

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de
Master en Génie matériaux

Ingénierie des matériaux et des
surfaces

***Simulation du comportement mécanique d'un
acier inoxydable 304L***

Réalisé par :

Bouabdallah Marouane
Ould Amar Sidahmed

Proposé et encadré par :

Mme. Sidhoum Zehra

Année universitaire 2020/2021

Remerciement :

Mes remerciements à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée toujours.

Je tiens à remercier chaleureusement mon promoteur : Docteur Sidhoum Zehra d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir prodigué des conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.

Des remerciements aux membres du jury, pour l'intérêt et d'avoir accepté de juger ce travail.

A l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation ainsi que tout le personnel administratif qui, a participé au bon déroulement de ce travail, les enseignants du département de génie mécanique. Pour sa disponibilité, sa patience et ses conseils qu'ils ont prodigué.

Mes remerciements vont aussi à tous mes parents, mes enseignants, mes amis et mes collègues de la promotion 2021.

A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié.

Sommaire

Résumé.....	1
Liste des figures.....	2
LISTE DES TABLEAU	3
INTRODUCTION GENERALE.....	4
Chapitre I	5
I.1. Introduction	6
I.2. Composition et structure	6
I.3. Systèmes Fe-Cr et Fe-Cr-Ni.....	9
I.4. Les caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables.....	10
I.5. Modes de solidification des aciers inoxydables.....	11
I.6. Domaines d'utilisation des aciers inoxydables :.....	12
I.7. Les principales familles d'aciers inoxydables :	14
<input type="checkbox"/> Les aciers inoxydables ferritiques.....	14
<input type="checkbox"/> Les aciers inoxydables martensitiques :.....	15
<input type="checkbox"/> Les aciers inoxydables austénitiques :	16
<input type="checkbox"/> Les aciers inoxydables austéno-ferritique :.....	18
I.8. Modélisation du comportement mécanique des aciers inoxidables	18
Chapitre II.....	Erreur ! Signet non défini.
II.1.Introduction.....	25
II.2.Présentation du métal de l'étude.....	25
II.3.Caractérisation de l'acier 304L.....	28
II.3.1.Caractérisation microstructurale	28
II.3.2.Caractérisation mécanique	31
II.4.Résultat de l'essai de traction	32

Chapitre III.....	33
III.1 Introduction.....	34
III.2 Présentation du logiciel ABAQUS :.....	34
1. Définition :.....	34
2. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS.....	35
3. Applications.....	36
4. Les éléments utilisés par ABAQUS.....	36
5. Présentation des différents types d'éléments Abaqus:.....	37
6. Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS	37
7. Structure d'une analyse sous Abaqus:	38
8. Présentation du logiciel ABAQUS /CAE:	39
III.3 Simulation du comportement mécanique en traction de l'acier 304L	41
III.4 Résultats et discussions	45
Conclusion générale.....	50
Références.....	51

Résumé :

Ce travail avait pour objectif de la simulation du comportement mécanique des aciers inoxydables austénitiques de type 304L. Les simulations du problème sont faites à l'aide du logiciel Abaqus 6.14, Pour la validation des résultats numérique nous les avons comparés avec les résultats expérimentaux

Abstract :

The objective of this work was to simulate the mechanical behavior of austenitic stainless steels type 304L. The simulations of the problem are made using the Abaqus 6.14 software, for the validation of the numerical results we compared them with the experimental results.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو محاكاة السلوك الميكانيكي للفولاذ الأوستنيتي المقاوم للصدأ نوع 304L، تمت محاكاة المشكلة باستخدام برنامج abaqus 6.14، للتحقق من صحة النتائج العددية قمنا بمقارنتها مع النتائج التجريبية.

Liste des figures

Chapitre I :

- Figure I-1 :** Diagramme d'équilibre binaire Fe-Cr9
- Figure I-2 :** Structure d'un acier inoxydable austénitique17

Chapitre II :

- Figure II-1 :** Microstructure de l'acier 304L29
- Figure II-2 :** Spectre de diffraction de l'acier 304L30
- Figure II-3 :** Éprouvette de traction31
- Figure II-4 :** Courbe de traction conventionnelle de l'éprouvette à 25°C 32

Chapitre III :

- Figure III-1 :** Interface de code d'ABAQUS35
- Figure III-2 :** Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque
d'Abaqus.....37
- Figure III-3 :** structure d'analyse sur ABAQUS39
- Figure III-4 :** Modèle tridimensionnelle étudié42
- Figure III-5 :** Conditions de chargement42
- Figure III-6 :** Maillage 3D de l'acier inoxydable 304 L43
- Figure III-7 :** Introduction de l'élasticité et de la plasticité dans abaqus44
- Figure III-8 :** Evolution de la contrainte de Von Mises et de la déformation en
fonction du temps45
- Figure III-9 :** Courbe de traction vraie obtenue numériquement47
- Figure III-10 :** Distribution des contraintes et des déformations dans le modèle
sollicité.....48
- Figure III-11 :** Courbe de traction vraie. Numérique VS expérimentale.....49

LISTE DES TABLEAU

Chapitre I

Tableau I-1 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables	10
Tableau I-2 : Domaine d'utilisation des aciers inoxydables	11
Tableau I-3 : Mode de solidification des aciers inoxydables	12
Tableau I-4 : Relation entre le mode de solidification et rapport Cr_{eq}/Ni_{eq}	13
Tableau I-5 : Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables	14

Chapitre II

Tableau II-1 : Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AISI 304L	25
Tableau II-2 : Caractéristiques de l'acier 304L	26

Chapitre III

Tableau III-1 : les unités dans ABAQUS	38
--	----

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les aciers inoxydables constituent une vaste famille d'alliages métalliques qui ont tous en commun de contenir du fer et du chrome. Suivant leur teneur en chrome dont le seuil minimal est de 10,5 % et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent un large éventail de propriétés. Grâce à ces propriétés, les aciers inoxydables ont pénétré de nombreux domaines industriels (bâtiment, industries chimiques et agro-alimentaires, transports, production d'énergie, etc.) et s'y sont développés d'une façon souvent spectaculaire. Parmi les nombreuses nuances d'aciers inoxydables, l'acier austénitique X2CrNi18-9. (AISI 304L) est le constituant le plus fréquent.

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés à la simulation du comportement mécanique en traction de l'acier 304L. La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel de simulation abaqus 6.14. Afin de valider les résultats de la simulation, une étude expérimentale semble nécessaire. Pour cela, un essai de traction à une température de 25°C a été réalisé.

Pour mener à bien cette étude, nous avons divisé le travail en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une synthèse bibliographique sur les aciers inoxydables ; leur historique, leurs domaines d'utilisation, leurs différentes familles ainsi que les différents modèles utilisés pour la modélisation de leur comportement mécanique.

Le deuxième chapitre est une étude expérimentale. Elle est réservée à la présentation de l'acier qui fait objet de notre étude, sa composition chimique et ses caractéristiques théoriques et les différentes techniques expérimentales, mises en œuvre au cours de notre investigation ainsi que les résultats caractérisation mécanique et microstructurale de cet acier.

Dans le troisième chapitre à caractère numérique, sont regroupés les résultats d'analyse numérique du comportement en traction.

Notre travail s'achève par une conclusion générale

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Les aciers inoxydables sont des alliages Fer-Chrome ou Fer-Chrome-Nickel, dont la teneur en carbone varie entre 0.02% à 1% et le pourcentage de chrome doit être supérieur à 12%, avec dans certains cas l'ajout d'éléments d'alliages interstitiels carbone ou azote ou métalliques tel que le nickel, molybdène et le titane... pour améliorer la tenue à la corrosion et les propriétés mécaniques. [1]

Découverts, dans les années 1890, par l'allemand Hans Goldschmidt qui a pu développer les premiers aciers au chrome et à bas carbone. Entre 1904 et 1909, de nombreux chercheurs, en particulier le français Léon GUILLET, étudièrent et mirent au point différents alliages Fe-Cr-Ni. En 1911, l'allemand Philip MONNARTZ, mit en évidence l'influence de la teneur en chrome des alliages par rapport à leur résistance à la corrosion.

Les avantages des aciers inoxydables ne sont plus à démontrer. Ces matériaux ont pénétré de nombreux domaines industriels (bâtiment, industries chimiques et agro-alimentaires, transports, production d'énergie, etc.) et s'y sont développés d'une façon souvent spectaculaire. Leur essor, surtout à partir des années 40, résulte de la solution qu'ils apportent à différents problèmes techniques.

I.2. Composition et structure

L'élément d'alliage chrome constitue jusqu'à nos jours le métal d'addition le plus important pour les aciers inoxydables. Au delà de 12 %, il confère à l'acier une bonne résistance à la corrosion. De plus, il existe un certain nombre d'autres éléments d'alliage ayant une certaine importance. Ils influencent plus ou moins la structure de l'acier selon leur nature et quantités. Cette structure affecte deux formes différentes. Le fer non allié est constitué à la température ambiante de 20°C de fer cubique centré ou "fer alpha" qui se transforme en fer cubique à faces centrées ("fer gamma")

au dessus de 906C. Les éléments d'alliages se repartissent en deux catégories : ceux qui favorisent le maintien du fer α et ceux qui stabilisent le fer γ .

Les informations suivantes montrent brièvement le type d'influence que peuvent avoir quelques éléments d'alliage:

Chrome : C'est un élément stabilisateur de fer α . Il est la cause de la passivation de l'acier et constitue, au delà de 12 %, l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables.

Molybdène : C'est un élément formateur de fer α . Il améliore la résistance à la corrosion des aciers inoxydables en milieux réducteurs. En présence d'ions halogènes, Il améliore en particulier la résistance à la corrosion par piqûres. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud.

Silicium : C'est un élément également formateur de fer α . Il améliore la résistance à l'oxydation à chaud. A teneurs élevées et dans certaines conditions, il augmente la résistance à la corrosion par exemple en milieux concentrés d'acide nitrique.

Vanadium : Formateur de fer α (ferrite), intervient qu'en faible quantité dans les aciers martensitiques au chrome par formation de carbures pour rendre les aciers insensibles à la surchauffe. De plus il lève la résistance mécanique à chaud,

Titane : C'est un formateur de ferrite Il se combine dans les aciers ferritiques et austénitiques avec le carbone pour former un carbure de titane et avec l'azote pour former un nitrure de titane dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion inter cristalline.

Niobium : Il s'agit d'un formateur de ferrite. Il se combine également avec le carbone dans les aciers au Cr et au CrNi et s'oppose à la corrosion inter granulaire.

Nickel : C'est un élément stabilisateur du fer γ Il élargit en effet le domaine d'existence de l'austénite en fonction de sa teneur jusqu'aux températures inférieures à 20°C. Il est avec le chrome un des plus importants éléments d'alliages des aciers inoxydables austénitiques. Le Ni améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous tension.

Manganèse : Il stabilise le fer et n'a pas d'influence reconnue sur la résistance à la corrosion. Il rend plus difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers Cr Ni et lors de sollicitation mécanique aux basses températures.

Carbone : Il favorise le fer C'est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers. Il élargit fortement le domaine austénitique. Son effet aux basses teneurs est d'environ 30 fois celui du nickel. Pour des raisons de corrosion chimique la teneur en C est dans la plupart des cas maintenue très basse.

Azote - Stabilisateur d'austénite. Il agit comme le carbone. La solubilité de l'azote augmente dans les aciers au Cr et au Cr Ni avec l'accroissement de la teneur en Cr. Dans les aciers austénitiques l'azote accroît la stabilité de l'austénite et les caractéristiques mécaniques sans compromettre les valeurs de la ténacité.

Cuivre : Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid.

Soufre : Il améliore l'usinabilité par enlèvement de copeaux. L'augmentation de la teneur en S conduit cependant à remettre en cause la résistance à la corrosion ce qui est à considérer lors du choix des Soufre aciers dans certaines conditions de sollicitations.

Le choix des éléments d'alliage détermine l'état structural résultant. Par un judicieux traitement thermique, la structure doit recouvrer ses caractéristiques mécaniques optimales c'est aussi l'état structural qui détermine, dans une certaine mesure, les propriétés mécaniques et physiques et la résistance à la corrosion. Dans les normes d'ateliers DIN 17 440, 17 441 et SEW 400, les aciers inoxydables se divisent selon leur structure correspondante en aciers ferritiques, martensitiques, austénitiques et austéno- ferritiques. C'est cette classification qui sera conservée tout au long de cet ouvrage

I.3. Systèmes Fe-Cr et Fe-Cr-Ni

Le diagramme de phase présenté dans la figure I.1 constitue l'outil de base dans l'étude et la description de l'équilibre de phases dans les aciers inoxydables. La solubilité du chrome dans le fer à haute température est complète et la totalité des alliages Fe-Cr se solidifient en mode ferritique.

A de faibles teneurs en chrome, il existe une boucle d'austénite γ dans le domaine de température 912-1394°C. Cette boucle sépare le diagramme en deux zones principales:

- en dessous de 11% de Cr, les alliages subissent une transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ au chauffage et l'inverse au refroidissement ; ils se comportent donc comme le fer ou l'acier doux,
- au dessus de 12.7 % de Cr, il n'y a plus de transformation de phases et les alliages restent totalement ferritiques.
- Entre 11 et 13 % de chrome, les deux phases α et γ coexistent en équilibre.

Ainsi, selon la composition par rapport à la boucle γ , les aciers au chrome peuvent avoir des structures différentes : ferritique, martensitique ou semi martensitique.

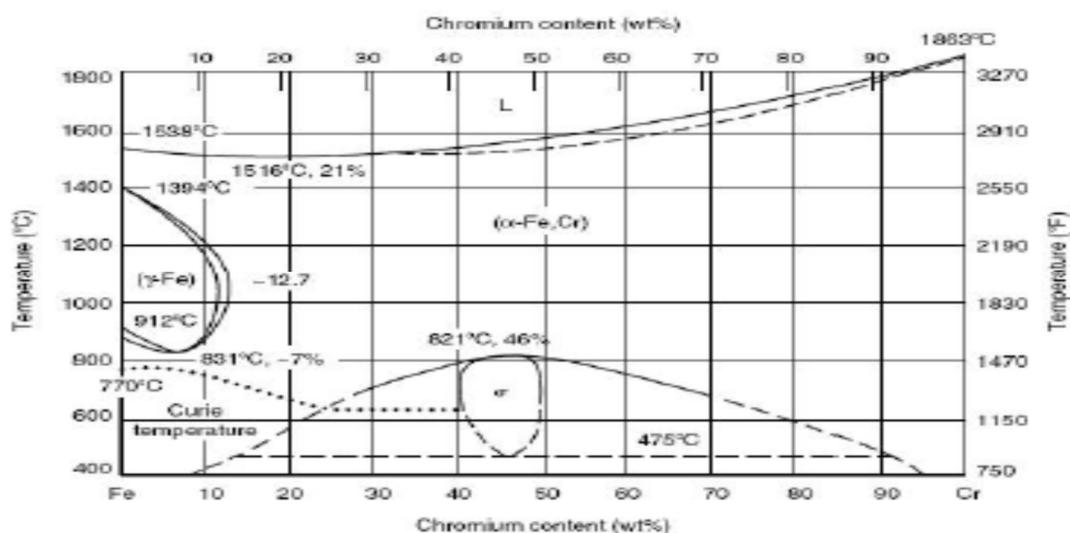


Figure I-1 : Diagramme d'équilibre binaire Fe-Cr [2]

Le diagramme ci-dessus montre aussi la présence d'une autre phase appelée σ , qui se forme en général dans les alliages ayant des teneurs en Cr supérieures à 20 %. Sur ce même diagramme, on montre aussi par une ligne horizontale tracée à la limite inférieure du domaine ($\alpha + \sigma$) la présence d'un phénomène métallurgique important connu sous l'appellation « *fragilisation à 475 °C* ». Ce phénomène est caractérisé par la formation d'un précipité très riche en chrome appelé phase α' , dans la matrice ferritique, et dont l'effet fragilisant devient de plus en plus important lorsque la teneur en Cr passe au-delà de 14% [2].

I.4. Les caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables

En plus de leur bonne résistance à la corrosion, les aciers inoxydables possèdent de bonnes propriétés mécaniques. Le Tableau I-1 résume les fourchettes des caractéristiques mécaniques des différentes familles d'aciers inoxydables.

Tableau I-1 : Propriétés mécaniques des aciers inoxydables [3]

	Limité d'élasticité $R_{p\ 0,2}$ (MPa)	Résistance à la traction R_m (MPa)	Allongement à la rupture A(%)	Module d'élasticité E (GPa)	dureté H_V (HB)
Ferritique	250-400	300-650	18-25	220	190-220
Martensitique	450-700	500-1000	15-20	215	400-560
Austénitique	200-250	570-900	50-60	200	210
Austéno-ferritiques	450-650	730-900	25-30	200	260-290

Les aciers martensitiques présentent une limite d'élasticité, une résistance à rupture et une dureté très élevées, mais une ductilité faible. Les aciers austénitiques présentent une excellente ductilité, une bonne résistance à rupture mais une faible limite d'élasticité. Les aciers ferritiques ont une limite d'élasticité élevée et un fort module d'élasticité. Les aciers inoxydables duplex combinent à la fois les propriétés

mécaniques et de corrosion des aciers austénitiques et des aciers ferritiques : ils possèdent une limite d'élasticité élevée, caractéristique de la ferrite, et une grande ductilité, caractéristique de l'austénite [4.5]. La limite d'élasticité augmente encore par addition d'azote et de carbone en solution solide.

I.5. Modes de solidification des aciers inoxydables

Quatre types de solidification sont possibles pour les aciers inoxydables. Ils sont détaillés dans le tableau I.3: solidification austénitique (A) / e tausténito-ferritique (AF) (l'austénite est la phase primaire) / solidification ferrito-austénitique(FA) et ferritique (F) (la ferrite est la phase primaire).

Tableau 1-3 : Mode de solidification des aciers inoxydables

Phase primaire	Mode de solidification	réaction	microstructure
l'austénite (γ)	A	$L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$	100% austénite
	AF	$L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow \gamma + \delta$	Ferrite δ eutectique à la frontière des structures cellulaires et dendritiques
Ferrite δ	FA	$L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow \delta + \gamma$	Ferrite squelettique et/ou lattes de ferrite issues de la transformation $\delta \rightarrow \gamma$
	F	$L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \gamma + \delta$	Ferrite aciculaire δ ou matrice ferritique avec de l'austénite Widmanstätten aux joints de grains.

Suite à la solidification, des transformations à l'état solide peuvent avoir lieu lors du refroidissement jusqu'à température ambiante, en particulier dans les aciers présentant une solidification ferritique.

La composition chimique de l'acier a un rôle important dans le mode de solidification de l'alliage en particulier les teneurs en Cr équivalent et Nickel équivalent. Des travaux ont permis de quantifier le lien entre le rapport Cr_{eq}/Ni_{eq} et le mode de solidification [6] (Tableau I-4).

Tableau I-4 : Relation entre le mode de solidification et rapport Cr_{eq}/Ni_{eq}

Cr_{eq}/Ni_{eq}	Mode de solidification
$Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1.25$ $1.25 < Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1.48$ $1.48 < Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1.95$ $Cr_{eq}/Ni_{eq} > 1.95$	A -complètement Austénitique AF- Austénitique Ferritique FA- Ferritique Austénitique F- Ferritique

Les aciers duplex qui sont des aciers inoxydables ayant une structure biphasée composée de ferrite complétée de 40 à 60 % d'austénite, leur solidification se fait d'abord en alliage ferritique (ferrite delta) suivie d'une transformation, en phase solide, en alliage austénitique.

I.6. Domaines d'utilisation des aciers inoxydables :

Les champs d'utilisation des aciers inoxydables est très vaste, le tableau I-2 suivant résume les domaines et secteurs d'emploi de chaque nuance.

Tableau I-2 : Domaine d'utilisation des aciers inoxydables

Les familles des aciers inoxydables	Applications principales
ferritiques	<ul style="list-style-type: none"> - Secteur automobile (pots d'échappement, pots catalytiques). - Bâtiment. - Sucrierie (tubes minces). - Containers. - Eviers. - Ballon d'eau chaude.
Austénitique	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie. - Retraitement du combustible. - Appareillage scientifique. - Electronique.
Auténo-ferritique	<ul style="list-style-type: none"> - Industrie chimique. - Industrie papetière. - Industrie pétrolière. - Chaudronnerie lourde.
martensitique	<ul style="list-style-type: none"> - Pièces mécaniques. - Vannes. - Robinets. - Outils ménagers (couteau, cuillers, fourchettes, - Outils chirurgicaux. <p>Grosses pièces industrielles (vannes, pompes, turbines hydrauliques,... ; etc.).</p>

I.7. Les principales familles d'aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables sont classés en quatre grandes familles en fonction de leur composition et de leur structure cristallographique :

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée CC)
- les aciers martensitiques (structure quadratique)
- les aciers austénitiques (structure cubique centrée CFC)
- les aciers austéno-ferritiques.

Le Tableau I-5 résume les principaux composants chimiques et les fourchettes de composition de ces différentes familles d'aciers inoxydables. [7]

Tableau I-5: Fourchettes de compositions chimiques des différentes familles d'aciers inoxydables [7]

Catégorie d'acier	Composition (% pds)				
	C	Cr	Ni	Mo	Autres
Ferritique	<0.1	13-30	0-5	<5	Ti
Martensitique	0,05-1.2	12-18	<7	-	-
Austénitique	<0,2	16-35	7-26	<6	N, Cu, Ti
Austéno-ferritique	<0,05	18-27	4-7	<4	N (<0.3)

➤ Les aciers inoxydables ferritiques

Ce sont des alliages à base Fe-Cr ne subissant pas de transformation austénitique ; l'équilibre entre les éléments alphas (principalement le chrome) et gammagènes (C, N et Ni) doit être tel que l'alliage soit à toute température à l'extérieur de la boucle γ du diagramme Fe-Cr.

La structure est exempte de précipitations (Figure 2.02a) et consiste en un assemblage de grains polyédriques de dimensions moyennes. Les aciers ferritiques sont soigneusement traités thermiquement car la diffusion des éléments d'alliages et du C (et Cr) dans la ferrite à chaque température est 10 à 10 fois plus rapide que dans l'austénite [8] et les processus d'activation thermique, comme la croissance de grosseur de grain, sont aussi significativement plus rapides que dans les phases ou matériaux austénitiques.

Aujourd'hui pratiquement la teneur en Cr dans les aciers ferritiques est comprise entre 13 et 30 et le C inférieur à 0,10 %. Comme éléments d'alliage complémentaire, on préfère additionner ceux qui stabilisent la ferrite comme par exemple le molybdène pour améliorer la résistance à la corrosion, Le carbone et l'azote agissent sensiblement la résistance à la corrosion en raison de leur faible solubilité dans la matrice ferritique de ces aciers. Pour des résistances à la corrosion élevées les aciers inoxydables ferritiques sont élaborés avec des teneurs en C et N extrêmement basses. sur c'est le teneur C+N de l'ordre de 0,015 % et des éléments formateurs de carbures ou de nitrures comme Nb-Zr-Ti. Les aciers ayant des teneurs en Cr nettement supérieures à 20 peuvent comporter du Ni sans perdre leur structure ferritique originelle. Pour les superferrites on ajoute quelquefois jusqu'à 4 % de Ni qui sert à élever les valeurs de résistance mécanique et améliore la ténacité.

➤ **Les aciers inoxydables martensitiques :**

Ce sont des alliages à base Fe-Cr ; la structure martensitique est obtenue par trempe de l'austénite située dans la boucle γ du diagramme Fe-Cr. Se sont donc des aciers de grande dureté et peu ductile.

Comme la transformation n'est possible que pour une gamme de compositions données, on désigne ces matériaux sous le nom d'aciers ferritiques-martensitiques. La transformation complète des aciers au Cr est déterminée par les hautes teneurs en C ou en Ni. Les aciers ayant 13 % de Cr nécessitent plus de 0,15 de C et une austénitisation à au moins 950°C. Ceux ayant 17 de Cr exigent de 0,03 de C et une température d'austénitisation d'au moins 1100°C

Les propriétés d'emploi des aciers martensitiques au chrome, qui se différencient de tous les autres groupes d'aciers inoxydables par leur haute dureté et leurs valeurs de résistance mécanique élevées, dépendent fortement de l'état structural obtenu après traitement thermique et varient dans une large mesure. Suivant l'état de traitement thermique existe une structure constituée d'une martensite plus ou moins revenue et de carbures précipités.

Outre le Cr et le C, les aciers martensitiques comportent aussi principalement du molybdène pour améliorer la résistance à la corrosion et la trempabilité, et du nickel pour améliorer la ténacité.

Dans les aciers martensitiques au Ni, qui se distinguent des aciers martensitiques proprement dits par une meilleure ténacité et de meilleures résistances à la corrosion. Ces dernières peuvent être encore plus élevées par addition de Mo. La martensite au Ni est apte à un excellent durcissement par précipitation de phases intermétalliques dans le domaine de températures allant de 450 à 600°C. Avec le titane on obtient un effet durcissant maximal. Les éléments comme Al, Cu, Nb et Mo ont une influence moindre de ce point de vue. Les teneurs en éléments d'addition se meuvent, dans les aciers martensitiques usuels, entre les limites suivantes: G: 12 à 18% Ni : jusqu'à 7% C : 0,05 à 1,25 Mo: jusqu'à 35

➤ **Les aciers inoxydables austénitiques :**

Les aciers inoxydables austénitiques sont, de loin, les plus connus et les plus employés parmi les aciers inoxydables : ils contiennent, outre une teneur en Chrome minimale de l'ordre de 17%, du Nickel (généralement 7% et plus) et des additions éventuelles de Molybdène, Titane, Niobium, ... etc. Ils sont par contre très indiqués, de par leur absence de fragilité à basse température, pour les emplois cryogéniques

Le module d'élasticité des aciers inoxydables austénitiques est de l'ordre de 200 GPa et la masse volumique est 7.9 mg/m³. Le fait que leur structure cristallographique soit de type cubique à faces centrées leur confère une ductilité et une ténacité exceptionnelles depuis les températures très basses jusqu'à plusieurs centaines de

degrés Celsius. A ces propriétés essentielles, il faut ajouter une excellente soudabilité opératoire et métallurgique, ce qui en facilite la mise en œuvre

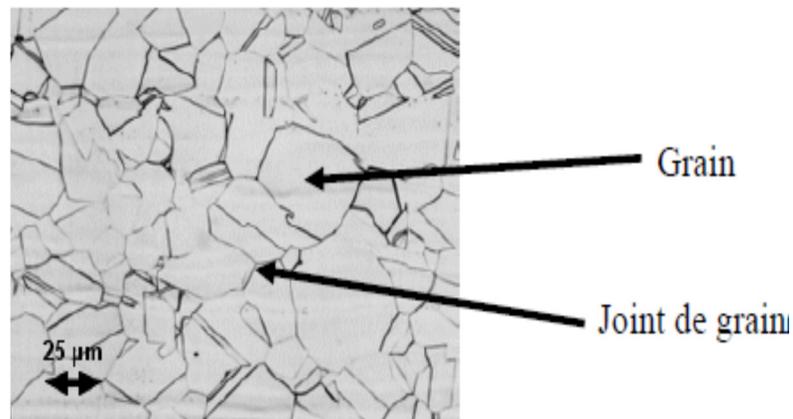


Figure I-2 : Structure d'un acier inoxydable austénitique

En dehors du Cr le Ni constitue le plus important des éléments d'alliage des aciers austénitiques inoxydables. Contrairement au chrome, le nickel élargit fortement le domaine austénitique.

Cet effet stabilisateur du Ni est plus intense encore dans les aciers au Cr que dans les alliages purs de fer, de telle sorte qu'il suffit déjà de 5% de Ni pour élargir jusqu'à la température ambiante de 20°C le domaine austénitique. De tels aciers sont exempts de transformation et par conséquent non durcissables par traitement thermique. La structure austénitique possède des propriétés paramagnétiques (amagnétisme) et peut par conséquent être différenciée immédiatement des structures ferritiques ou martensitiques au moyen d'un aimant. La microstructure austénitique est caractérisée par le phénomène de maillage.

Du point de vue corrosion chimique, la teneur en carbone des aciers austénitiques est maintenue à un bas niveau ou peut être neutralisée par l'addition d'éléments ayant une forte affinité pour cet élément comme par exemple, le Ti ou le Nb qui forment avec lui des carbures. Le carbone est limité à environ 0,10 % dans les aciers inoxydables austénitiques.

➤ **Les aciers inoxydables austéno-ferritique :**

Ceux-là diffèrent des précédents par le seul fait que leur équilibre en éléments alphas et gammas est tel que la structure à haute température (1050-1150°C) est mixte ($\alpha + \gamma$). Elle est de même maintenue métastable à la température ambiante par hypertrempe ;

ce qui nécessite que la stabilité de la phase austénitique soit suffisante. Dans le cas contraire on obtient une structure ferrite + martensite.

Les bases de la constitution de structures austéno-ferritiques ainsi que la possibilité de modifier les répartitions des quantités entre les deux phases structurales sont indiquées dans la figure 208 au moyen d'une coupe de diagramme quasi binaire Fe Cr Ni à 70 % de fer.

Les aciers contenant de 22 à 27 % de Cr et environ 4 à 8 % de Ni, se situent d'après ce diagramme et aux moyennes températures dans un domaine de phases hétérogène dans lequel coexistent l'austénite et la ferrite. Les limites de ce domaine de phases évoluent au dessus d'une zone de températures pour une concentration presque constante de telle sorte que par traitement de recuit en dessous de 1 000°C, le rapport des phases ferritique et austénitique ne varie pas ou fort peu. La figure 2.02d montre une structure binaire de phases austénitique et ferritique dans cet acier. De même, on observe après un traitement thermique et dans un matériau soumis à déformation un rétrécissement des divers domaines structuraux et ceci dans la direction principale de déformation. Outre le chrome et le nickel, les aciers austéno-ferritiques peuvent comporter suivant prescription des additions de Mo, de Cu et/ou de l'azote.

I.8. Modélisation du comportement mécanique des aciers inoxydables

Plusieurs auteurs ont proposé des modèles de comportement mécaniques pour ces aciers. Ces modèles se différencient par les hypothèses faites au niveau du comportement des différentes phases, par la cinétique de transformation induite ainsi que par la manière de prendre en compte la déformation de transformation. Dans cette thèse, on présentera juste quelques modèles afin de donner une idée sur la diversité des modèles utilisés.

❖ **Modèle de Guimaraes et al**

Guimaraes et al. [9]. proposent une loi d'écoulement en traction uniaxiale en fonction de plusieurs paramètres de la microstructure :

$$\sigma = \sigma_0 + K' \left[\int_{\varepsilon_i}^{\varepsilon} \frac{S^{\alpha'-\gamma}}{1-f} d\varepsilon \right]^{1/2} \quad \text{I.1}$$

où σ_0 est la limite d'élasticité, $S^{\alpha'-\gamma}$ est la surface des interfaces α' - γ dans le matériau par unité de volume, f la fraction volumique de martensite, ε_i la déformation plastique à laquelle se forme la première martensite et K' une constante dépendant de la microstructure (longueur des dislocations, nombres de sources de dislocations).

❖ **Modèle de Najafi-Zadeh et al.**

Najafi-Zadeh et al. [10]. expriment la loi de comportement d'une austénite instable γ avec transformation martensitique α' sous la forme :

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_\gamma(\varepsilon) + [\sigma_{\alpha'}(\varepsilon) - \sigma_\gamma(\varepsilon)] f(\varepsilon) \quad \text{I.2}$$

Les lois d'écoulement des phases γ et α' sont données par les relations :

$$\sigma_{\alpha'}(\varepsilon) = K_{\alpha'} \cdot \varepsilon^m \quad \text{I.3}$$

$$\sigma_\gamma(\varepsilon) = \sigma_0 + K_\gamma \cdot \varepsilon^n \quad \text{I.4}$$

où σ_0 , K_γ , n , $K_{\alpha'}$, et m sont des constantes à identifier sur le comportement de chaque phase.

La cinétique de transformation est donnée par le modèle de Guimaraes.

$$f = 1 - \exp(-K \varepsilon^2) \quad \text{I.5}$$

❖ Modèle de Narutani et al.

Narutani et al. [11] ont développé une modélisation de l'écoulement inélastique d'un acier austénitique avec transformation martensitique. Le modèle prend en compte la contribution du durcissement lors de l'apparition de la martensite et l'adoucissement dynamique. La loi de comportement s'écrit :

$$\sigma = \sigma_s - \Delta\sigma_d = (1-f)\sigma_\gamma(\varepsilon - \alpha f) + f\sigma_\alpha(\varepsilon - \alpha f) - \Delta\sigma_d \quad \text{I.6}$$

Le premier terme σ_s représente l'écrouissage d'un matériau biphasé, σ_γ et σ_α étant les contraintes d'écoulement de l'austénite et de la martensite et αf prend en compte l'orientation des plaquettes de martensite ($\alpha=0.12$). Le dernier terme $\Delta\sigma_d$ représente l'incrément d'adoucissement dynamique résultant de la plasticité de transformation qui s'exprime :

$$\Delta\sigma_d = \beta \frac{df}{d\varepsilon} \sigma_s \quad \text{I.7}$$

β étant un paramètre à identifier sur l'expérience. Finalement le comportement s'écrit :

$$\sigma = (1-f)\sigma_\gamma(\varepsilon - \alpha f) + f\sigma_\alpha(\varepsilon - \alpha f) \left\{ 1 - \beta \frac{df}{d\varepsilon} \right\} \quad \text{I.8}$$

Après identification des paramètres, les auteurs constatent que le modèle est en bon accord avec l'expérience pour des essais de traction à différentes températures sur un acier entièrement austénitique.

❖ Modèle d'Iwamoto et Tsuta

Le modèle d'écrouissage d'Iwamoto et Tsuta [12] prend en compte une fonction de charge dépendant du troisième invariant J_3 du déviateur des contraintes proposée par Miller et McDowell [13] :

$$F(J_2, J_3) = J_2 - k \frac{J_3}{J_2^{1/2}} - \frac{1}{3} \bar{\sigma}^2 = 0 \quad \text{(1.9)}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (1.10)$$

$$J_3 = \det |S_{ij}| \quad (1.11)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3J_2 - k \frac{J_3}{J_2^{1/2}}} \quad (1.12)$$

S_{ij} est le deviateur du tenseur des contraintes de Cauchy

$\bar{\sigma}$ la contrainte effective du matériau biphasé

k est en relation avec le développement de microstructure dans le matériau tel que la texture. La forme simplifiée de l'équation d'évolution de k est proposée par Miller et McDowell [13]

$$\dot{k} = C_k (1 - k) \dot{\varepsilon}^{pslip} \quad (1.13)$$

Où

C_k est une constante du matériau

$\dot{\varepsilon}^{pslip}$ est la vitesse de déformation plastique du glissement dans l'acier TRIP.

Iwamoto et Tsuta décompose le taux de déformation inélastique en une partie plastique de glissement, une partie déviatorique de transformation et une partie de dilatation de transformation telle que :

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\varepsilon}_{ij}^{pslip} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{ptrans} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{pslip} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{pshape} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{pdilat} \quad I.14$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pslip}$ est le tenseur de la vitesse de déformation plastique induite par le glissement. Sa forme est donnée par la loi de normalité "Eq. 1.15".

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{pslip} = \dot{\varepsilon}^{pslip} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1.15)$$

Où

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3S_{ij}}{2\bar{\sigma}} \quad (1.16)$$

$\dot{\epsilon}_{ij}^{pshape}$ et $\dot{\epsilon}_{ij}^{pdilat}$ sont les tenseurs de la vitesse de la déformation plastique induite par la transformation, le premier décrit le changement de forme, le second décrit le changement de volume. Les formes des deux sont données par “Eqs. 1.17- 1.18”.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pshape} = R j^m \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1.17)$$

$$R = R_0 + R_1 \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{ya}} \right) \quad (1.18)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{pdilat} = \frac{1}{3} \Delta j^m \delta_{ij} \quad (1.19)$$

Où

R est un paramètre qui prend compte de la magnitude du changement de forme;

R0 and R1 sont des constantes du matériau ;

σ_{ya} est la limite d'écoulement de la phase austénitique ;

Δv représente l'expansion volumique résultant de la transformation martensitique ;

δ_{ij} l'indice de Kronecker ou la matrice d'identité.

En considérant la déformation thermique, la loi de comportement est donnée par l'équation :

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^{th} - \dot{\epsilon}_{kl}^{pslip} - \dot{\epsilon}_{kl}^{shape} - \dot{\epsilon}_{kl}^{dilat}) \quad \text{I.2}$$

Chapitre II

Matériau de l'étude

Matériau de l'étude

II.1.Introduction

Ce chapitre à caractère expérimentale est réservé à la présentation de notre matériau d'étude.

II.2.Présentation du métal de l'étude

Le matériau utilisé dans notre étude est un acier inoxydable à effet TRIP, entièrement austénitique au chrome-nickel "18-8" le plus utilisé. Sa dénomination est AISI 304L. Le (L) signifie que l'acier à une faible teneur en carbone. Suivant l'AFNOR sa désignation est X2CrNi18-9. Cet acier nous a été livré sous forme d'une tôle de 3 mm d'épaisseur. La composition chimique et le pourcentage de chaque élément de cet acier sont répertoriés dans le Tableau II.1 .

Tableau II.1 : *Composition chimique de la nuance entièrement austénitique AISI 304L [14]*

Désignation	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N
Eléments %	≤ 0.03	18 - 20	8 - 12	1.00	2.00	0.045	0.015	0.1

L'acier 304L est utilisé dans plusieurs domaines tels que :

- ✓ Industrie chimique et pétrochimique
- ✓ Industrie des processus : réservoirs sous pression, échangeurs de chaleur, systèmes de canalisations, brides, raccords, valves et pompes
- ✓ Industrie alimentaire
- ✓ Industrie médicale
- ✓ Industrie minière
- ✓ Raffinage de pétrole
- ✓ Industrie pharmaceutique
- ✓ Industrie nucléaire
- ✓ Industrie des déchets et papetière

❖ **Caractéristiques théorique de l'acier 304L**

Le tableau ci-dessous contient quelques caractéristiques mécaniques, physiques, thermiques et électriques.

Tableau II.2 : Caractéristiques de l'acier 304L[14]

mécaniques	Physiques	thermiques	électriques
Dureté-brinell 160-190	Densité (g.cm ⁻³) 7.93	Coefficient d'expansion thermique à 20-100°C (x10 ⁻⁶ K ⁻¹) 18.0	Résistivité électrique (μOhm.cm) 70-72
Elongation à la rupture (%) 60	Point de fusion 1400-1455 (°C)	Conductivité thermique à 23 °C (W m ⁻¹ K ⁻¹) 16.3	
Module d'élasticité (GPa) 190-210			
Résistance à la traction (MPa) 460-1100			
Résistance aux chocs-IZOD (J m ⁻¹) 20-136			

❖ **Acier à effet TRIP**

Transformation Induced Plasticity (TRIP), cette expression en anglais indique que la plasticité est induite par la transformation « plasticité de transformation ». Au début le phénomène n'était pas bien défini ensuite, Mitter [1] consacra tout un livre à ce phénomène et il le décrit comme un "...accroissement significatif de la plasticité au cours d'un changement de phase. Pour une contrainte extérieure appliquée, dont la contrainte équivalente est petite comparée à la norme de la limite d'élasticité du matériau, une déformation plastique macroscopique se produit...". L'effet TRIP est attribué à un changement de phase particulier qui se produit à l'état solide et qui est à l'origine des propriétés remarquables des matériaux dans lesquels elle se produit. Dans les aciers à effet TRIP, la transformation en question est la transformation de la phase austénitique métastable γ vers une autre variante de martensite α' .

Les aciers désignés par le terme TRIP sont des aciers présentant un comportement mécanique particulier. Ils ont à la fois une résistance élevée et une

haute ductilité, ce qui les rend particulièrement intéressants pour la mise en forme par déformation plastique.

Suivant leur composition chimique, on distingue deux catégories d'aciers à effet TRIP :

- les aciers à effet TRIP fortement alliés (Fe-Ni, AISI304, AISI301, ...) qui sont entièrement austénitiques,
- les aciers TRIP faiblement alliés qui sont partiellement austénitiques (multiphasés).

- **Aciers à effet TRIP entièrement austénitiques**

Parmi les aciers austénitiques certains sont dits inoxydables en raison de leur excellente résistance à la corrosion, en particulier celle qui est due à l'oxydation par l'air et par les acides. De nombreuses nuances d'aciers inoxydables sont développées pour des applications spéciales dans l'industrie du pétrole, de l'agro-alimentaire de l'industrie chimique et dans l'aéronautique. Le chrome, dont la proportion atteint au moins 10%, est l'élément d'addition essentiel de l'acier inoxydable. C'est qui donne à l'acier inoxydable sa résistance à la corrosion et à l'oxydation. Le deuxième élément d'alliage est le nickel, c'est un élément gammagène qui stabilise l'austénite à température ambiante.

- **Aciers TRIP multiphasés**

Ces types d'aciers sont conçus suivant le même principe que les matériaux composites. À l'aide de la composition chimique et de traitements thermiques et mécaniques, le matériau s'enrichit localement en certains éléments d'alliages. Le matériau obtenu est alors un mélange de phases dures et de phases ductiles. Sous sollicitation mécanique, l'une de ces phases se transforme en martensite. La combinaison entre les propriétés de ces phases offre de meilleures caractéristiques mécaniques à ces aciers.

Les nuances d'aciers TRIP multiphasés diffèrent par leur composition chimique et leur proportion de phase.

II.3.Caractérisation de l'acier 304L**II.3.1.Caractérisation microstructurale****a) Analyses micrographiques**

Pour mettre en évidence la structure et la morphologie de l'acier 304L, nous avons d'abord effectué les opérations suivantes :

- **Découpage**

La première étape de préparation est le découpage, pour cela nous nous sommes servis d'une scie métallique.

- **Enrobage**

Cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation des échantillons et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. Pour cela une enrobeuse de marque STRUERS nous a permis d'enrober les échantillons dans une résine thermodurcissable.

- **Polissage**

Le polissage est une opération qui consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et dénuée de toute rayure. L'opération de polissage de nos échantillons est menée selon la procédure suivante :

- polissage au papier SiC avec les grades successifs 400, 800, 1200, 2500, 4000. L'opération est effectuée sur une polisseuse électrique de type « Struers », à deux disques, munie d'un dispositif d'arrosage permanent d'eau afin d'éviter tout échauffement local suite au frottement. Le passage d'un papier à l'autre nécessite une rotation de 90° de l'échantillon, afin d'éliminer les rayures laissées par le papier abrasif précédent. La vitesse de rotation des disques est de 300tr/mn.
- pour la finition, les échantillons sont polis sur un disque à feutre imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est l'alumine (Al_2O_3). La vitesse de rotation du disque est de 300tr/min. À l'issue de cette opération finale, l'échantillon nettoyé puis séché.

- **Attaque chimique**

Après l'opération du polissage et dans le but de mettre en évidence les différentes phases et leur morphologie, tout comme les joints de grains austénitiques, une attaque chimique électrolytique a été réalisée. La mise en œuvre de cette attaque est effectuée avec une solution d'acide oxalique dont la composition chimique est de 10g de $C_2H_4O_4$ et 100 ml H_2O . Pour attaquer nos échantillons, une tension de 10v pendant 45s est appliquée.

- **Observation micrographique**

L'acier 304L est analysé à l'aide d'un microscope électronique à balayage du type Philips XL30. Celui-ci est équipé de détecteurs d'électrons secondaires et rétrodiffusés ainsi que d'un analyseur EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) permettant de réaliser des cartographies des éléments et d'évaluer la teneur en éléments de l'échantillon par des méthodes semi-quantitatives en utilisant les rayons X caractéristiques des atomes contenus dans l'échantillon.

L'appareil est relié à deux microordinateurs sur lesquels sont installés les logiciels de commande du microscope, d'acquisition et de traitement des résultats.

b) Résultat d'analyse micrographique

L'analyse micrographique à l'aide du microscope électronique à balayage a montré que l'acier 304L est caractérisé par des grains austénitiques de taille de $20\mu m$ figure II.1.

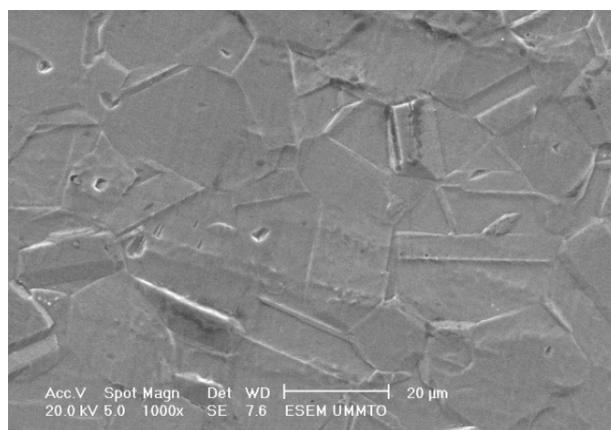


Figure II-1 : Microstructure de l'acier 304L

c) Analyses par la diffraction des rayons X

L'analyse a été faite à l'aide d'un diffractomètre de type Philips Panalytical. Cet appareil est muni d'un tube à anticathode de cuivre produisant un rayonnement X de longueur d'onde de 1.540598\AA . Il est piloté par ordinateur où sont injectés les paramètres d'analyse dans le logiciel X'pert High Score. Les paramètres utilisés au cours de nos expériences sont les suivants :

- L'intervalle de balayage est de 0 à 120 degrés,
- Le pas de balayage est de $0,02^\circ$,
- Le temps d'exposition par pas est de 10 secondes.

Le dépouillement du spectre et l'analyse des résultats sont effectués à l'aide du logiciel

❖ Résultat d'analyse

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de l'acier TRIP 304L a révélé que des pics correspondant à l'austénite figure II.2. Ce résultat montre que l'acier 304L est bien entièrement austénitique

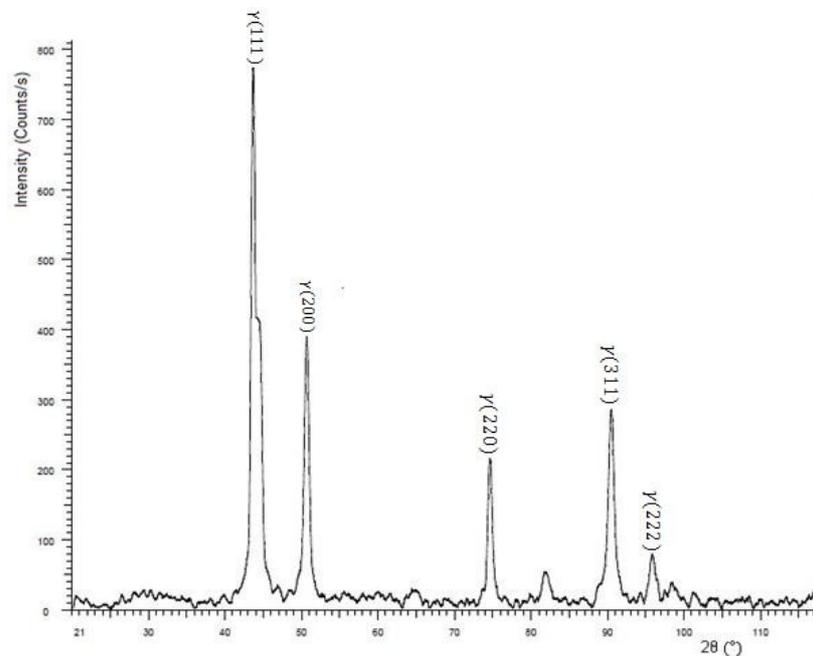


Figure II-2 : Spectre de diffraction de l'acier 304L[14]

II.3.2. Caractérisation mécanique

Afin de déterminer le comportement mécanique de l'acier 304L, un essai de traction, sur une éprouvette normalisée (Figure II.3), a été effectué. L'essai est réalisé à une température ambiante (25°C). Pour cela, une machine de traction de type IBERTEST a été utilisée. Cette machine est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre servant à mesurer la force appliquée à l'éprouvette, et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin mise en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette. On commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur. Les caractéristiques de la machine sont:

Charge d'essais : 200KN ;

Vitesse d'essai: 10 à 500 mm/min ;

Alimentation électrique T=220V, F=50Hz.

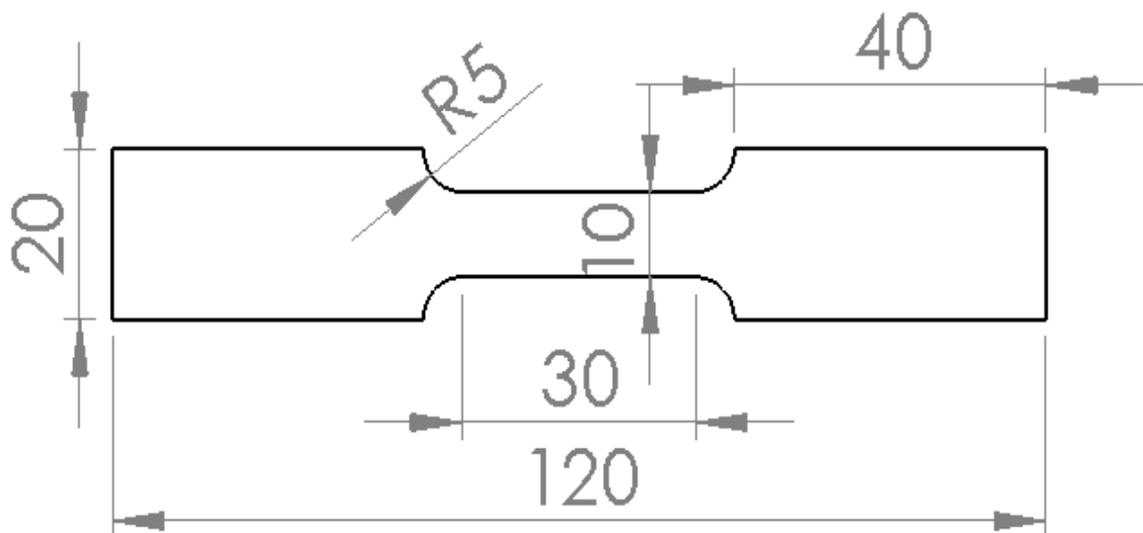


Figure II-3 : Éprouvette de traction

II.4. Résultat de l'essai de traction

Pendant l'essai nous avons remarqué que la déformation se produit en trois étapes : Tout d'abord il y'a un allongement limité de l'éprouvette, puis petit à petit on peut observer une diminution de la section sur la partie calibrée de l'éprouvette jusqu'à l'apparition de la striction puis rupture de l'éprouvette. Le résultat est obtenu par une chaîne d'acquisition reliée à un ordinateur qui enregistre ses données. La courbe obtenue lors de ces essais est montrée sur la figure II.4.

Sur cette courbe, on remarque l'existence de plusieurs parties distinctes : tout d'abord nous avons une partie quasi-linéaire correspondant à la partie élastique ensuite vient le domaine plastique avec écrouissage, après la partie plastique nous avons une striction puis la rupture. D'après l'allure de la courbe, nous voyons bien que cet acier a un comportement élasto-plastique écrouissable. La courbe montre également un excellent compromis entre les caractéristiques de résistance et de déformation plastique.

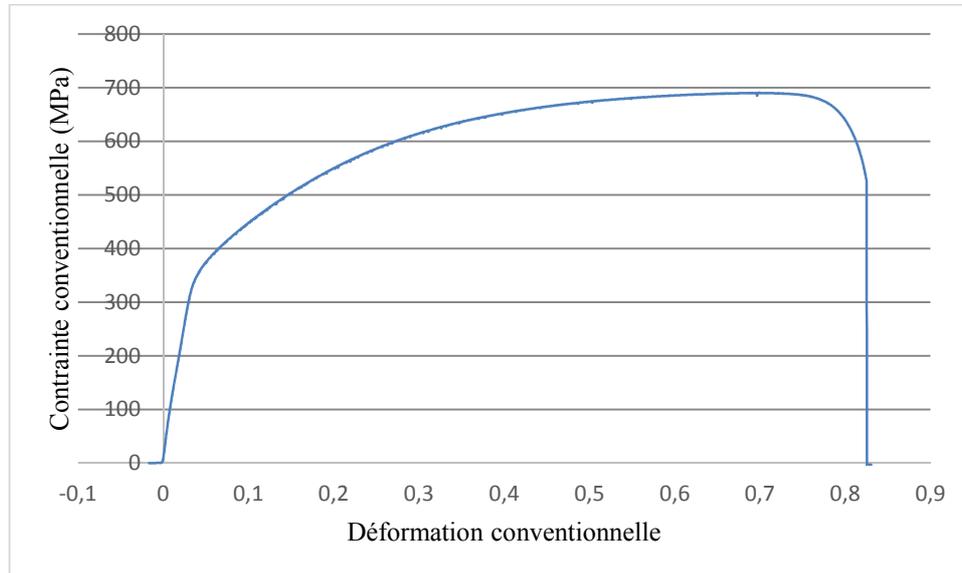


Figure II-4 : Courbe de traction conventionnelle de l'éprouvette à 25°C

Chapitre III

Simulation et validation

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre est consacré pour la simulation et la validation de nos résultats. Les simulations du problème sont faites à l'aide du logiciel Abaqus 6.14. Pour la validation des résultats numérique nous les avons comparés avec les résultats expérimentaux du chapitre 2.

III.2 Présentation du logiciel ABAQUS :

1. Définition :

ABAQUS est une suite logicielle pour l'analyse par éléments finis et l'ingénierie assistée par ordinateur, initialement publiée en 1978. Le nom et le logo de ce logiciel sont basés sur l'outil de calcul Abaqus. [16]

La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour l'analyse par éléments finis, proposant un grand nombre de choix aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

La suite de produits Abaqus se compose de cinq produits logiciels de base : [17]

Abaqus/CAE (Complete Abaqus Environment), Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit

Abaqus/CFD (Computational Fluid Dynamics), Abaqus/Electromagnetic.

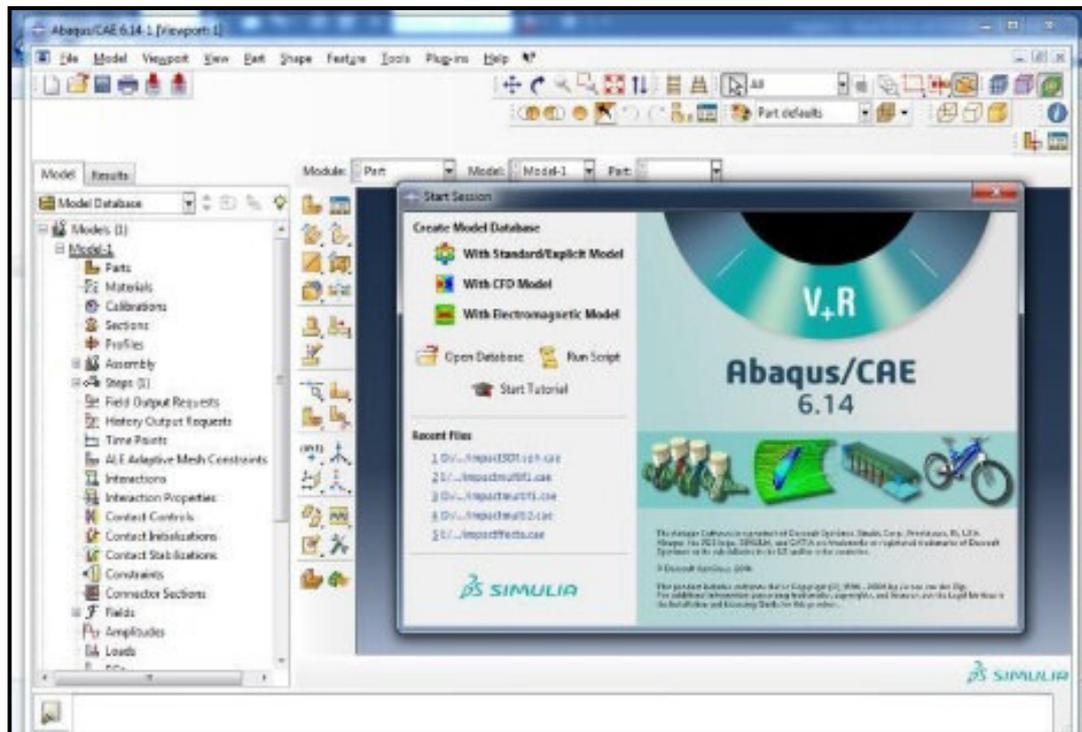


Figure III-1 : Interface de code d'ABAQUS

2. Les caractéristiques du logiciel ABAQUS

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires.

Le cœur du logiciel ABAQUS est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier .odb.

Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le fichier .odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. ABAQUS propose le module

ABAQUS CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

La génération du fichier de données,
Le lancement du calcul proprement dit,
L'exploitation des résultats.

3. Applications

Abaqus est utilisé dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale et des produits industriels. Le produit est populaire auprès des institutions non universitaires et de recherche en ingénierie en raison de la large capacité de modélisation des matériaux et de la capacité du programme à être personnalisé, par exemple, les utilisateurs peuvent définir leurs propres modèles de matériaux afin que de nouveaux matériaux puissent également être simulés dans Abaqus.

Abaqus fournit également une bonne collection de capacités multi physiques, telles que les capacités couplées acoustiques-structurales, piézoélectriques et structurelles, ce qui le rend attrayant pour les simulations de niveau de production où plusieurs champs doivent être couplés.

4. Les éléments utilisés par ABAQUS [16] :

On distingue différentes grandes classes d'éléments :

- Les éléments unidimensionnels (1D) : barre; poutre, rectiligne ou courbe
- Les éléments bidimensionnels (2D) : élasticité plane (contrainte ou déformation plane), plaques en flexion, coques courbes de forme triangulaire ou rectangulaire.

- les éléments tridimensionnels (3D) : de forme tétraédrique, hexaédrique...etc.
- les éléments axisymétriques : (pour les pièces présentant une symétrie de révolution au niveau de la géométrie et du chargement).
- les autres éléments : ressorts, amortisseurs, rigides.

5. Présentation des différents types d'éléments Abaqus:

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

Le choix entre ces différentes dimensionnalités dépend de la maîtrise du problème à simuler. Ce qui permet de tenir compte des symétries de géométrie, des chargements, des conditions aux limites et des propriétés des matériaux. [16]

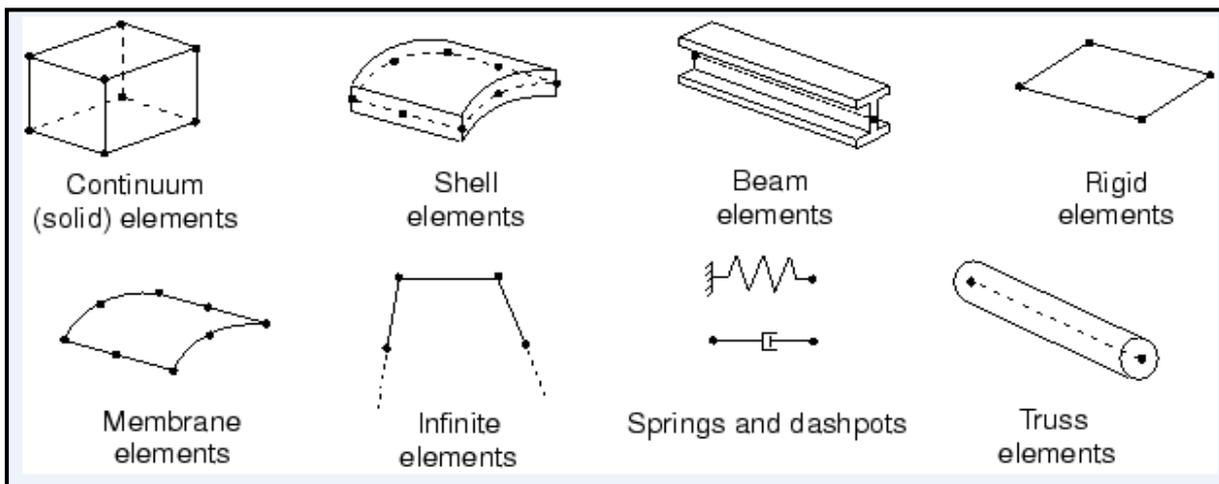


Figure III-2 : Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'Abaqus

6. Les systèmes d'unités dans le logiciel ABAQUS :[17]

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

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

Tableau III-1 : les unités dans ABAQUS [18]

7. Structure d'une analyse sous Abaqus:

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

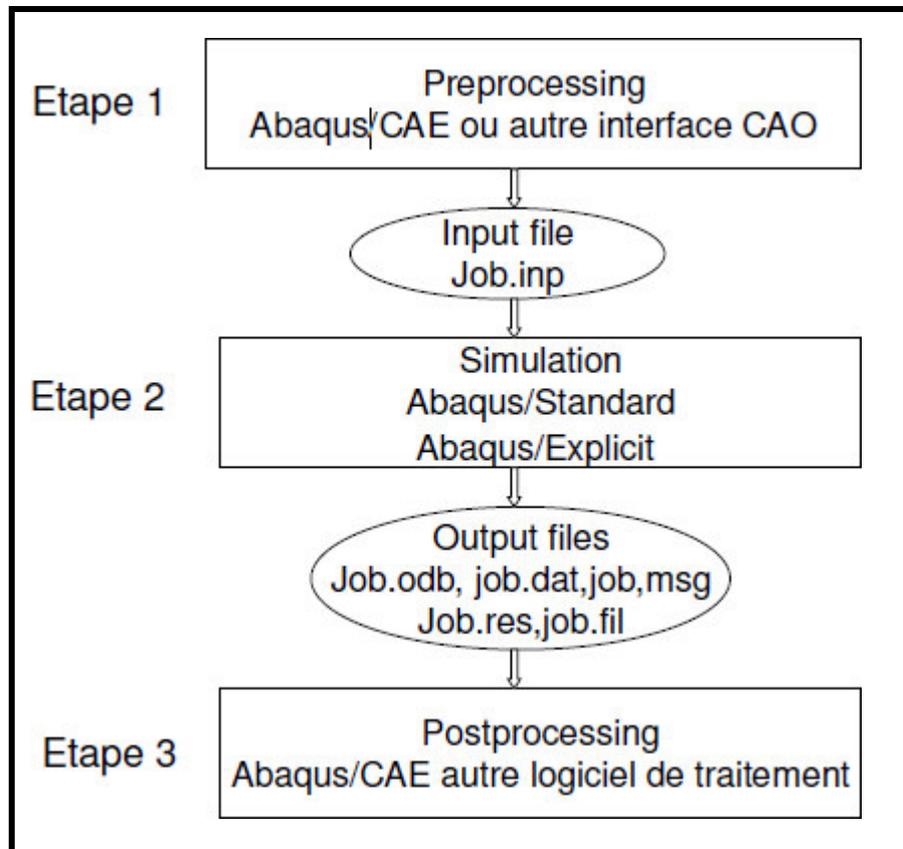


Figure III-3 : structure d'analyse sur ABAQUS [19]

8. Présentation du logiciel ABAQUS /CAE:

ABAQUS / CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module Contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation :

a) module Part :

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

b) module Property:

Le module property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les

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

c) Le module Assembly:

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques assemblage.

d) Le module Step:

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

e) Le module Interaction:

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

f) Le module Load:

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

g) Le module mesh:

Le module de mesh pour le maillage de la pièce et pour donner une forme géométrique.

Il existe 3 techniques de maillage dans ABAQUS :

Le maillage **Structured**, méthode qui utilise un maillage par défaut de pièces de topologie particulière (ex : cube, pavé, sphère...).

Le maillage **Swept** permet de mailler un côté ou une surface puis de copier ce maillage le long d'un chemin, c'est-à-dire balayer (sweep) le modèle avec un maillage de base.

Le maillage **Free** est le maillage le plus souple, en effet il permet de mailler le modèle de la manière que l'on veut.

h) Le module Job:

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

i) Le module Visualisation :

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

III.3 Simulation du comportement mécanique en traction de l'acier 304L

Le modèle numérique développé dans cette étude est une structure tridimensionnelle en acier (inox 304L) (Figure III-4) ayant les dimensions suite :

Largeur ($l = 20$ mm),

Longueur ($h = 120$ mm),

Epaisseur ($h = 3$ mm).

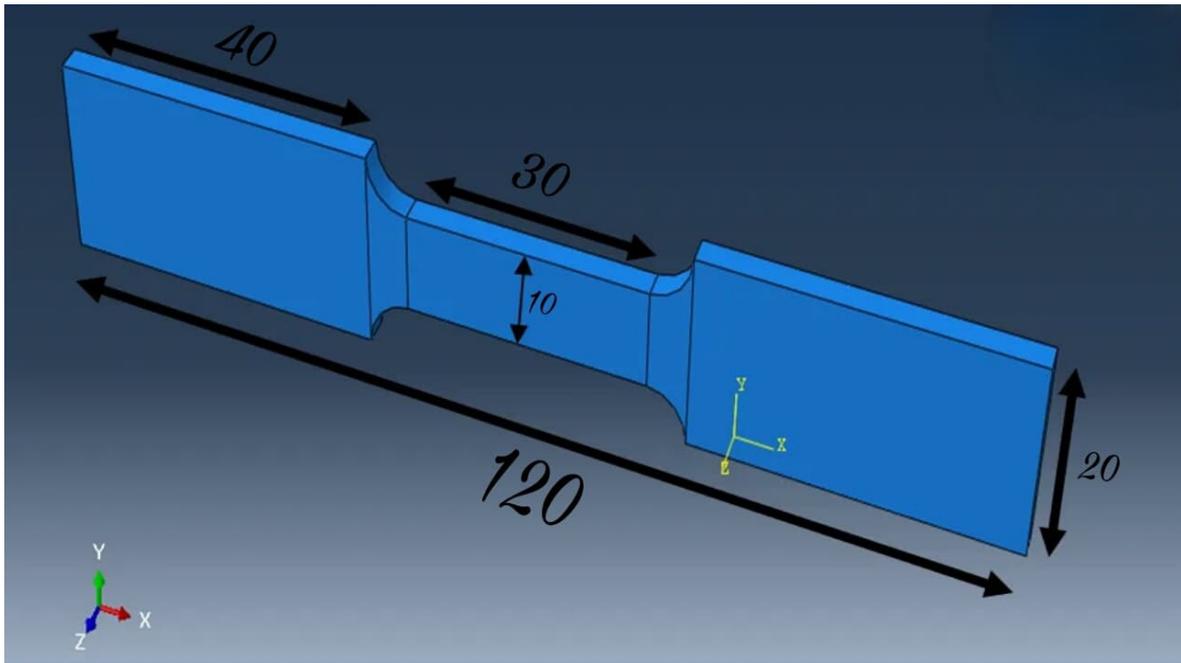


Figure III-4 : Modèle tridimensionnelle étudié

Le problème de traction uniaxiale est résolu dans ABAQUS 6.14 en utilisant un solide linéaire à éléments d'intégration réduits, appelé C3D8R dans la terminologie Abaqus. Le problème a été simulé en appliquant les conditions aux limites appropriées, encastrement et déplacement, au modèle suivant la direction Y.

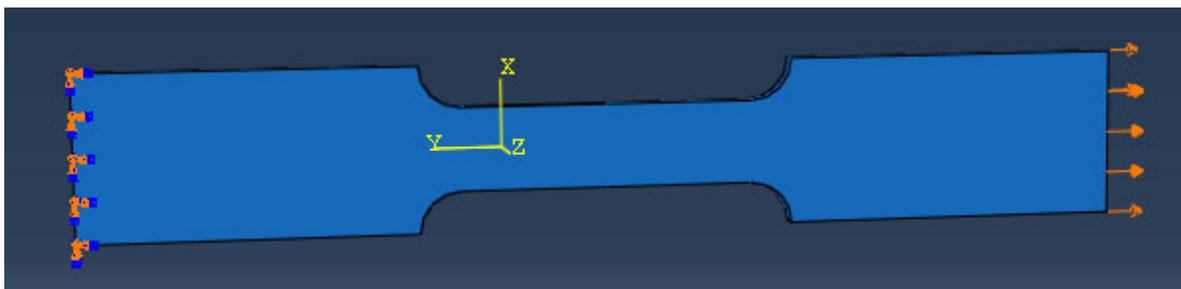


Figure III-5 : Conditions de chargement

Dans notre étude la tôle en acier 304L est considérée comme un solide déformable tridimensionnel, avec un maillage obtenu par des éléments linéaires à quatre nœuds du type C3D8R. (Figure III-6).

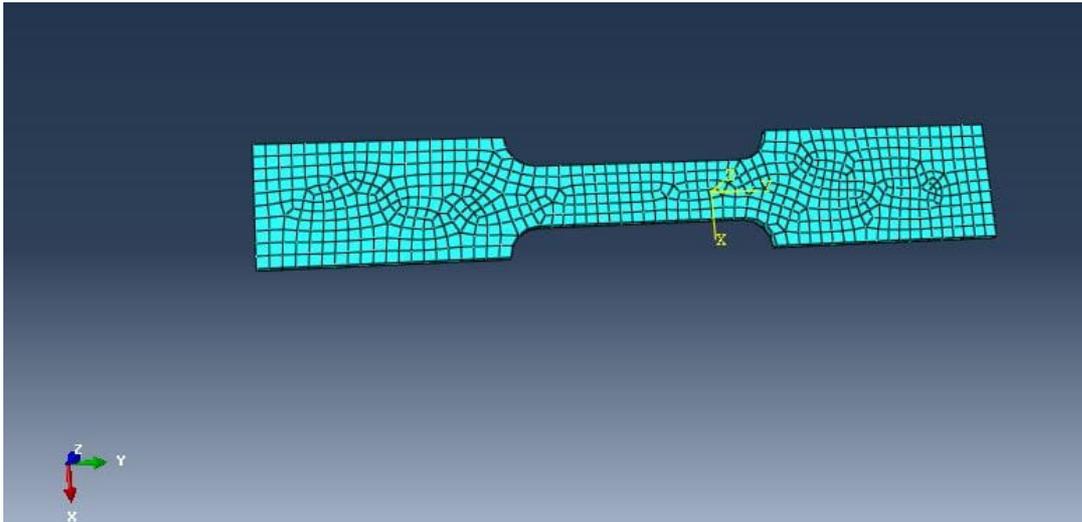


Figure III-6 : Maillage 3D de l'acier inoxydable 304 L

L'acier 304L est caractérisé par un comportement élastoplastique avec un écrouissage non linéaire (élasticité et plasticité non linéaire). Pour reproduire la réponse de cet acier à l'aide du logiciel abaqus nous avons suivi les étapes suivantes dans le module property.

- Pour l'élasticité nous avons introduit le module de Young ainsi que le coefficient de poisson de l'acier 304L, voir la **Figure III-7**
- Pour la plasticité, nous avons introduit les contraintes plastiques vraies et les déformations plastiques vraies calculées à partir des résultats de la courbe de traction conventionnelle obtenue expérimentalement, voir la **Figure III-7**.

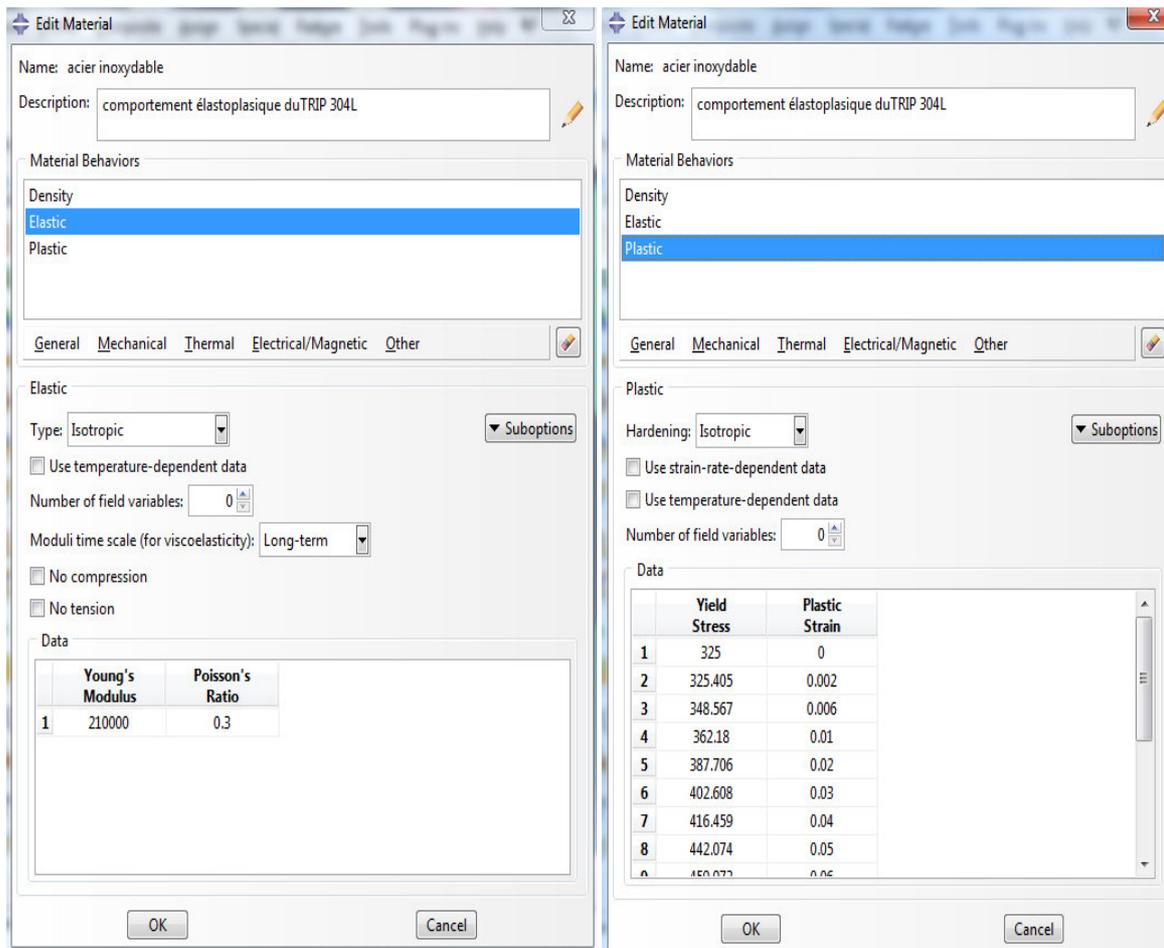


Figure III-7 : Introduction de l'élasticité et de la plasticité dans abaqus

N.B : calcul des contraintes vraies et des déformations vraies

Pour le calcul les contraintes vraies et les déformations vraies que nous avons introduit pour reproduire la plasticité sur abaqus nous avons utilisé les formules suivantes :

$$\sigma_V = \sigma_N (1 + \epsilon_N)$$

$$\epsilon_V = \ln(1 + \epsilon_N)$$

σ_V : Contrainte vraie

σ_N : Contrainte nominale ou conventionnelle

ϵ_V : Déformation vraie

ϵ_N : Déformation nominale ou conventionnelle

III.4 Résultats et discussions

La **Figure III-8** (a) et (b) représentent respectivement les courbes de l'évolution de la contrainte de Von Mises et de la déformation en fonction du temps.

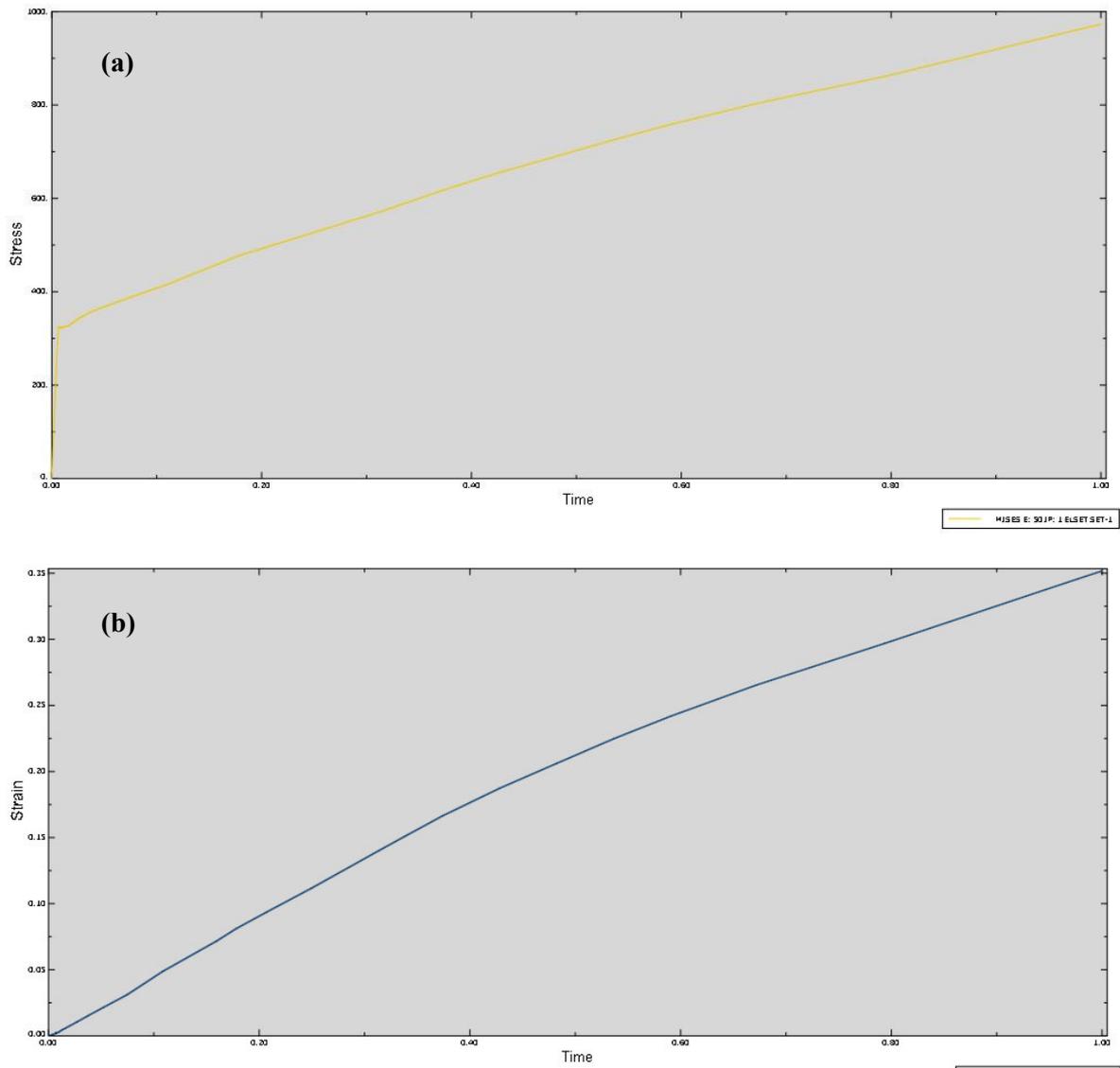


Figure III-8 : Evolution de la contrainte de Von Mises et de la déformation en fonction du temps

La Figure III-9 Représente la courbe de traction vraie obtenue numériquement à l'aide du logiciel abaqus. D'après l'allure de cette courbe, on remarque que le comportement élastoplastique écrouissable est bien reproduit par abaqus.

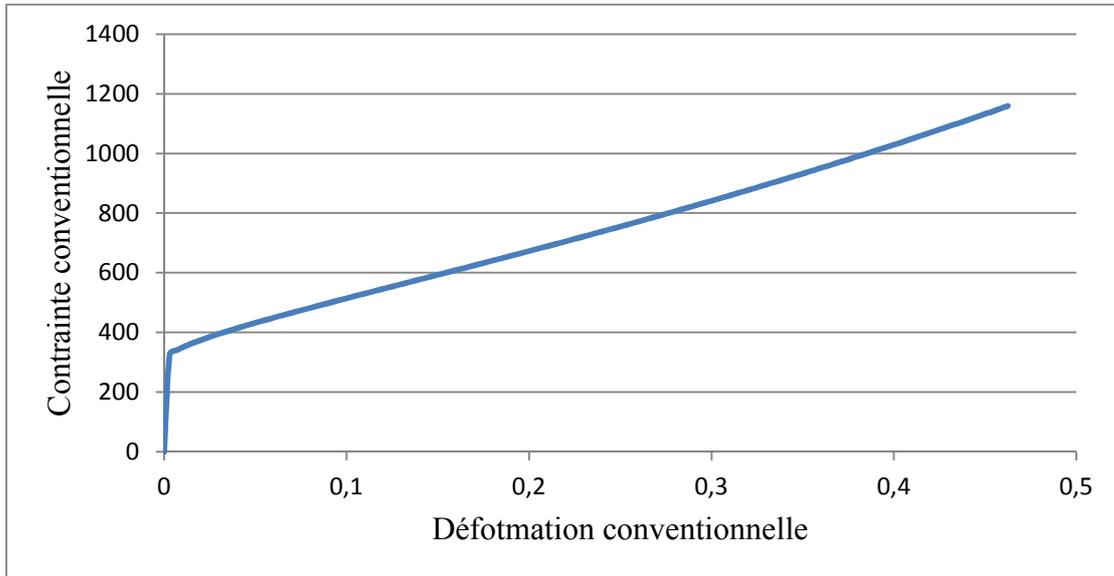
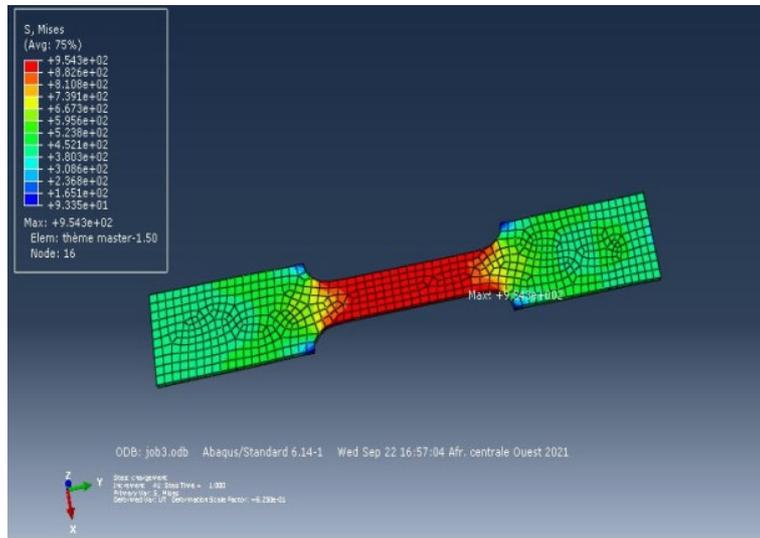


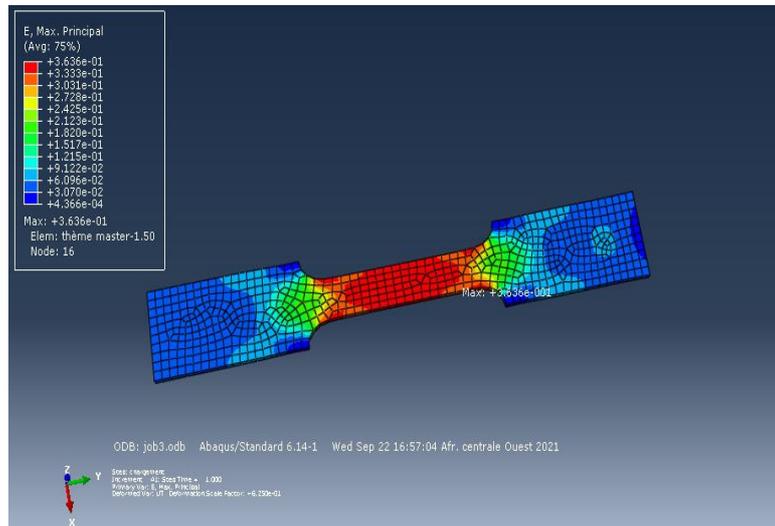
Figure III-9 : Courbe de traction vraie obtenue numériquement

La Figure III-10 montre le niveau et la distribution des déformations plastiques (PE), élastiques (EE), totales (E), et mises (S), dans un acier inoxydable (304 L) soumis à un déplacement suivant la direction Y.

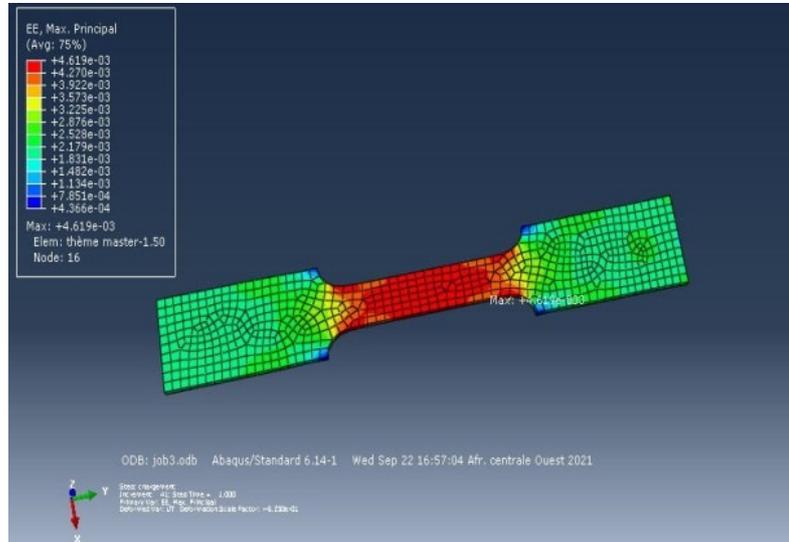
La répartition des contraintes dans le model n'est pas homogène. On remarque qu'elles sont intimement liées aux déformations et qu'elles sont plus importantes dans la partie utile que dans les autres parties du modèle.



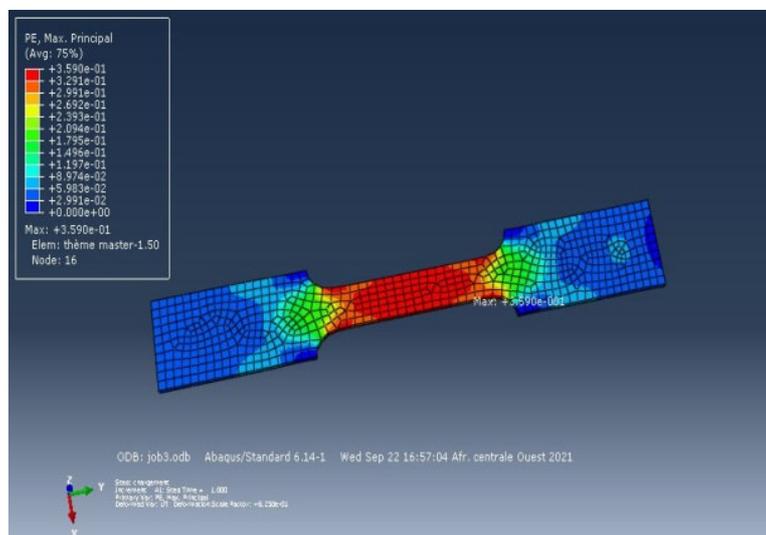
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III-10 : Distribution des contraintes et des déformations dans le modèle sollicité

La **Figure III-11** représente la superposition des résultats numériques et expérimentaux de l'essai de traction de l'acier 304L. Le graphe exprime l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation à une température ambiante (25°C). On remarque une bonne concordance entre les résultats numériques et ceux obtenus expérimentalement. Ceci confirme la bonne capacité du logiciel abaqus à prévoir le comportement non linéaire des matériaux.

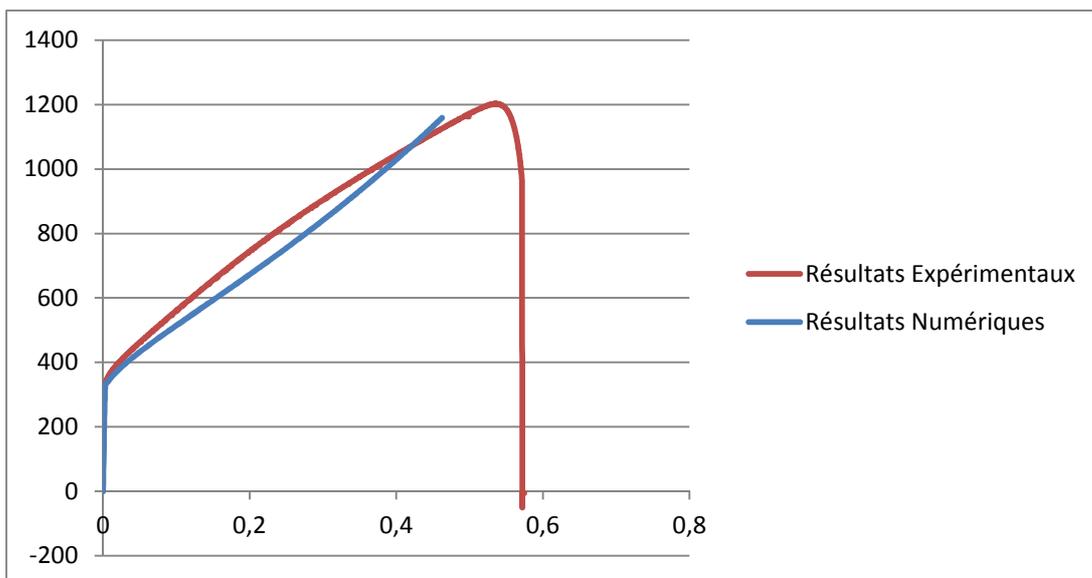


Figure III-11 : Courbe de traction vraie. Numérique VS expérimentale.

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif la simulation du comportement mécanique des aciers inoxydables austénitiques. L'acier qu'on a choisis pour effectuer notre étude est l'acier TRIP entièrement austénitique du type 304L. Pour mener à bien notre étude, nous avons divisé le travail en une partie synthèse bibliographique, une partie expérimentale et une partie numérique.

La partie expérimentale est réservée à l'identification expérimentale du comportement mécanique de l'acier 304L. Pour cela nous avons commencé l'étude par une caractérisation macroscopique du matériau (essai de traction) et ensuite, une caractérisation microscopique par le biais de la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage et la diffraction des rayons X. L'ensemble de ces résultats a complété les données de la littérature et a contribué à l'identification des paramètres matériaux et à la validation de la simulation numérique menée.

La partie numérique quant à elle est consacrée à la simulation du comportement mécanique en traction à l'aide du code de calcul éléments finis Abaqus. Les résultats de simulation ont été en bon accord avec les résultats expérimentaux. Ceci témoigne de la bonne capacité du code de calcul abaqus à prévoir le comportement des aciers inoxydables austénitiques.

Références

Chapitre 1 :

- [1] J.BARALIS G. MAEDER : précis métallurgie, édition Nathan, Paris 1997, p.102.
- [2] Badji riad Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205, these Phd 2008
- [3] M. Colombie et coll Matériaux métalliques, DUNOD Paris, 2000.
- [4] A. Desestret, J. Charles. « Les aciers inoxydables austéno-ferritiques », dans les aciers inoxydables, Editions de physique, Les Ulis, 1990.
- [5] El Bartali, A.; Apport des mesures de champs cinématiques à l'étude des micros mécanismes d'endommagement en fatigue plastique d'un acier inoxydable duplex, these Phd 2007.
- [6] Techniques de l'ingénieur, Traité matériaux métalliques, M 4
- [7] Guide pratique pour le travail des aciers inoxydables duplex, première édition.
- [8] Kubaschewski.O Diffusion des éléments dans le fer solide et liquide. Rapport du comité technique n° 0,009 du VDEH, Düsseldorf 1978
- [9] Guimaraes, J.R.C., De Oliveira, F.F., Work Hardening and Martensitic Transformation In Fe-27%Ni-0.23%C At 263k. Scripta Metall. A, 13, Pp537-542, (1979).
- [10] Najafi-Zadeh, A., Harmelin, M., Chappuis, G., Lehr, F., Rapport De Recherche 160, Ensta, (1982).
- [11] Narutani, T., Olson, G.B., Cohen, M., Proc. Icomat , (1982)
- [12] Iwamoto T, Tsuta T Computational Simulation Of The Dependence Of The Austenite Grain Size On The Deformation Behavior Of Trip Steels. Int.J.Plast. 16, P.791-804, (2000).
- [13] Miller Mp, McDowell Dl Modelling Large Strain Multiaxial Effects In Fcc Polycrystals. Int J Plast 12(7):875–902, (1996).

Chapitre 2 :

[14] Fiche technique du produit AK Steel. Acier inoxydable 304/304L

[15] Mitter. W., Umwandlungsplastizität Und Ihre Berücksichtigung Bei Der Berechnung Von Eigenspannungen. Materialkundlich-Technische, Stuttgart, Allemagne, (1987).

Chapitre 3 :

[16] "ABAQUS CEO Interview". Archived from the original on 18 July 2014. Retrieved 4 December 2012.

[17]. PATRICKH ROZICHI. « Formation ABAQUS » Université de Nantes, France, 2007.

[18]. M. SARTOR, « Eléments finis » Notes de cours, Chapitre 01

[19]. MEFTEH KAMEL, « Cours : Introduction général au logiciel Abaqus » université de Biskra, 2013.