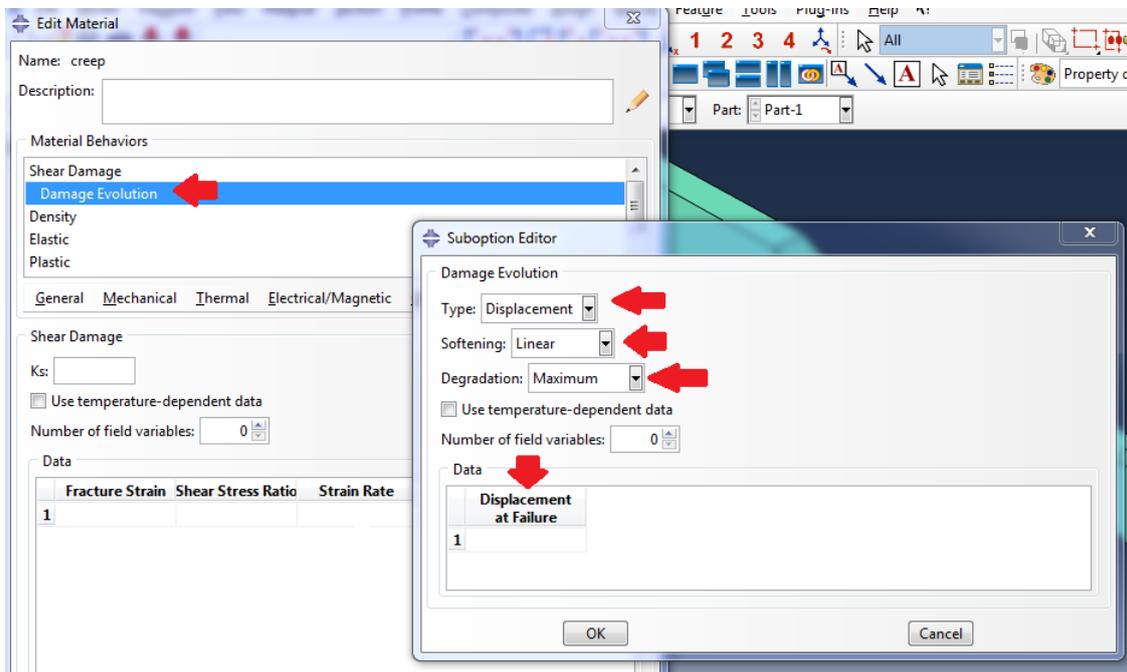


Figure A.6 – Évolution shear damage.

En cas de l effet de température

— Conductivity

Input File Usage : *CONDUCTIVITY, TYPE=ISO

Abaqus/CAE Usage : Property module→material editor→**Thermal Conductivity**
→**Type**→**Isotropic**

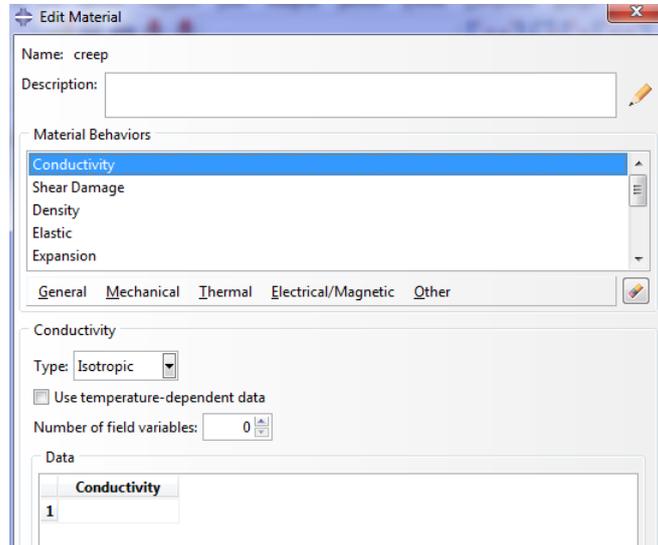


Figure A.7 – Conductivity

— **Expansion**

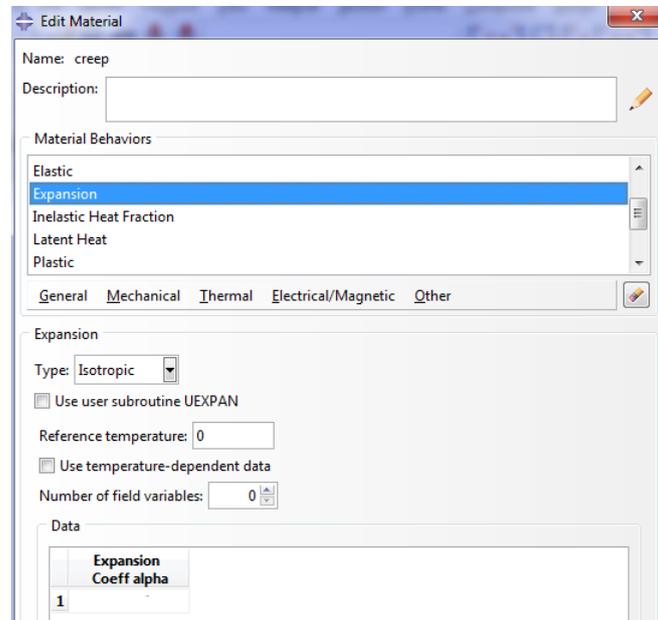


Figure A.8 – Expansion

— **Inelastic heat fraction**

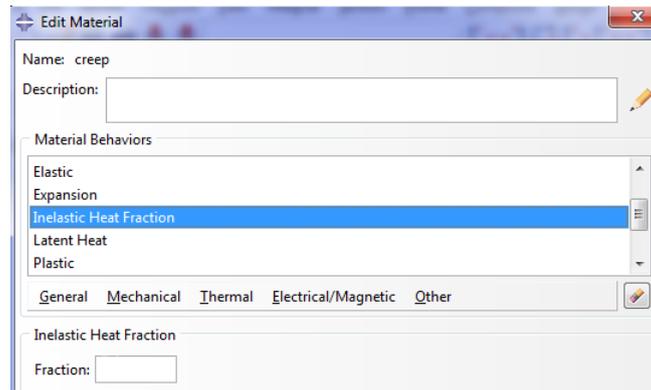


Figure A.9 – Inelastic heat fraction.

— Latent heat

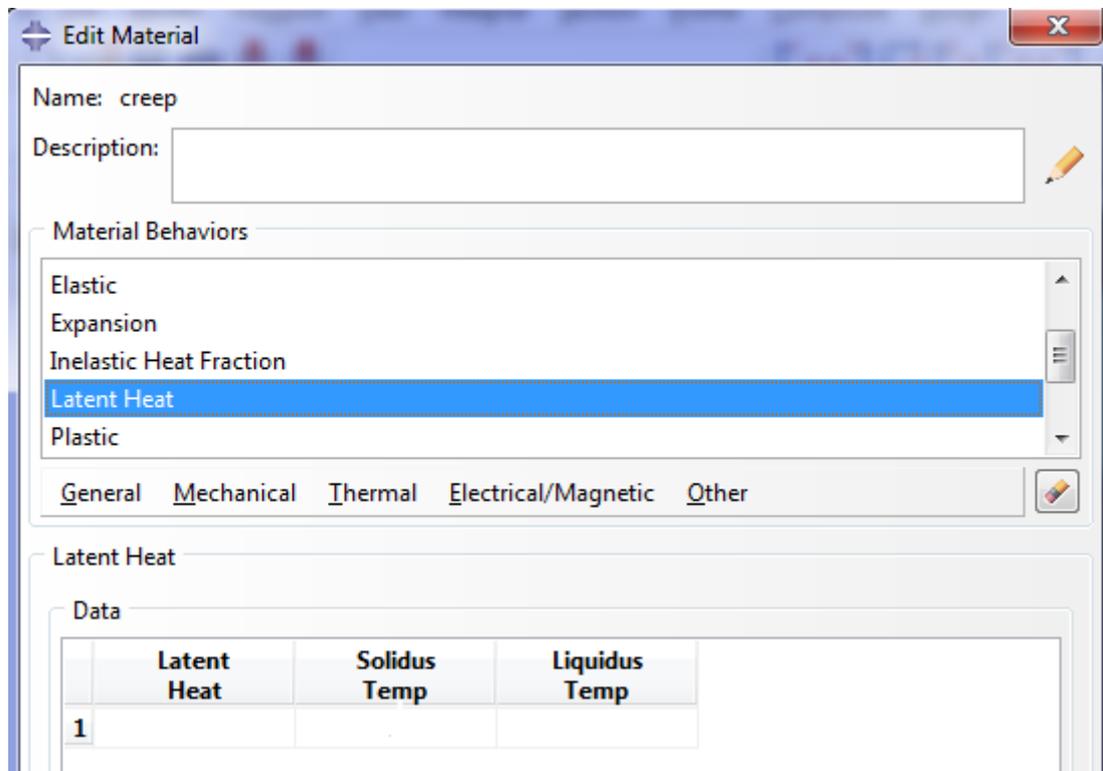


Figure A.10 – Latent heat

— Spécifique heat

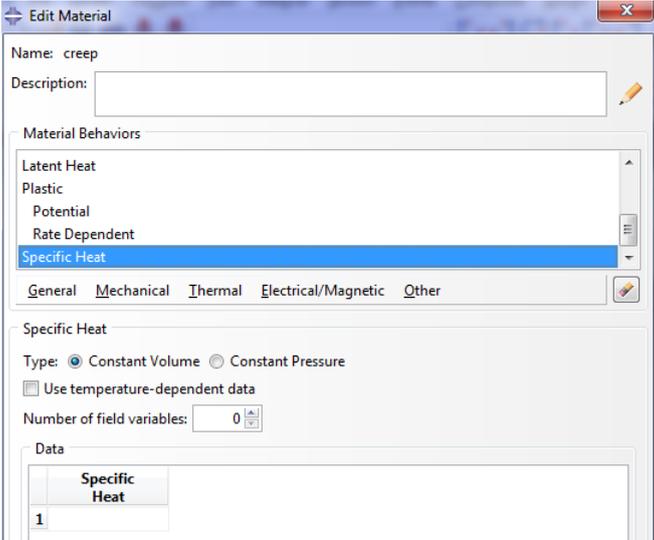


Figure A.11 – Specific heat