

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de la construction

Département Génie Mécanique

Spécialité : Comportement et Mise en Forme des Matériaux



MEMOIRE

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme master

Etude de fatigue Thermomécanique de l'acier Inoxydable 304L

Par

OUDNI yacine et ASSOUS aghiles

Devant le jury composé de :

Mr OULD OUALI Mouhand

Mr SEDJAL Hamid

MR DJERIDI Rachid

Mr FERHOUM Rabah

Président

Directeur de mémoire

Examineur

Examineur

PROMOTION 2013 / 2014

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance, et vive gratitude à monsieur H, SEDJAL, pour avoir proposé, dirigé, suivi constamment le progrès de ce mémoire, et avoir consacré à l'encadrement de notre mémoire un temps et une disponibilité d'esprit considérable, et pour son soutien permanent.

Nous adressons nos remerciements aux fonctionnaires des bibliothèques de génie mécanique et de génie civil, Madame BAGUENANE, et à toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, jusqu'à l'aboutissement final de ce modeste travail.

Que messieurs le président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de lire et de juger ce mémoire.

Dédicaces

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à mes chères parents et, ma sœur, mon père, ma sœur. et ma femme.

Je le dédie aussi à tous mes amis

A mon binôme Aghies et sa famille

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réussite.

OUONI yacine

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents et toute ma famille

Mon binôme et sa famille

Tous ceux qui ont participé d'une manière ou d'une autre

ASSOUS Aghies

Sommaire

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

Chapitre I

généralités sur les aciers inoxydables

I.1. Introduction	2
I.2. Définition de l'acier inoxydable	2
I.3. Historique des aciers inoxydables	3
I.4. Propriétés et applications	5
I.4.1. Propriété de mise en forme	5
I.4.2. Propriétés physique	5
I.4.3. Propriétés mécanique	5
I.4.4. Propriété magnétique	6
I.5. Compositions chimiques	6
I.6 Diagramme Fe-C	7
I.7 Diagramme fer-Cr	8
I.8 Diagramme Fe-Cr-Ni	9
I.9 Les phases de références.	10
I.10. Influence des éléments d'additions	11
I.10.1. Les éléments alpha-gène	11
I.10.2. Les éléments gamma-gène	11
I.11. Classification des aciers inoxydables	12
I.11.1. aciers inoxydables austénitiques	12
I.12. Les modèles de comportement	13
I.12.1. Modèle de Pryce et Andrew	13
I.12.2. Modèle de Schaeffler	14
I.13. Effet TRIP (Transformation Induced Plasticity) dans les aciers	15
I.13.1. Etude microscopique de l'effet TRIP	15
I.13.1.1. La phase martensitique	16
I.13.1.2. La Morphologie de la martensite	17
I.13.2. Etude macroscopique de l'effet TRIP dans les aciers	19
I.13.2.1. Mécanismes responsables de l'effet TRIP	19

I.14. Aciers à effet TRIP	21
I.14.1 Présentation	21
I.14.2 définition de l'effet TRIP	22
I.14.3. Domaine d'application	22
I.15. Conclusion	22

Chapitre II

Fatigue , et Fatigue thermique des aciers inoxydables

II.1. Introduction	23
II.2. Historique	23
II.3. Définition de la fatigue mécanique	24
II.4. Comportement en fatigue	25
II.5. Courbe de WOLHER	26
II.5.1. Représentation de la courbe de WOLHER	26
II.6. Les différents types de chargement	27
II.6.1. Notion de chargement cyclique	27
II.6.2 Etat de contrainte	28
II.6.3. Les différents états de contrainte	29
II.6.4. Rapport de charge	30
II.6.5. Les modèles mathématiques de courbe de WOHLER	31
II.7. La fatigue thermique	31
II.7.1. Le phénomène de fatigue thermique	31
II.8. conclusion	33

Chapitre III

Méthode des éléments finis

III.1 Introduction	34
III.2 historique	35
III.2.1 La mécanique des milieux discrets	

III.2.2 La mécanique des milieux continus	36
III.3 .3 Démarche éléments finis	37
III.3.3.1 Formulation du problème physique à étudier	38
III.3 .3.2 Discrétisation géométrique	38
III.3 .3.3 Fonctions d'interpolation pour un élément	39
III.3 .3.4 Construction des matrices élémentaires	41
III.3 .3.5 Assemblage	42
III.3 .3.6 Introduction des condition aux limites	42
III.3.4 Utilisation d'un logiciel éléments finis	42
III.3.4.1 Déroulement d'une étude	43
III.3.4.2 Analyse du problème	43
III.3.4.3 Choix du modèle.....	43
III.3.4.4 Choix du type d'éléments	43
III.3.4.5 Choix du maillage	44
III.3.4.6 Hypothèses de comportement	44
III.3.4.7 Création et vérification des données	44
III.3.4.8 Exécutions du calcul	44
III.3.4.9 Exploitation des résultats	45
III.4. Organigramme d'un logiciel éléments finis	46
III.5 Conclusion	47

Chapitre IV

Simulation numérique

IV.1 Introduction.....	48
IV.2 But de l'étude	48
IV.3 Description de l'essai	49
IV.3.1 L'éprouvette	49
IV.4 Etude statique	50
IV.4.1 Résultats des études statiques	53
IV.4.2 Interprétation des résultats statiques	60
IV.5 Etude dynamique	60
IV.5.1 Résultats des études dynamiques	62
IV.5.1 Comparaison	66
IV.5.3 Interprétation des résultats	67
Conclusion générale	69

Liste des figures

Liste des Figures

Figure	Légende	Page
Fig.I.1	Etape de formation d'un oxyde de type $(Fe, Cr)_2O_3$ dans un milieu humide	2
Fig.I.2	variété allotropique du fer pur	7
Fig.I.3	Diagramme binaire fer-carbone	8
Fig.I.4	diagramme d'équilibre binaire Fer-Chrome	9
Fig.I.5	Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel. (Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ)	10
Fig.I.6	Diagramme de Pryce et Andrew donnant la structure des aciers inoxydables	13
Fig.I.7	Diagramme de Schaeffler	14
Fig.I.8	Changement de forme associé à la transformation martensitique	15
Fig.I.9	Changement de structure cristalline de l'austénite γ en martensite α dans les aciers à effet TRIP	16
Fig.I.10	Variantes de martensite	17
Fig.I.11	Morphologie de la martensite en fonction de la teneur en carbone de l'acier	18
Fig.I.12	Orientation des plaquettes de martensite lors d'une transformation martensitique	20
Fig.I.13	Mécanisme de Greenwood-Johnson	21
Fig.II.1	Réactions d'un matériau soumis à un chargement cyclique	25
Fig.II.2	Courbe de Wöhler et zone de fatigue	26
Fig.II.3	Amplitude constante et amplitude variable	28
Fig.II.4	Etat de contrainte uniaxial	29
Fig.II.5	Etat de contrainte multiaxial	29
Fig.II.6	Différents types de sollicitation	30
Fig.II.7	Classification des différents types de fatigue oligocyclique selon Spera	32
Fig.III.1	Erreur de discrétisation géométrique	39

Liste des figures

Fig.III.	Organigramme d'un logiciel éléments finis	46
Fig.IV.1	Eprouvette de traction normalisée	49
Fig.IV.2	Eprouvette avec entaille	50
Fig.IV.3	Informations sur le maillage	52
Fig.IV.4	Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à T=20°C	53
Fig.IV.5	Eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes	54
Fig.IV.6	Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à T=100°C	55
Fig.IV.7	Eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes	55
Fig.IV.8	Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à T=200°C	56
Fig.IV.9	Eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes1	57
Fig.IV.10	Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à T=300°C	58
Fig.IV.11	Eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes1	59
Fig.IV.12	Courbes superposées Contraintes rép en fonction des contraintes app	60
Fig.IV.13	La courbe de fatigue S-N de l'acier austénitique	61
Fig.IV.14	Courbe de wohler a (T=20°C).	62
Fig.IV.15	Courbe de wohler a (T=100°C).	63
Fig.IV.16	Courbe de wohler a a (T=200°C).	63
Fig.IV.17	Courbe de wohler a (T=300°C).	64
Fig.IV.18	Courbes superposes de wohler	65
Fig.IV.19	Courbe de fatigue mécanique SN	66
Fig.IV.20	Courbes de fatigue S-N superposées	67

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Légende	Page
Tab.I.1	Composition en % massique de l'acier inoxydable austénitique de type 304L	6
Tab. IV. 1	Propriété du matériau	51
Tab. IV. 2	Actions extérieures	51
Tab.IV.3	Informations sur le maillage	52
Tab.IV.4	Contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées	53
Tab.IV.5	Contraintes rép en fonction des contraintes app à T=100 °C	54
Tab.IV.6	Contraintes rép en fonction des contraintes app à T=200 °C	56
Tab.IV.7	Contraintes rép en fonction des contraintes app à T=300 °C	57
Tab.IV.8	Contraintes appliquées-nombres de cycles	62
Tab.IV.9	Contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle	62
Tab.IV.10	contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle	63
Tab.IV.11	contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle	64
Tab.IV.12	Paramètres des courbes de Wohler	65
Tab.IV.13	Contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle	66

Notations utilisées

Notations utilisées

m	Masse
σ_{app}	Contrainte appliquée
σ_e	La limite élastique
T	Température
t	Temps
f	Fréquence
C	Coefficient de frottement
Ω	Pulsation de la force d'excitation
E	Module de Young
G	Module de cisaillement
$\sigma_{r\grave{e}p}$	Contrainte repense
q	Degrés de liberté
x	Vecteur propre
$\beta(t)$	Fonction d'évaluation d'amplitude
$[K]$	Matrice de raideur
$[M]$	Matrice de masse
$[q]$	Vecteur des déplacements modaux
$[p]$	Matrice englobant tous les vecteurs propres
$[C]$	Matrice d'amortissement
v	Déplacement transversale
u	Déplacement longitudinale
p	Charges réparties
I	Moment d'inertie
$\phi(x)$	Fonction de forme
θ	Angle de déformation
$[\phi]$	Matrice englobant les matrices de formes
$E_p^{(e)}$	Énergie potentielle élémentaire
$[T]$	Matrice de transfert
$[q^{(e)}]$	Vecteurs et déplacements élémentaires
$[k^{(e)}]$	Matrice de raideur élémentaire
$E_c^{(e)}$	Énergie cinétique élémentaire
$[m^{(e)}]$	Matrice de masse élémentaire
l	Longueur de l'élément
L	Longueur totale de la structure
v	Effort tranchant
M	Moment autour
N	Effort axiale
σ	Contrainte normale
ε	Déformation axiale

Introduction générale

Introduction générale

L'intérêt que porte l'homme pour les aciers inoxydables résulte du rôle de ces derniers dans divers domaines : vie quotidienne, industrie mécanique, agro-alimentaireets. Et en vu d'amélioration de leurs utilisations, les aciers a effet TRIP présentent une bonne combinaison entre résistance et ductilité. Leurs utilisations permet une meilleure malléabilité des tôles, améliorant ainsi leurs rondement.

Au cours d'un chargement déchargement répété, même a des contraintes appliquées qui sont inférieurs aux contraintes limites. Et a un certain nombre de fluctuations cycliques les objets sont affaiblies notamment ceux fabriqués en métal, ce phénomène est connue sous le nom de fatigue, qui est la cause de rupture.

Dans notre travail, nous allons essayer de simuler numériquement la fatigue des aciers inoxydables à effets TRIP, l'acier en question est l'acier AISI 304L. Pour ce faire nous avons réalisés des essais thermomécaniques « contraintes mécaniques et effets thermiques ».

Ce travail comporte deux parties principales, la première présente une synthèse bibliographique partagée en trois chapitres. Le premier englobe des généralités sur les aciers inoxydables, et des différents types qui existent. Le deuxième est une description générale du phénomène de fatigue, et principalement la fatigue thermique.

Le troisième traite quelque généralités de la méthode des éléments finis ainsi que l'utilisation d'un logiciel a élément finis et ses différents procédés.

Le chapitre IV montre Les étapes qu'on a suivies pour la réalisation de notre travail, les paramètres utilisés, c'est-à-dire les conditions de déroulement des essais et aussi une présentation des outils employés.

Il est aussi scindé de deux parties, statique et dynamique, et il regroupe aussi les résultats et discussions des différents résultats et comparaisons lors d'essais de fatigue 'thermomécanique' a température et contraintes mécanique variantes

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale sur nos principaux résultats et les perspectives envisagés pour approfondir nos recherches.

I.1 Introduction

L'acier inoxydable a un grand rôle dans divers domaines : la vie quotidienne, industrie mécanique, agro-alimentaires, etc. C'est une famille d'aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels, on ajoute essentiellement du chrome.

Le chapitre bibliographique ici présent, nous rappelle les généralités sur les aciers inoxydables, leur comportement, leurs principales propriétés ainsi que les mécanismes responsables de l'effet TRIP.

I.2 Définition de l'acier inoxydable

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer, ils contiennent des éléments d'addition comme le carbone, le nickel, le molybdène, etc. Pour éviter la précipitation des carbures de chrome, ils ont une faible teneur en carbone ($\%C < 1,2 \%$), et une teneur en chrome importante ($\%Cr > 10,5 \%$) pour passiver la surface de la pièce par formation d'une couche de Cr_2O_3 , cette couche protectrice d'oxyde de chrome procure une excellente résistance à la corrosion [1].

En milieu humide, il est constitué d'un oxyde de type $(Fe, Cr)_2O_3$, comme il est illustré sur la

figure.I.1:

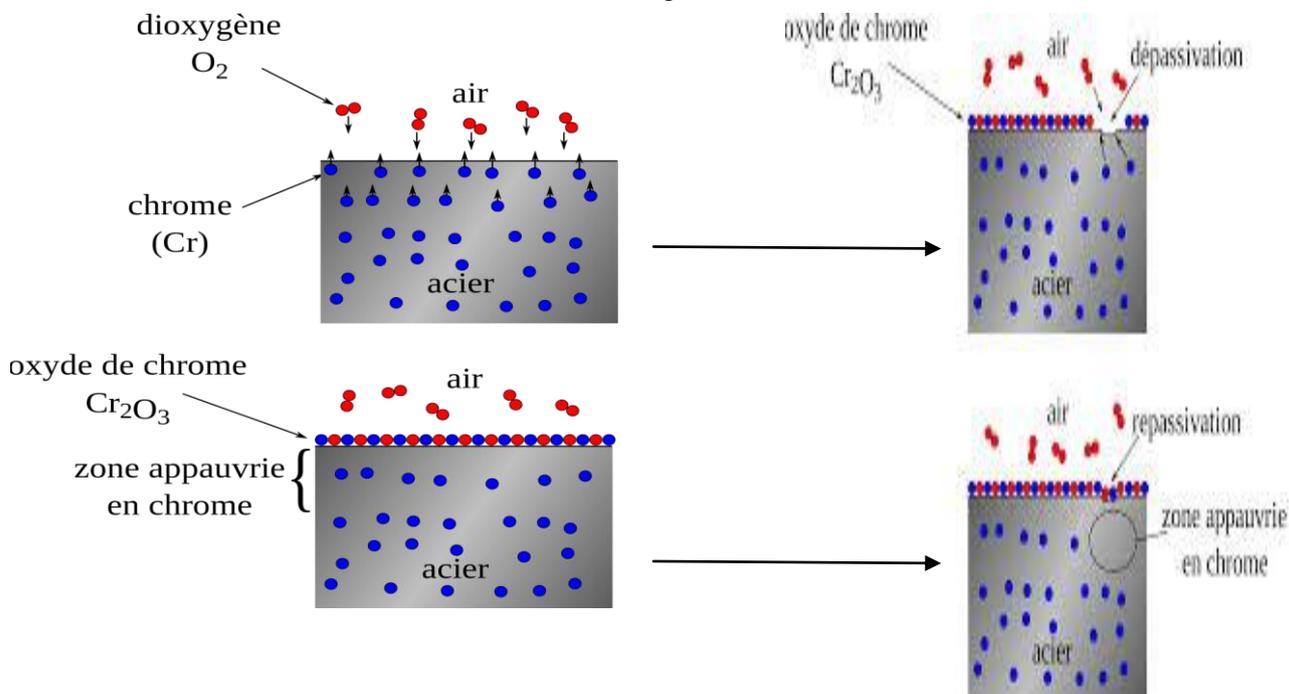


Figure.I.1-Etape de formation d'un oxyde de type $(Fe, Cr)_2O_3$ dans un milieu humide[1].

Les atomes de chrome « Cr » réagissent avec l'oxygène O_2 de l'air, pour former une couche invisible d'épaisseur de 1 à 10 nm qui protège l'acier inoxydable appelé : couche passive ou film protecteur passivant.

Si, la surface s'abîme, cette couche se reforme à chaque fois pour protéger l'acier, le maintenir à la fois inoxydable et résistant à la corrosion, ce procédé est appelé : auto-passivation.

Les paramètres gouvernant cette oxydation sont : le pH du milieu agressif environnant, et la teneur en chrome du matériau qui définiront le type de corrosion possible, d'autre part, la teneur en oxygène et la température du milieu agressif environnant rendront effectifs ou non l'oxydation/corrosion.

I.3 Historique des aciers inoxydables

Le fer est connu de l'homme depuis cinq mille ans, mais, se n'est qu'au dix-huitième siècle que les scientifiques font une série de découvertes, sur des métaux, jusque-là, inconnu.

Ainsi, en :

- 1751 : Le scientifique suédois **AXEL-FREDERICK-CRONSTEDT** a découvert le nickel « Ni ».
- 1778 : Un autre suédois **KARL-WILHELM-SCHEELE** a découvert le molybdène « Mo ».
- 1797 : En France, **NICOLAS-LOUIS –VAUQUELIN** identifie un nouveau métal qu'il appelle Chrome « Cr »
- 1900 : Quelques métallurgistes réalisent des expériences fructueuses sur des alliages de fer et du chrome, ils les trouvent exceptionnellement résistant à la corrosion, mais ne comprennent pas bien le phénomène.
- 1912 : En Allemagne **EDUARDE MAURER** et **BINAN STRAUVES**, se voient accordé le premier brevet pour produire des aciers inoxydables, composés de chrome et de nickel.

De nos jours, cette famille austénitique souvent a 18% de Cr et 8% de Ni représente 60% de la production mondiale d'aciers inoxydables.

- 1913 : **HARRY BREARLEY** développe des alliages de fer et de chrome extrêmement résistants, ces aciers inoxydables dit martensitique.
- 1915 : **F.BECKET ET C.DANTSIZEN** développent un autre type d'acier inoxydable les ferritiques
- 1910-1920 : En moins d'une décennie, trois branches généalogiques principales de l'acier inoxydable :
 - Les aciers inoxydables Austénitique.
 - Les aciers inoxydables Martensitique.
 - Les aciers inoxydables Ferritique.

Sont en plein essor, on les trouve dans une large gamme d'application.

- 1930 : En suède, des métallurgistes développent une nouvelle famille d'aciers inoxydables alliant les structures austénitiques et ferritique, pour créer les aciers inoxydables duplex, principalement utilisés, dans la pétrochimie et le dessalement d'eau de mer.

C'est, un matériau par excellence, il n'est pas étonnant qu'entre 1970 et 2010, la demande en aciers inoxydable et duplex, est décuplé de trois à trente million de tonnes par an.

Il est recyclable à 100% sans perte de qualité. Les aciers inoxydables permettent de produire des énergies alternatives, en tenant un rôle essentiel dans les piles à combustibles, la production des biogaz, et dans la recherche en fusion nucléaire. C'est une partie intégrante de nos vies quotidiennes.

I.4 Propriétés et applications

La principale propriété de ces aciers est leur excellente résistance à la corrosion, ce qui leur donne une durée de vie quasi - exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux, ils ont des caractéristiques mécaniques élevés, à basse comme à haute température (ténacité, ductilité, résistance mécanique ...). C'est pour cela que ces aciers jouent un rôle prépondérant dans l'industrie aéronautique, chimique et agroalimentaire [1].

I.4.1 Propriété de mise en forme

La fabrication et la transformation des aciers inoxydables s'effectuent en utilisant un large éventail de technologies, et, sont entièrement recyclable.

I.4.2 Propriétés physique

Une masse volumique de l'ordre de 7850 Kg/m^3

Une capacité thermique de $0.5 \text{ J/g.}^\circ\text{C}$ pour $T = 0^\circ\text{C}$ à 100°C

Une conductivité thermique de 16.2 W/m.K à 100°C

Les aciers inoxydables austénitiques ont un coefficient linéaire moyen de dilatation élevé environ $18.10^{-6} /^\circ\text{C}$. C'est pour cela qu'ils sont très sensible aux variations de températures, comme la fatigue thermique.

I.4.3 Propriétés mécanique

Limite d'élasticité inférieure à 300 MPa

Résistance à la rupture « R_m » inférieure à 650 MPa .

La résistance à la traction est : 558 MPa ;

L'allongement à la rupture est : 50% ;

Le module de Young est de : 2.10^5 MPa

Ces propriétés mécaniques peuvent être améliorées par : durcissement par solutions solide, par durcissement d'écrouissage, ou bien par durcissement de précipitation

I.4.4 Propriété magnétique

Les aciers inoxydables austénitiques présentent à température ambiante, une structure austénitique qui leur permet d'être paramagnétiques (amagnétiques).

Les aciers inoxydables ferritique et martensitique sont ferromagnétiques, suite à la présence de la ferrite et de la martensite [2].

I.5 Compositions chimiques

La composition de notre acier inoxydable austénitique de type 304L, est donnée dans le tableau N°01 suivant :

Tableau.I.1: Composition en % massique de l'acier inoxydable austénitique de type 304L

Référence	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	N	Fe
304 L	0.26	1.49	0.52	19.23	9.45	0.24	0.002	0.027	0.064	Bal

Ce sont des alliages métallique à base de fer (alliage : fer-carbone) à teneur en carbone variant de 0.02% à 1% (pour éviter la précipitation de carbures aux joints de grains) et qui doivent contenir au moins 10.5 % de chrome et contenant éventuellement d'autre éléments d'alliage de type métallique tels que : le nickel, le molybdène, le titane, soit de type interstitiel comme : le carbone ou l'azote [1].

I.6 Diagramme Fe-C

Le diagramme Fe-C est utilisé pour l'étude des phases dans les aciers et la fonte [1]. Le Carbone favorise la formation de l'austénite. Sa solubilité maximale dans l'austénite à la température du palier eutectique (1150 °C) est de 2.1%, elle est de 0.04% à la température du palier eutectoïde (727°C) et de 0.15% dans la ferrite δ à la température du palier péritectique, comme c'est montré sur la (figure.I.3)

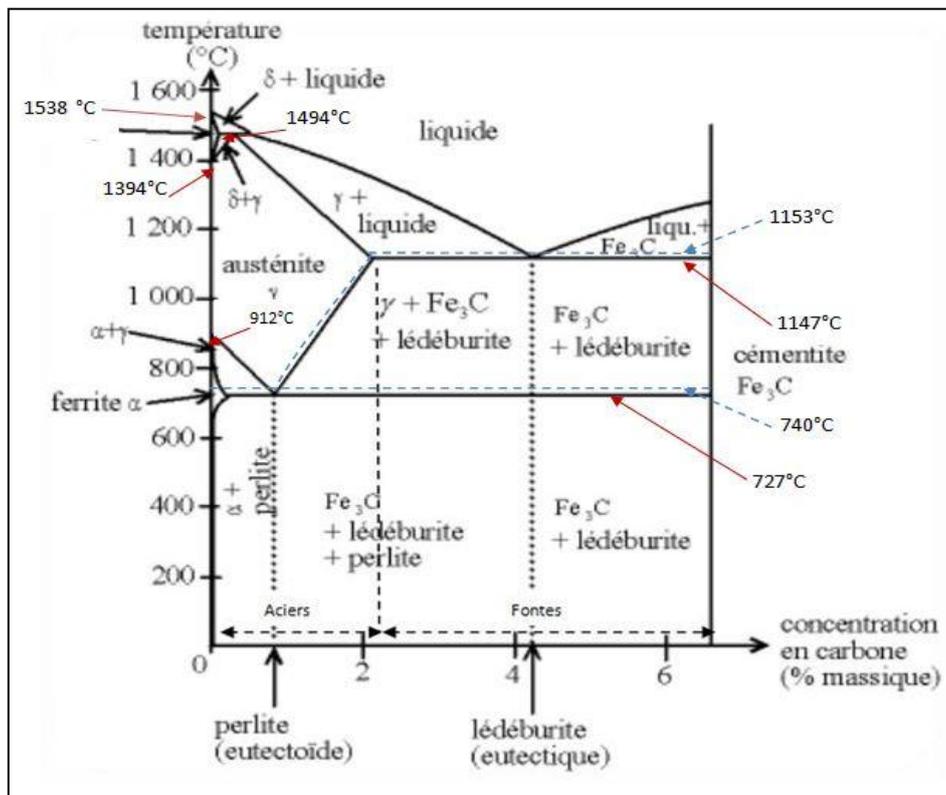


Figure.I.3-Diagramme binaire fer-carbone

I.7 Diagramme fer-Cr

La (figure.I.4) ci-dessous présente le diagramme d'équilibre binaire Fer-Chrome . Le chrome est un élément dit alphasène. Il favorise fortement la forme ferritique.

Sur le diagramme de phase Fe-Cr, le domaine austénitique est assez réduit, et, est représenté par un domaine limité appelé boucle gamma (Boucle γ).

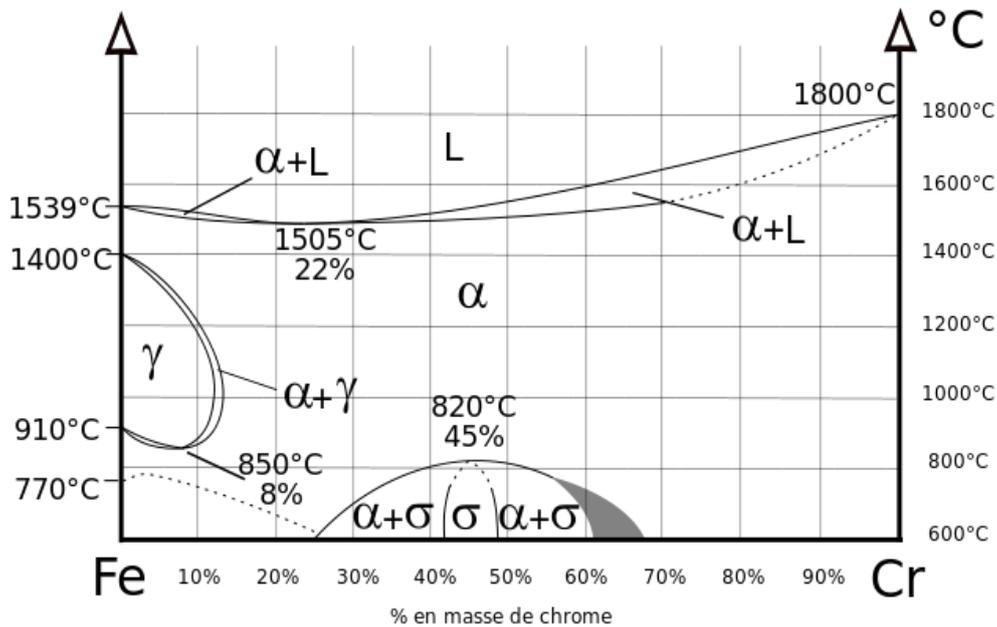


Figure.I.4-diagramme d'équilibre binaire Fer-Chrome[1].

Pour des teneurs supérieures à 11.5% de chrome, l'alliage reste ferritique dans toute la plage de températures. Il y a disparition de la transformation allotropique $Fe\alpha-Fe\gamma$.

Entre 10.5% et 11.5% de chrome, l'alliage est biphasé : ferrite + austénite, dans certaines plages de température.

Pour des teneurs inférieures à 10.5%, il subit une transformation ferrite / austénite.

On notera que le chrome jusqu'à 8% abaisse la température A_3 et se comporte comme un élément gammagène. Ce comportement s'inverse pour des teneurs supérieures à 8%, point à partir duquel, cette température augmente.

Au-delà de 12.7% de chrome, dans le cadre du refroidissement lent, il peut y avoir formation de phase intermétallique sigma (δ) à des températures comprises entre 820°C et 475°C. Elle précipite aux joints de grains ou dans la matrice ferritique entraînant une fragilité.

Une hypertrempe consiste à refroidir rapidement (trempe à l'eau) l'acier au-dessous de 475°C pour bloquer la formation de phase (δ)

I.8 Diagramme Fe-Cr-Ni

Contrairement au Chrome, le Nickel étant de structure Cubique à Faces Centrées favorise la formation d'une solution solide austénitique. Le diagramme de la (figure.I.5) montre que le domaine d'existence de la phase de γ augmente avec la teneur en nickel à température ambiante, tandis que pour des teneurs faibles (< 5 à 6%) la structure peut être ferritique. Entre ces deux teneurs, la structure est biphasée austéno-ferritique [1].

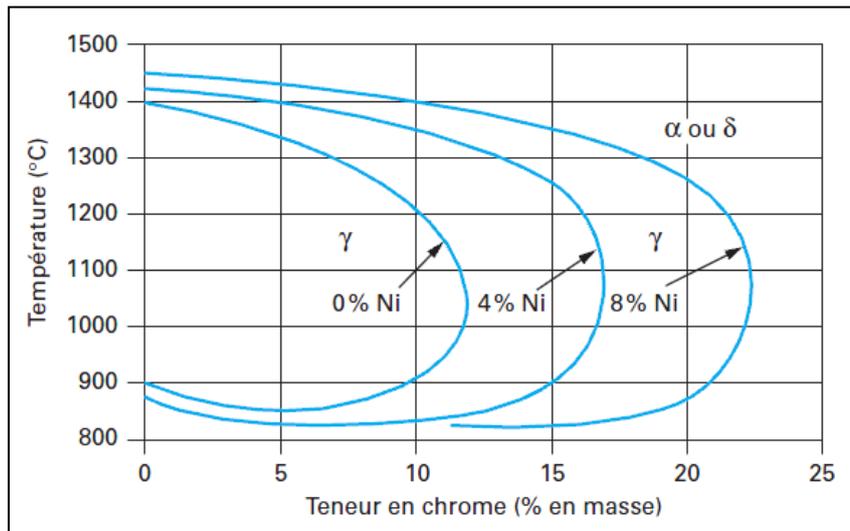


Figure.I.5-Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel. (Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ [1]).

I.9 Les phases de références

Il existe trois différentes formes allotropiques du fer pur [1], illustre sur la figure02 ci –dessous :

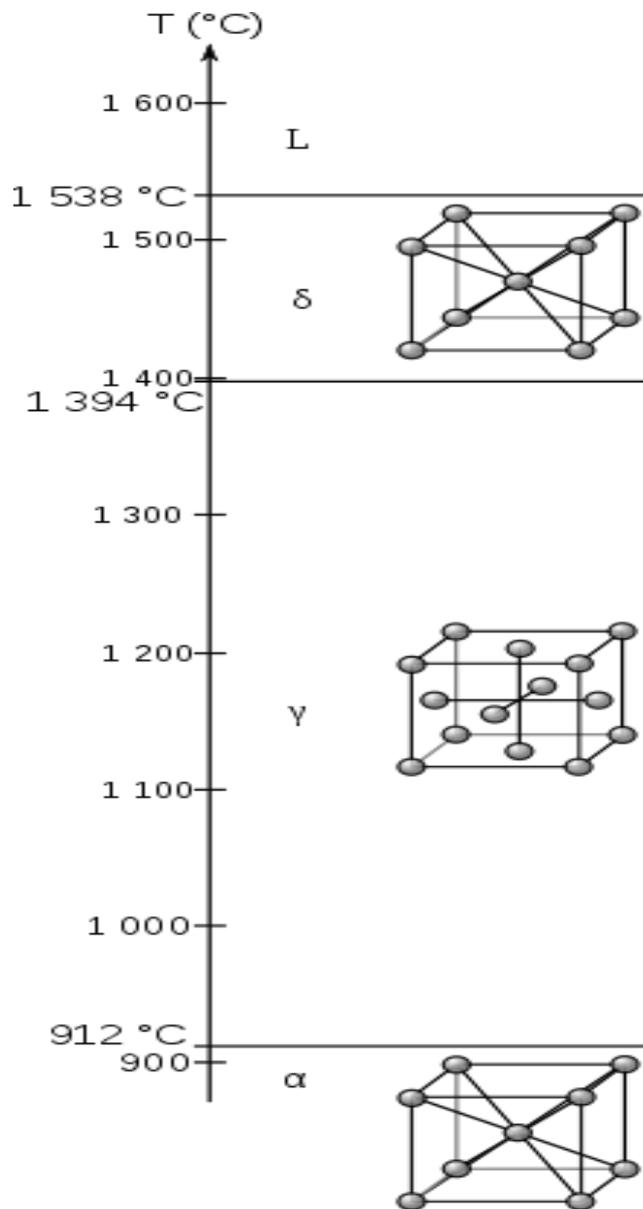


Figure.I.2-variété allotropique du fer pur

Le fer pur possède trois variétés de structure cristalline entre 0°C et la température de fusion :

Entre la température ambiante et 912°C, le fer a une structure cubique centrée, c'est le fer α .

À partir de 912°C, il se transforme en fer γ dont la structure est cubique à faces centrées.

Une nouvelle transformation intervient de 1394°C jusqu'à 1538°C, pour donner le fer δ dont la structure est cubique centrée.

I.10 Influence des éléments d'aditions

La structure de l'acier dépend de sa composition chimique, on distingue deux catégories d'éléments, d'une part les éléments **alphagène** : chrome, molybdène, aluminium, silicium, titane, tungstène ; ils réduisent le domaine austénitique γ , au profit de la ferrite α .

D'autre part, les éléments **gammagène** : Nickel, carbone, azote, cobalt, manganèse ; ils élargissent le domaine austénitique γ

I.10.1 Les éléments alphagène

- Le chrome « Cr » :

Élément de base de tous les aciers inoxydables, qui offrent la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif, en se combinant avec l'oxygène, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud.

Un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

- Le molybdène « Mo » :

Ajouter à raison de quelques pourcents, améliore la qualité du film passif, en particulier en milieux chlorés et acides, à l'exception des solutions nitriques bouillantes.

Le molybdène augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance la corrosion inter - cristalline et par piqûres [3].

I.10.2 Les éléments gammagène

- Le nickel « Ni » :

Au delà de 6% à 8%, sa présence se traduit par un effet gammagène et l'acier devient austénitique à toute température. Il élargit ainsi, le domaine d'existence de l'austénite. Il favorise la mise en œuvre par déformation plastique, améliore la résistance à la corrosion en particulier la résistance à la corrosion sous tension, il affine les grains et améliore la ductilité.

Le nickel a une influence favorable sur la trempabilité, la résistance au choc et la ténacité des calaminés.

I.11 Classification des aciers inoxydables

Il existe quatre principales familles d'aciers inoxydables :

- **les aciers inoxydables austénitiques** présentent une structure CFC qui leur permet d'être amagnétiques (paramagnétique)
- **les aciers inoxydables martensitiques** sont magnétiques (ferromagnétique), suite à la présence de la martensite
- **les aciers inoxydables ferritique** présentent une structure CC, ils sont magnétique (ferromagnétique), suite à la présence de la ferrite
- **les aciers inoxydables austéno-ferritique** présentent, une phase austénitique amagnétique CFC, et une phase ferritique magnétique CC.

I.11.1 aciers inoxydables austénitiques

Ces aciers ont une structure cubique à faces centrées à température ambiante. Cette structure est amagnétique et peut être conservée à température ambiante grâce à des éléments d'alliage approprié.

Les aciers austénitiques contiennent suffisamment de chrome pour offrir une résistance à la corrosion et du nickel pour assurer la structure austénitique à la température ambiante, et ils peuvent augmenter leurs propriétés mécaniques par écrouissage.

- La composition de base des aciers austénitiques est 18% de chrome et 8% de Nickel (acier inoxydable 18.8).
- Ils sont très résistants à la corrosion,
- Ils sont aussi très ductiles ($A\% \leq 45\%$),
- Ils présentent une ductilité et ténacité exceptionnelle,
- Leur limite d'élasticité est comprise entre 350 et 400 MPa,
- Transformation partielle de l'austénite en martensite.

I.12 Les modèles de comportement

Permettent d'évaluer les proportions des phases α et γ de l'acier, à partir des teneurs en chrome et en nickel équivalentes

On distingue deux modèles principaux :

I.12.1 Modèle de Pryce et Andrew

Pour les produits laminés, le modèle de Pryce et Andrew propose un diagramme pour prédire la structure de l'acier en fonction de la composition chimique [4].

Chrome équivalent : $(Cr)_{\text{éq}} = \%Cr + 3(\%Si) + (\%Mo)$

Nickel équivalent : $(Ni)_{\text{éq}} = (\%Ni) + 0.5(\%Mn) + 21(\%C) + 11.5(\%N)$

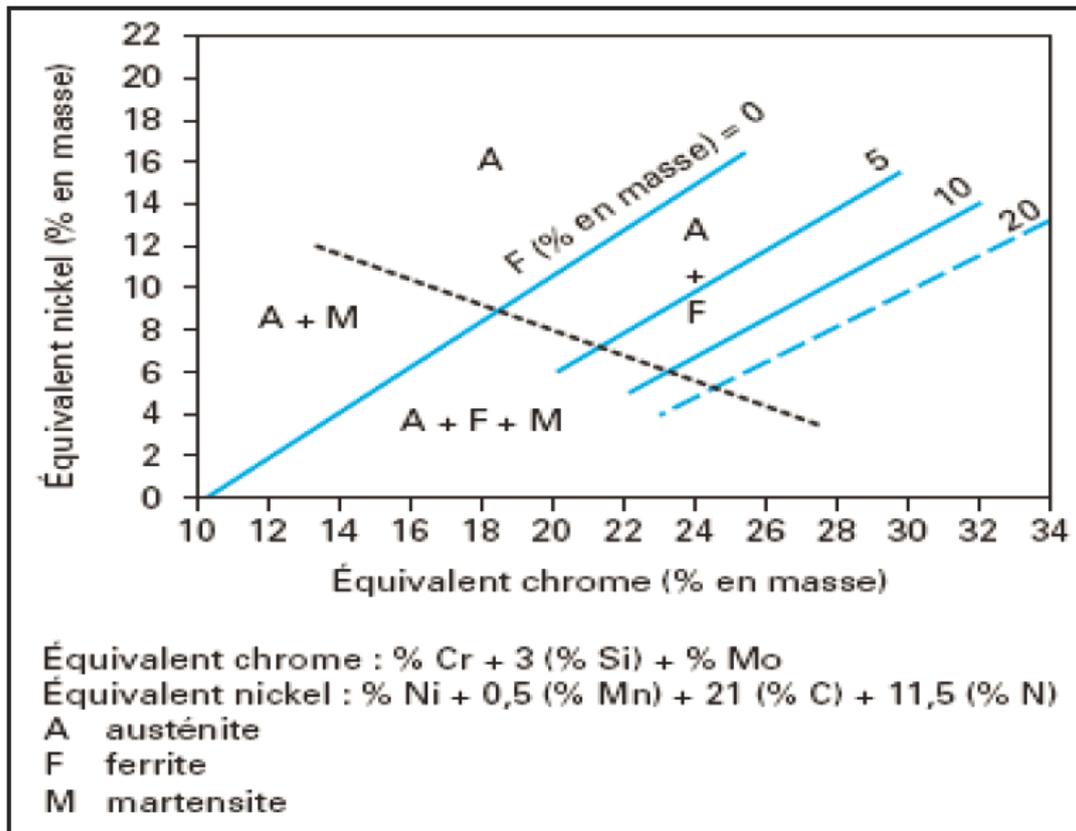


Figure.I.6-Diagramme de Pryce et Andrew donnant la structure des aciers inoxydables [4].

I.12.2 Modèle de Schaeffler

L'idée de distinguer entre éléments α -gènes et γ -gènes a conduit Schaeffler 1949 [5] à proposer un diagramme pour prédire la structure de l'acier en fonction du pourcentage en chrome et nickel équivalent

Chrome équivalent : $(Cr)_{\text{éq}} = \%Cr + 1,5\%Mo + 0,48\%Si + 2,3\%V + 1,75\%Nb + 2,5\%Al$

Nickel équivalent : $(Ni)_{\text{éq}} = \%Ni + \%Co + 0,1\%Mn - 0,01\%Mn^2 + 18\%N + 3$

Ces équivalents permettent de déterminer à la température ambiante les domaines de l'austénite, de la ferrite ou de la martensite d'un acier inoxydable à l'aide de diagramme de Schaeffler

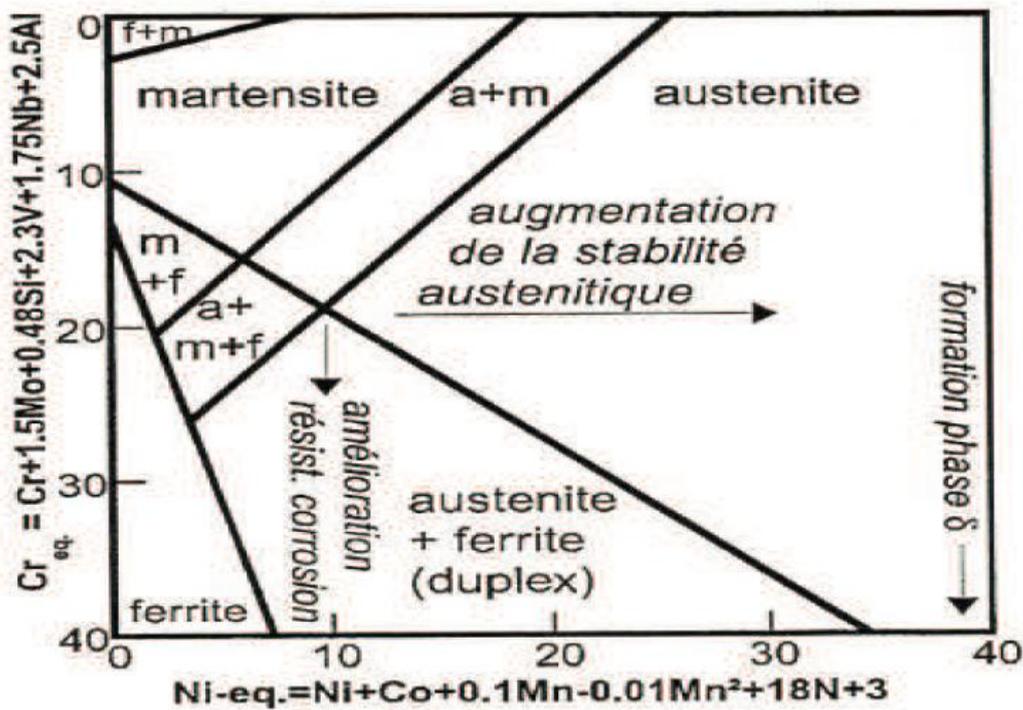


Figure.I.7-Diagramme de Schaeffler. [5]

Les teneurs sont affectées de coefficients établis par expérience, afin de tenir compte du poids de chacun des éléments.

I.13 Effet TRIP (Transformation Induced Plasticity) dans les aciers

I.13.1 Etude microscopique de l'effet TRIP

Transformation Induced Plasticity, cette expression en anglais indique que la plasticité est induite par transformation, les termes de martensite et de transformation martensitique sont aussi bien utilisés dans les alliages ferreux que les non-ferreux.

Dans les aciers à effet TRIP, cette transformation correspond à un changement de phase particulier qui se produit à l'état solide et qui est à l'origine des propriétés remarquables.

C'est une transformation cristallographique displacives[6]. Elle se produit sans aucun phénomène de diffusion atomique.

La transformation se fait par le déplacement des atomes de leurs sites dans la phase mère vers des sites voisins qui définissent la configuration de la nouvelle phase. Pour que la

transformation martensitique se produise ,la vitesse de refroidissement doit être élevée ce qui ne permet pas aux atomes de se déplacer par diffusion .

Il en résulte une déformation macroscopique sous la forme d'un cisaillement qui se compense par une déformation supplémentaire et la plastification de l'austénite .cette transformation elle est caractérisée par un changement de volume et par un changement de forme laissant un plan invariant, et par une énergie de déformation élastique (figure I.8) [7].

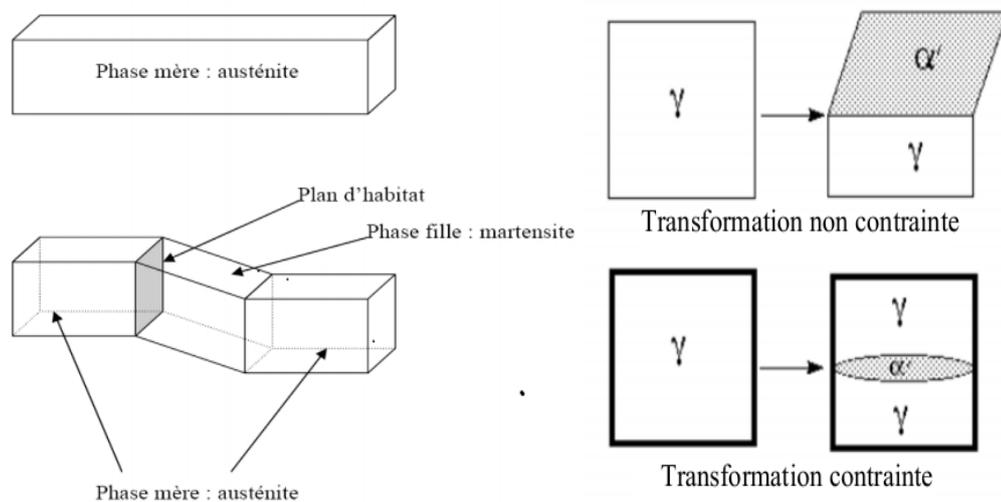


Figure.I.8-Changement de forme associé à la transformation martensitique[8]

I.13.1.1 La phase martensitique

La structure et la morphologie de la martensite varient en fonction de la composition chimique et de la température à laquelle se produit la transformation .dans le cas des aciers la martensite possède trois types de structure cristalline[9] :

- La martensite α' : à une structure tétragonal (ou quadratique) centrée ,elle est observée dans les alliages binaires Fe-C et se retrouve dans les aciers TRIP industriels
- La martensite ϵ :a une structure hexagonale compacte HC.
- La martensite tétragonale à faces centrées TFC est observe dans les alliage Fe-Pd [9].

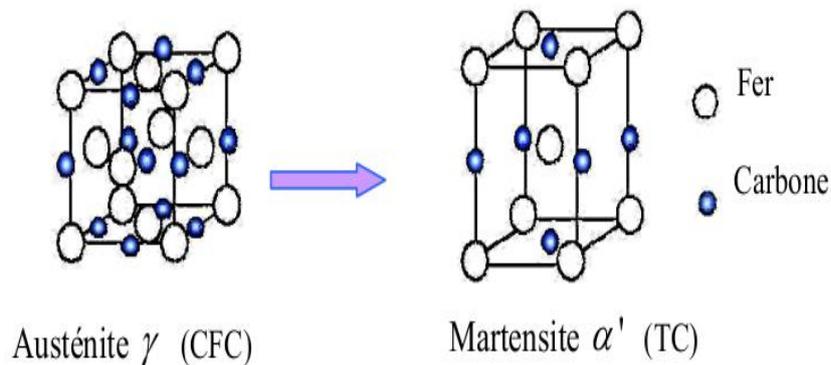


Figure.I.9-Changement de structure cristalline de l'austénite γ en martensite α' dans les aciers à effet TRIP [8]

La structure cristalline de la martensite varie en fonction de l'énergie de faute d'empilement :

- Dans le cas d'une forte énergie de faute d'empilement conduit à la formation directe de la martensite α' par le mécanisme $\gamma \rightarrow \alpha'$
- Alors qu'une faible énergie de faute d'empilement conduit à la formation de martensite ϵ , puis la phase α' se forme aux intersections des variantes de martensite ϵ .

Ce mécanisme indirecte de formation $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ a été observé dans les aciers inoxydables AISI3040 à faible teneur en Carbone [10].

Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de la composition chimique et de la température sur l'énergie de faute d'empilement (EFE).selon ces études en distingue deux comportement possibles :

- Le carbone et le nickel augmente L'EFE.
- Les autres éléments tels que Cr, Si, N diminue L'EFE

I.13.1.2 La Morphologie de la martensite

La morphologie de la martensite dépend de la composition chimique, des contraintes et déformations locales et de l'énergie de faute d'empilement elle peut être lenticulaire, sous forme de lattes, de papillons, de plaquettes d'aiguilles plates (figure I.10).



Figure.I.10-Variantes de martensite [11]

Des études et des observations microscopiques de la martensite nous révèlent deux principaux types de morphologie de la martensite sous forme de plaquettes ou sous forme de lattes. Ces deux morphologies dépendent de la teneur en carbone de l'acier .

La (figure.I.11), présente les domaines d'existence des deux morphologies de la martensite. De ce fait, la martensite en lattes est observée pour un acier à faible teneur en carbone, ne dépassant pas les 0,6%. Pour une teneur en carbone supérieure à 1%, seule la martensite en plaquettes est présente.

Enfin, pour des teneurs en carbone comprises entre 0,6% et 1%, les deux types de morphologie coexistent.

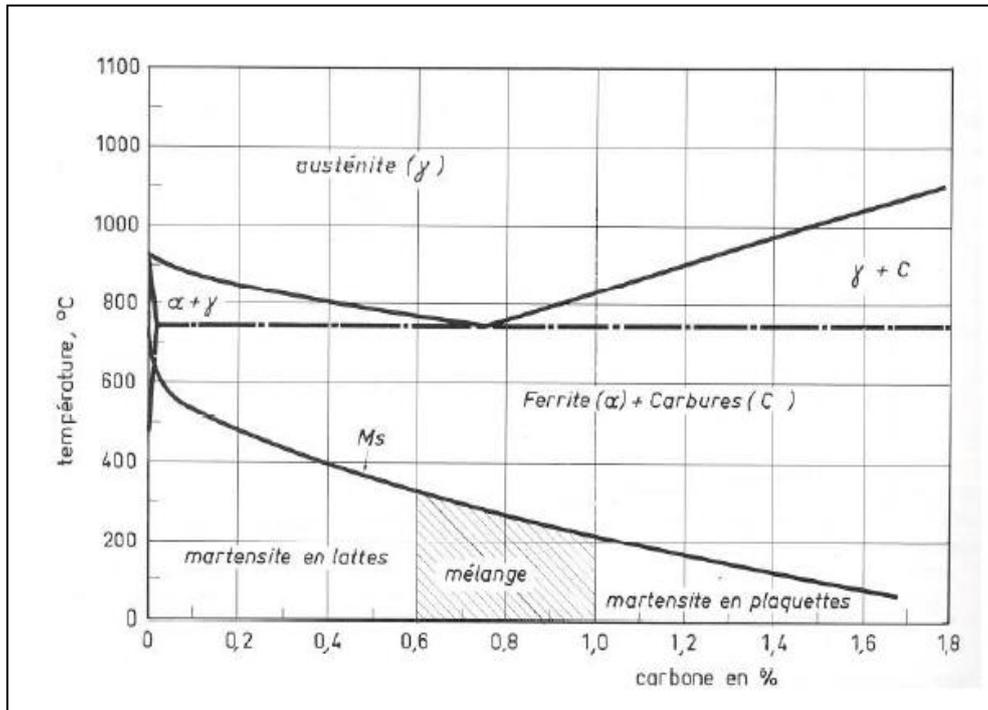


Figure.I.11-Morphologie de la martensite en fonction de la teneur en carbone de l'acier

I.13.2 Etude macroscopique de l'effet TRIP dans les aciers

La transformation martensite induit une déformation plastique macroscopique correspondant au phénomène de plasticité de transformation. La phase transformée en martensite accumule des contraintes qui peuvent être relaxées par une déformations plastiques sous forme de glissement de dislocations ou de macles.

Dans les aciers à effet TRIP, cette plasticité de transformation de l'austénite métastable se traduit par un changement soudain de la pente d'écrouissage

La plasticité de transformation est généralement définie comme un accroissement significatif de la plasticité pendant une transformation de phase. Une déformations plastique a lieu pour une contrainte externe applique, telle que la contrainte équivalente est inférieure à la limite d'élasticité du matériau

I.13.2.1 Mécanismes responsables de l'effet TRIP

la plupart des modèles de la plasticité de transformation sont basés sur deux mécanisme appelés respectivement effet Magee et effet Greenwood Johnson

- **Effet Magee**

La martensite apparait sous forme de plaquettes, sous l'effet d'une contrainte appliquée générant des contraintes de cisailent élevées dans la phase austénitique .

En absence de contrainte appliquée les plaquettes s'orientent aléatoirement .par contre, l'application d'une contrainte externe favorise l'orientation des plaquettes suivant une même direction, la résultante des contraintes de cisaillement ne sera donc pas nulle ,ce qui va engendre une déformation plastique macroscopique irréversible dans la direction de la contrainte appliquée.

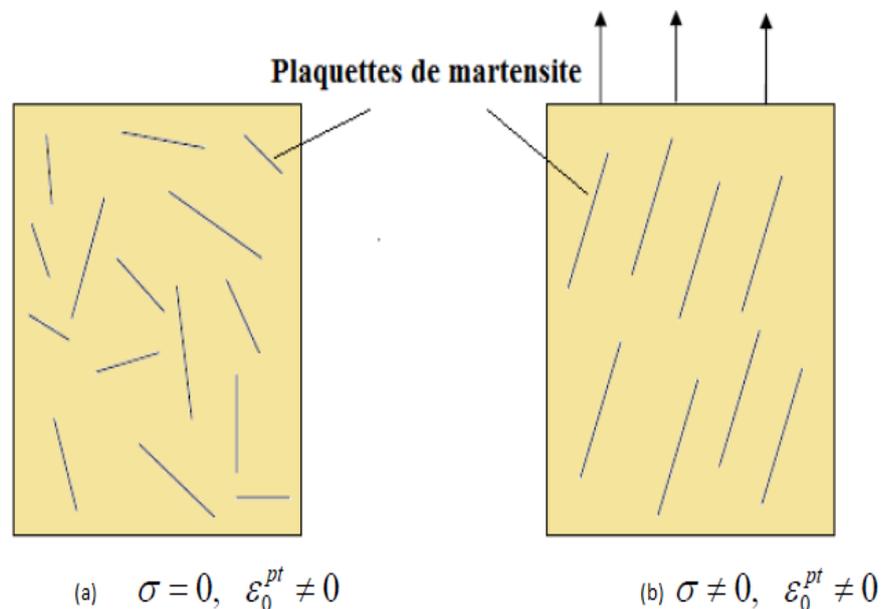


Figure.I.12-Orientation des plaquettes de martensite lors d'une transformation martensitique[12]

(a) :sans contrainte applique ;(b) avec une contrainte applique

ε_0^{pt} est la plasticité de transformation

- **Effet Greenwood Johnson**

la plasticité de transformation est due à la différence de compacité entre les phases initiales et finale, la phase initial est austénitique de structure cubique a faces centrées, contrairement a la phase finale qui est ferritiques de structures cubiques centrées, la différences de compacité entre ces deux structures induit un changement de volume lors de la transformation.

Dès qu'une contrainte est appliquée dans une direction donnée, les micro-plasticités sont concentrées dans la direction de la sollicitation, ce qui provoque l'effet TRIP.

Généralement, les micro-plasticités sont isotropes, on remarque un changement de volume d'un point de vue macroscopique .

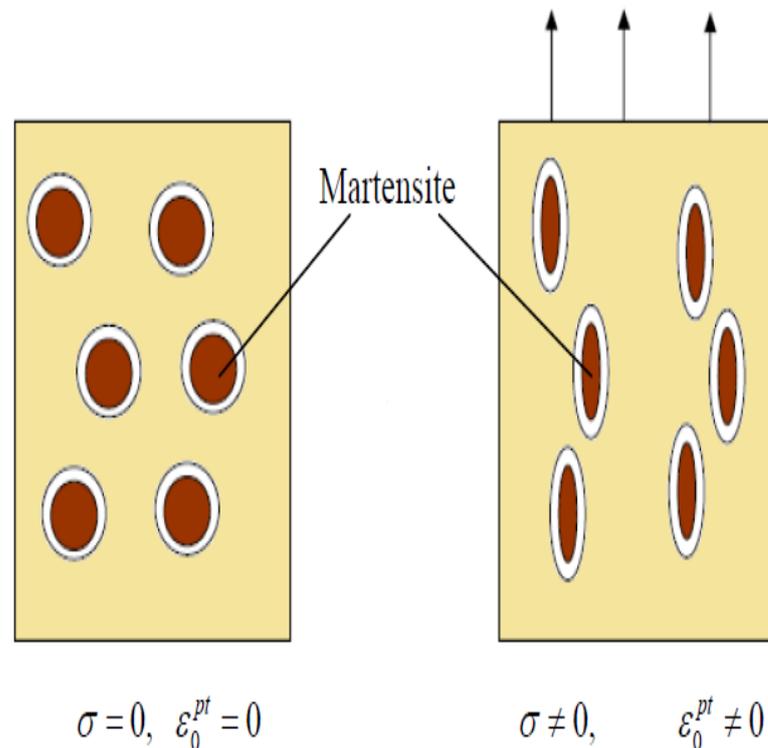


Figure.I.13-Mécanisme de Greenwood-Johnson[13]

- (a) : sans contrainte appliquée
 (b) :avec contrainte appliquée

I.14 Aciers à effet TRIP

I.14.1 Présentation

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.

Les aciers TRIP sont classés dans deux catégories, en fonction de leur microstructure

-aciers à effet TRIP entièrement austénitiques qui sont fortement alliés :Fe-Ni , AISI 304

-aciers TRIP multiphasés, qui sont faiblement alliés et seulement partiellement austénitiques .

I.14.2 définition de l'effet TRIP

La plasticité de transformation est une déformation macroscopique permanente, observée dans les matériaux cristallins subissant une transformation de phase provoquée par une contrainte équivalente inférieure à la limite d'élasticité de la phase la moins dure

I.14.3 Domaine d'application

Vu que ces aciers ont une grande capacité d'absorption d'énergie et une bonne résistance à la fatigue, la gamme d'aciers TRIP est particulièrement adaptée, pour les pièces de structures et de sécurité, exemples : longeron, renfort de pare-choc.

I.15 Conclusion

L'étude bibliographique présentée ici nous a permis de mettre en lumière les différents phénomènes prenant part dans la réponse mécanique macroscopique des aciers en présence d'une transformation de phase à l'état solide .nous nous sommes intéressés en particulier au phénomènes de la plasticité de transformation TRIP .

II.1 Introduction

Il a été observé que des chargements et déchargements répétés fragilisaient les objets avec le temps, même si les contraintes induites étaient considérablement inférieures aux contraintes limites. Ce phénomène est connu sous le nom de fatigue. Chaque cycle de fluctuation de contrainte affaiblit l'objet. Après un certain nombre de cycles, l'objet est affaibli au point de se rompre. La fatigue est la cause principale de la rupture de la plupart des objets, notamment ceux fabriqués en métal. Les exemples de rupture résultant de la fatigue incluent entre autres, les machines tournantes, les boulons, les ailes d'avions, les produits de consommation, les plates-formes de forage, les bateaux, les essieux de véhicules, les ponts et les os.

II.2 Historique

En 1829, Wilhem Albert a réalisé les premiers essais de fatigue. Ces derniers concernaient les chaînes de puits de mine. En 1839, le terme « fatigue » est utilisé pour la première fois par Jean-Victor Poncelet .

En 1842, la rupture en fatigue d'un essieu cause la catastrophe ferroviaire de Meudon, comme le montreront les travaux de William Rankine.

En 1852 , August Wohler est chargé par le ministre prussien du commerce de travailler sur les ruptures d'axes d'essieux de trains. Il expose ses travaux à l'exposition universelle de 1867 à Paris.

En 1954, S.S.Manson et L.F.Coffin travaillent sur la fatigue oligo-cyclique.

II.3 Définition de la fatigue mécanique

Lorsqu'un matériau est soumis à l'action d'une sollicitation qui fluctue au cours du temps et qui engendre son endommagement progressif, sa réponse est appelée fatigue. Cette réponse peut être décomposée en trois stades [14].

1- Amorçage d'une fissure

Il y a formation d'une microfissure : c'est la germination ou l'amorçage de la fissure. Cette phase de formation peut représenter 80 à 90% de la durée de vie de la pièce en termes de nombre de cycles.

2- Propagation lente de cette fissure

3- Propagation brutale

Due à l'instabilité et amenant la ruine totale de la structure.

Deux faits remarquables distinguent le phénomène de fatigue des autres phénomènes de rupture :

- **la propagation sous-critique :**

Sous chargement cyclique, l'amorçage d'une fissure à partir d'un défaut peut se produire pour des valeurs du chargement maximale à chaque cycle bien inférieures à la force de rupture statique. Ceci est la conséquence de l'endommagement accumulé cycle après cycle dans les zones de concentration de contraintes.

- **L'endurance :**

Pour des valeurs du chargement maximal à chaque cycle assez faibles, on n'observe aucune apparition de fissure même après un nombre infini de cycles. Un des essais les plus courants pour rendre compte de ce phénomène est celui permettant d'obtenir la courbe de Wöhler.

II.4 Comportement en fatigue

Un matériau se fissure puis se rompt sous l'effet d'efforts mécaniques et /ou thermique cycliques qui ne produiraient aucun dommage si ces efforts étaient appliqués une seule fois.

Ce phénomène d'endommagement est appelé fatigue et peut entraîner la rupture du matériau

Lorsqu'un matériau est soumis à un chargement cyclique en contraintes, trois évolutions de comportement sont possibles et sont présentées sur la figure N°01 :

Si, l'on constate un accroissement de la déformation dans une direction à chaque cycle et qu'il n'y a pas de stabilisation, on parle : de déformation progressive ou (Rochet)

Si, l'on constate une stabilisation du comportement, deux cas sont alors possible :

- ✚ **1^{er} cas** : Quand la déformation plastique subsiste au cours du cycle, on parle d'**accommodation**.
- ✚ **2^{er} cas** : Si le cycle stabilisé est totalement élastique à l'échelle macroscopique, on parle alors

d'**adaptation**.

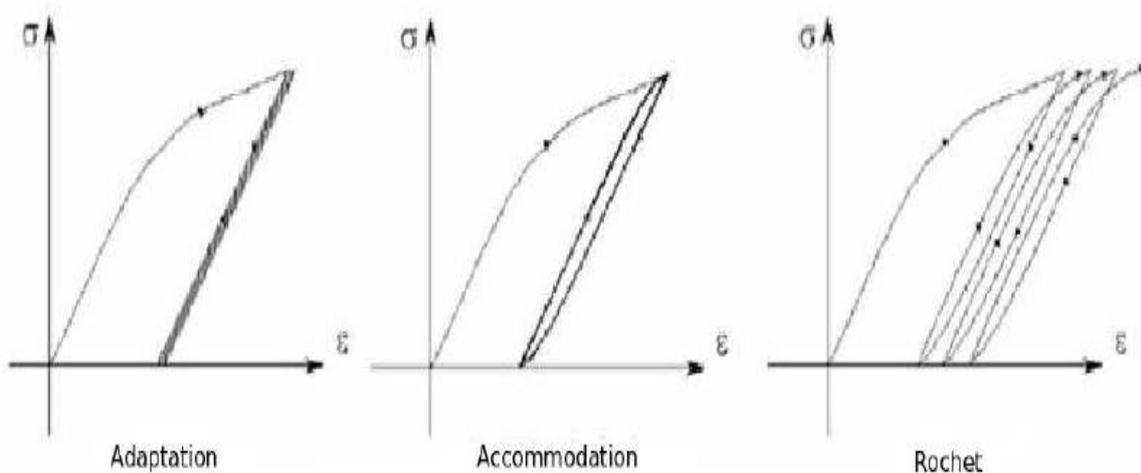


Figure.II.1-Réactions d'un matériau soumis à un chargement cyclique [15].

II.5 Courbe de Wöhler

II.5.1 Représentation de la courbe de Wöhler

Le comportement en fatigue d'un matériau est souvent représenté par une courbe S-N (Stress – Number of cycles) ou courbe de Wöhler, donnant le nombre de cycles à rupture (en échelle logarithmique) en fonction de l'amplitude de sollicitation maximale appliquée. Cette courbe est en général construite à partir d'essais sur éprouvettes normalisées soumises à des chargements périodiques simples (par exemple traction-compression) elle est dépendante de la température [15].

La figure N°02 représente une courbe de Wöhler distinguant deux principaux domaines de la fatigue selon le niveau de sollicitation.

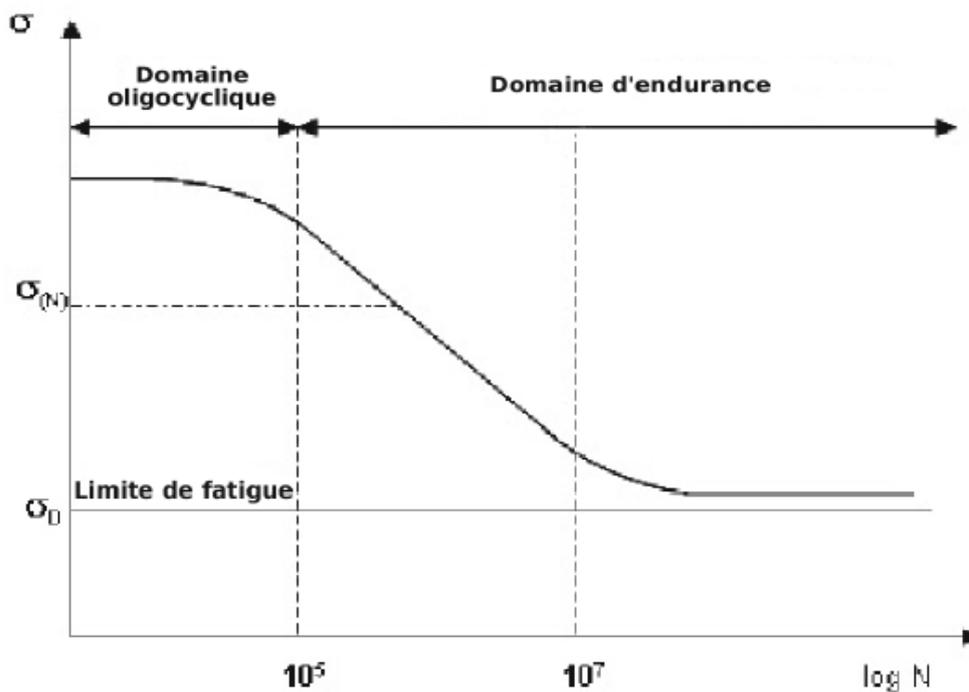


Figure.II.2-Courbe de Wöhler et zone de fatigue [15].

- le **domaine de fatigue oligocyclique** pour les forts niveaux de sollicitations les contraintes imposées sont très élevées et accompagnées d'une déformation plastique

macroscopique à chaque cycle. la durée de vie est très faible, l'éprouvette atteint généralement un état d'accommodation plastique ou de déformation progressive (Rochet).

- **le domaine d'endurance** pour des niveaux de déformation plus faibles les contraintes sont moins élevées et la durée de vie varie entre 10^5 et 10^7 cycles dans la zone d'endurance dite limitée, dans cette zone l'éprouvette tend vers un régime global d'adaptation élastique. le matériau peut subir une déformation plastique durant les premiers cycles.

On note quelques cas comme les aciers inoxydables austénitiques qui montrent de la plasticité cyclique même pour un très grand nombre de cycles à de faibles niveaux de sollicitation

Si le niveau de chargement est encore plus faible, la rupture ne se produit pas avant 10^7 cycles.

On appelle (σ_D) la limite de fatigue (non rupture de l'éprouvette)

Il faut cependant préciser que, pour certains matériaux, on n'observe pas toujours de limite

d'endurance. Les expérimentateurs préfèrent ainsi souvent parler de limite d'endurance conventionnelle qui correspond à la valeur maximale de l'amplitude du chargement n'en entraînant pas la rupture avant un nombre de cycle donné.

II.6 Les différents types de chargement

II.6.1 Notion de chargement cyclique

La très grande majorité des systèmes mécaniques et des structures est chargée par des efforts (forces ou résultantes, moments, déplacements) variables dans le temps. Ceux-ci créent dans les pièces des contraintes et des déformations elles-mêmes variables dans le temps de façon cyclique (et pas seulement strictement monotone comme lors d'un essai classique de traction ou compression quasi-statique). On parle alors de chargement de fatigue.

Un chargement est dit d'amplitude constante quand il est simplement sinusoïdal (ou triangulaire lors d'un test en laboratoire) avec une valeur moyenne et une amplitude constante dans le temps. Sinon, le chargement est qualifié d'amplitude variable. Le chargement de gauche illustré ici est d'amplitude constante. Celui de droite est déjà d'amplitude variable (même si on constate visuellement qu'il varie peu sur un cycle de période T). [16].

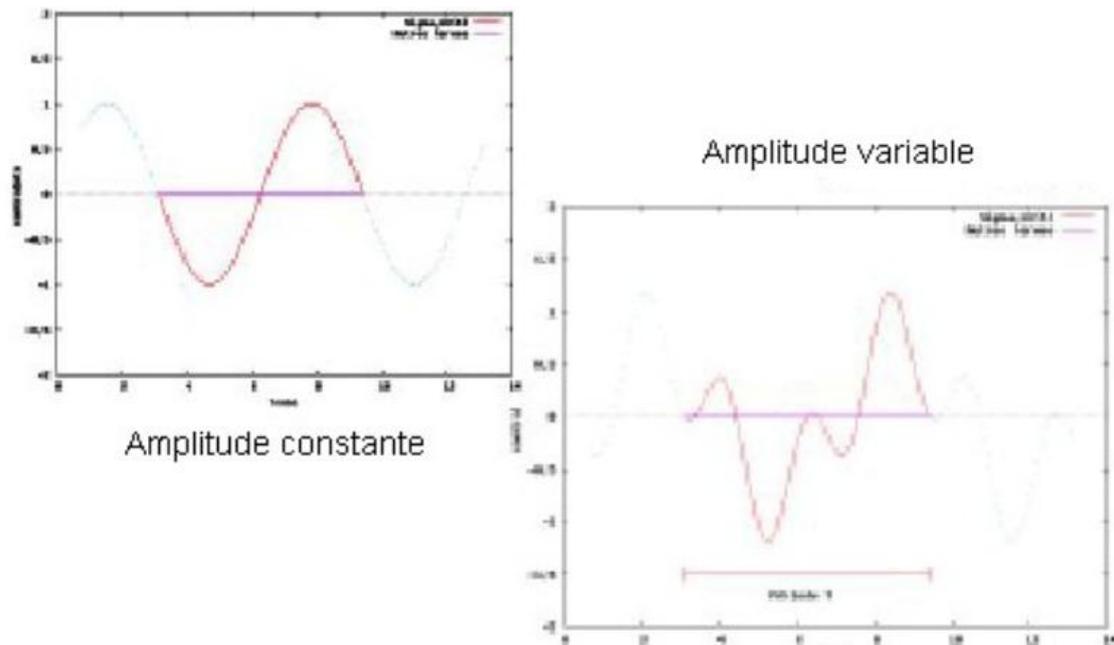


Figure.II.3-Amplitude constante et amplitude variable.

Dans le cadre de ce travail, nous nous limiterons aux chargements sinusoïdaux (ou triangulaire) dits d'amplitude constante.

II.6.2 Etat de contrainte

Il ne faut pas confondre les chargements (efforts, moments, déplacements) (« load » en anglais) et les contraintes (« stress » en anglais).

Le chargement appliqué à une structure (ou pièce) est dit multiaxial quand les forces (ou moments) appliqués sont de directions différentes (non parallèles). L'état de contraintes est dit multiaxial quand il y a au moins 2 contraintes principales non nulles.

Il en résulte qu'à un chargement multiaxial, correspond forcément un état de contrainte multiaxial. Par contre, un chargement uniaxial n'entraîne pas systématiquement un état de contrainte uniaxial (rôle de géométrie de la pièce et des concentrations de contraintes qui en résultent).

• Remarque

L'état de contraintes est un concept local ; il concerne un petit élément de volume élémentaire dv . Le chargement est un concept global à l'échelle de toute la pièce ou de la structure étudiée.

II.6.3 Les différents états de contrainte

- **Etat de contrainte UNIAXIAL** : une seule contrainte principale est non nulle au cours de tout un cycle de chargement [16].

$$\begin{pmatrix} \Sigma_1(M, t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{(\vec{U}_1, \vec{U}_2, \vec{U}_3)}$$

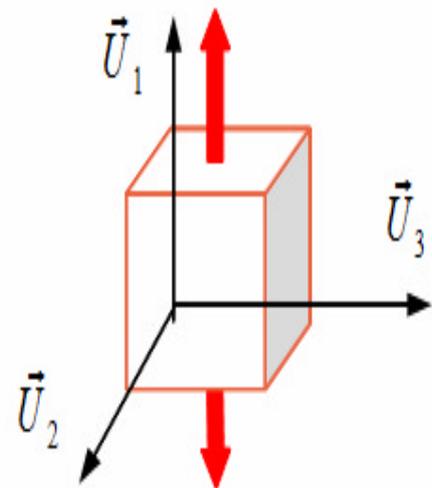


Figure.II.4-Etat de contrainte uniaxial.

- **Etat de contraintes MULTIAXIAL** : 2 ou 3 contraintes sont non nulles [16].

$$\begin{pmatrix} \Sigma_1(M, t) & 0 & 0 \\ 0 & \Sigma_2(M, t) & 0 \\ 0 & 0 & \Sigma_3(M, t) \end{pmatrix}_{(\vec{U}_1, \vec{U}_2, \vec{U}_3)}$$

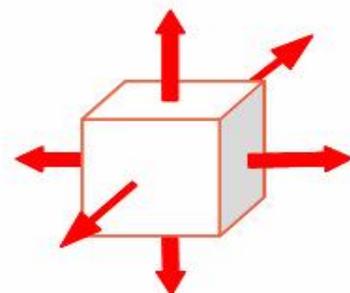


Figure.II.5-Etat de contrainte multiaxial

II.6.4 Rapport de charge R

le rapport de charge est définie par $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ constitue un paramètre caractéristique du chargement couramment utilisé .On distingue alors les sollicitation suivantes présentées sur la figure ci- dessous

$R = -1$: contraintes alternes symétriques

$R = 0$: contraintes répétées ($\sigma_m = \sigma_a$)

$R > 0$: contraintes ondulées

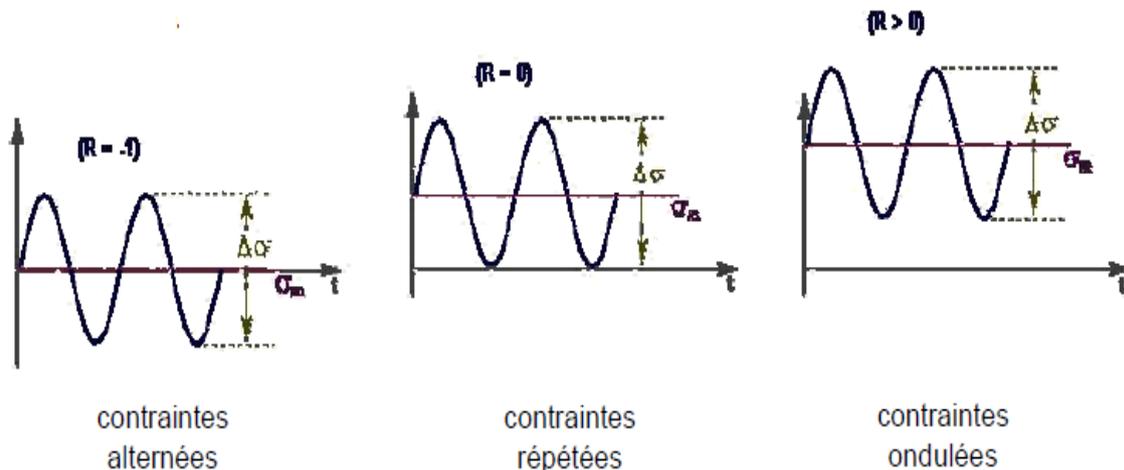


Figure.II.6-Différents types de sollicitation [17].

II.6.5 Modèles mathématiques de la courbe de Wöhler

A titre d'information ce transparent présente quelques modèles analytiques de courbes de Wholer (ou courbe SN). Ceux encadrés sont les plus utilisés industriellement : S désigne la contrainte (amplitude ou contrainte maximale selon le choix de l'utilisateur du modèle) a et b sont des constantes à identifier d'après un ensemble de résultats d'essais. Wholer et Basquin ne considèrent pas d'asymptote Bastenaire considère qu'une asymptote (E) existe.

Modèles de courbes de Wöhler ou courbes S-N

Wolher(1860)	$\log(N)=a_bS$
Basquin(1910)	$\log(N)=a_b\log(S)$

II.7 La fatigue thermique

II.7.1 Le phénomène de fatigue thermique

Il s'agit de la répétition simultanée de cycles de contraintes thermiques et de contraintes mécaniques qui conduit à des ruptures ou à des déformations provoquées par des phénomènes de fluage [18].

Pour Dieter , au contraire, il s'agit d'un phénomène de fissuration par fatigue produit par des contraintes thermiques fluctuantes, dans des conditions telles qu'aucune contrainte d'origine mécanique n'existe. Il distingue aussi la fatigue thermique , qui provient de sollicitations répétées ,du choc thermique ,ou la défaillance apparaît après une seule application de contrainte thermique.

Spera, [19] quant à lui, parle de la détérioration graduelle et de la fissuration du matériau par chauffage et refroidissement alternés, durant lesquels la dilatation libre est partiellement ou totalement entravée, Il définit ensuite deux sous-catégories :

- **La fatigue thermomécanique**

- **La fatigue sous contraintes thermiques**

Et propose d'inclure ces deux catégories dans la fatigue oligocyclique comme présenté en (figure II.7).

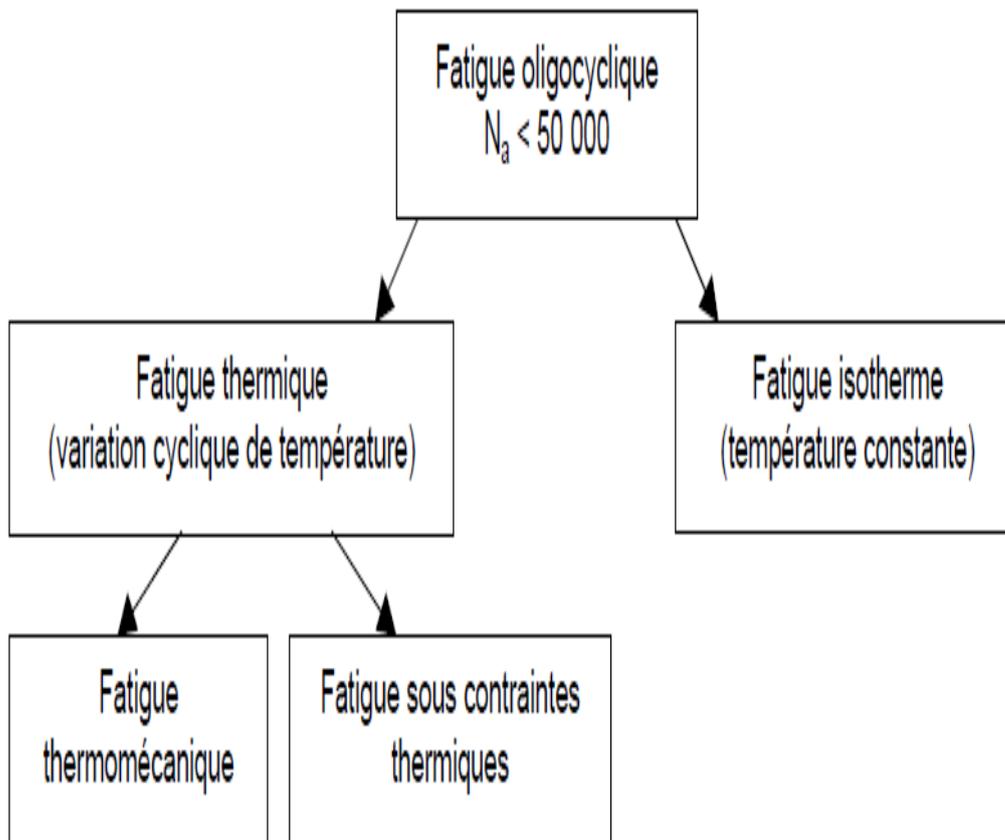


Figure.II.7-Classification des différents types de fatigue oligocyclique selon Spera [19].

La division de la fatigue thermique par Spera en deux sous-catégories se justifie par le mode d'obtention de l'entrave à la dilatation libre.

- **La fatigue thermomécanique :** Est la fatigue thermique dans laquelle les entraves à la dilatation libre sont externes. Il s'agit le plus souvent [20] d'une technique de laboratoire ou, durant le cyclage thermique, des forces externes sont appliquées à une éprouvette pour simuler les contraintes internes d'origine thermique qui apparaîtraient dans le composant réel.

- **La fatigue sous contraintes thermiques :** Correspond à la fatigue thermique dans laquelle les entraves à la dilatation libre sont internes, et c'est dans la plupart des cas ce qui se produit pour les composants réels.

II.8 Conclusion

La fatigue thermique est définie comme la détérioration graduelle et la fissuration du matériau par chauffage et refroidissement alternés durant lesquels la dilatation libre est partiellement ou totalement entravée. Si les entraves à la dilatation libre sont externes on parle de : fatigue thermomécanique

III.1 Introduction

Les besoins des industries de pointe et les progrès effectués dans le domaine des ordinateurs, ont conduit les techniques de calcul des structures à un développement considérable. Ainsi la méthode des éléments finis est l'un des outils les plus efficaces et les plus généraux pour l'analyse des structures dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatial, automobile, nucléaire, génie civil, construction navale... etc.

Par ailleurs la méthode des éléments finis est une technique à caractères pluridisciplinaires qui met en œuvre des connaissances relevant de plusieurs disciplines de base telles que la mécanique des structures, l'analyse numérique et l'informatique appliquée.

C'est une méthode basée sur une décomposition du domaine dans lequel on désire effectuer la simulation en sous-domaine de forme géométrique simple appelés « éléments finis », pour lequel on procède à des approximations nodales des champs de déplacements, ou de contraintes qui prennent en général la forme de fonctions polynomiales. L'ensemble de ces éléments constitue ce que l'on appelle le maillage du domaine. Ces éléments sont liés par un nombre fini de continuités exprimées en certains points communs à plusieurs éléments appelés 'nœuds'.

Ce sont les méthodes classiques du calcul des structures, méthodes des déplacements, et méthodes des forces, qui sont à la base de la M.E.F. Selon que l'on approxime le champ des contraintes ou le champ des déplacements on crée le modèle contrainte ou le modèle déplacement. Le modèle déplacement semble plus commode à mettre en œuvre car il s'adapte généralement mieux aux problèmes de calcul des structures et sera adopté dans ce qui suit. Dans la méthode des déplacements, la formulation du problème est faite en fonction des déplacements aux nœuds qui sont les inconnues cinématiques.

La structure est préalablement discrétisée en éléments finis. Le calcul est conduit suivant deux niveaux de formulation élémentaire au niveau de l'élément fini et globale au niveau de la structure complète.

La MEF est une méthode de résolution des problèmes physiques régis par des équations aux dérivées partielles. Elle consiste à subdiviser le domaine de l'équation et à décrire la solution à l'intérieur de chaque région par une combinaison linéaire de fonctions connues.

III.2 Historique

L'idée fondamentale derrière la méthode des éléments finis remonte loin en arrière. Les grecs par exemple avaient reconnu que l'on peut approcher la solution d'un problème complexe en le divisant en problèmes plus simples. On peut par exemple approcher le périmètre d'un cercle en calculant le périmètre d'un polygone à n cotés, pourvu que n soit suffisamment grand. Il suffit alors de connaître la longueur d'un segment de droite, problème beaucoup plus simple que celui de la longueur d'un arc de cercle.

L'application à la solution des équations aux dérivées partielles est évidemment plus récente et est intimement liée au développement de l'informatique. Courant a introduit le concept de formulation variationnelle, qui est à la base de toute méthode d'éléments finis. Pour la méthode de Ritz, on part d'un problème posé dans un espace de dimension infinie.

On approche ensuite la solution du problème initial en cherchant une solution dans une suite croissante de sous-espaces de dimension finie. Ces problèmes approchés sont en général beaucoup plus faciles à résoudre. On peut de plus espérer que la solution du problème en dimension infinie peut être obtenue par un passage à la limite. Le choix des fonctions de base constituant ces espaces de dimension finie est délicat et initialement on les construisait globalement sur le domaine. C'est Courant qui eut l'idée d'introduire des fonctions à support local qui simplifient grandement leur construction.

La maturation de la méthode des éléments finis a été plus lente que son éclosion en milieu industriel. Elle tire son origine des limitations du « calcul résistance des corps solides », ces limitations qui ont orientées les évolutions de l'analyse mécanique sur deux voies parallèles :

III.2.1 La mécanique des milieux discrets

Elle consiste à formuler l'équilibre des efforts ainsi que les relations de continuité des déplacements pour un ensemble de composants déformables connectés entre eux. Ainsi, on sait déjà au début du XIX^{ème} siècle, avec l'ingénieur Claude-Louis Navier, calculer des systèmes complexes constitués de barres souples : les systèmes hyperstatiques.

Cette approche, en conduisant à résoudre des systèmes matriciels a donné naissance à des outils de plus en plus élaborés, sous l'impulsion de la construction métallique au début du XX^{ème} siècle, puis aéronautique après la seconde guerre mondiale. De nouveaux composants ont été introduits, mais ces nouveaux outils restaient par nature dédiés aux structures étudiées et la taille des systèmes restait limitée par les moyens de calcul matriciel.

III.2.2 La mécanique des milieux continus

Elle consiste à formuler l'énergie du système à partir de sa raideur de son déplacement et des efforts appliqués, puis à retenir comme solution du problème d'équilibre de déplacement assurant une énergie minimale. Cette vision unifiée de la mécanique, instruite à

la fin de XVII^{ème} siècle. Enfin, le calcul approché des mathématiciens, très florissante au XIX^{ème} siècle par Boris Grigovitch Galerkin.

En 1956 les deux voies discrète et continue, se recoupent explicitement sur le concept général d'élément fini tel qu'on le connaît aujourd'hui, lorsque deux chercheurs de l'aéronautique, Turner et Clough entreprennent de décomposer un domaine surfacique continu de forme quelconque, en petits domaines triangulaires à déplacement linéaire, ces éléments étant assemblés à leurs sommets (les nœuds) pour constituer le système algébrique à résoudre. Cette idée met en œuvre pour la première fois ensemble, les approches discrètes et continues de la MEF, sous forme d'une certaine approximation de la solution cherchée sur une certaine décomposition de l'espace.

Au début des années 60, le développement des gros ordinateurs, en levant la limitation du nombre de nœuds, a ouvert un champ d'application virtuelle illimité à la MEF. D'une part des éléments de haute précision) et leur traitement se systématisait au sien des bibliothèques dans des codes de plus en plus généralistes. D'autre part, la discrétisation et la résolution des problèmes non linéaires et non stationnaires se développaient, dans des domaines débordant largement la mécanique des structures, la thermique, la mécanique des fluides, et aussi l'électromagnétisme.

A la fin des années 60, la pratique de la MEF débordait des grands centres de recherche appliquée pour essaimer vers la plupart des universités et vers certains Bureaux d'études. Avec l'amélioration des matériels informatiques et des langages de programmation au cours des années 80, ces outils se sont rationalisés en interne (ateliers logiciels, programmation vectorielle, puis parallèle), ils sont devenus plus ambitieux et performants (pour traiter de très

gros problèmes), en se fédérant entre eux ou en s'interfaçant pour traiter des problèmes couplés. De gros investissements ont alors été engagés pour développer des outils généraux pour le pré et post traitement graphique « apparition des terminaux couleur à la CAO » en même temps, une autre génération de codes de calcul est apparue, avec les premiers ordinateurs personnels.

Les années 90 ont marqué à la fois une relative saturation des progrès, méthodologiques dans la MEF, qui a atteint sa maturité, un regroupement des grands éditeurs de logiciels scientifiques.

La méthode des éléments finis est maintenant reconnue comme l'une des principales méthodes. Elle consiste à formuler l'équilibre des efforts ainsi que les relations de continuité des déplacements pour un ensemble de composants déformables connectés entre eux. Ainsi, on sait déjà au début du XIX^{ème} siècle, avec l'ingénieur Claude-Louis Navier, calculer des systèmes complexes constitués de barres souples : les systèmes hyperstatiques. Cette approche, en conduisant à résoudre des systèmes matriciels a donné naissance à des outils de plus en plus élaborés, sous l'impulsion de la construction métallique au début du XX^{ème} siècle, puis aéronautique après la seconde guerre mondiale. De nouveaux composants ont été introduits, mais ces nouveaux outils restaient par nature dédiés aux structures étudiées et la taille des systèmes restait limitée par les moyens de calcul matriciel. [21]

III.3.3 Démarche éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes :

- **Formulation du problème physique à étudier**
- **Discrétisation de la structure en éléments finis**
- **Fonctions d'interpolation pour un élément**
- **Construction des matrices élémentaires**
- **Assemblage des matrices de rigidité et de masse des éléments**
- **Introduction des conditions aux limites**

III.3.3.1 Formulation du problème physique à étudier

Un problème physique est décrit par :

- ✓ La géométrie du corps à étudier (représentation dans un repère donné, dimensions, ect...)
- ✓ Les caractéristiques physiques du matériau constituant le corps dont on veut étudier le phénomène physique.
- ✓ Le chargement du corps ou de la structure à étudier (mécanique, thermique, ect..).
- ✓ Les conditions aux limites de la structure à étudier (charge surfaciques, valeurs imposées, appuis).

En fin on va écrire l'équation aux dérivées partielles régissant le phénomène, en tenant compte des conditions aux limites, dans les ensembles constitués de :

- Poutres droites dans le plan
- Solides rigides
- Ressorts, amortisseurs

Il n'est pas possible de résoudre les équations aux dérivées partielles, pour cela on utilise des méthodes d'approximation.

III.3.3.2 Discrétisation géométrique

Cette opération consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaines:

$$D = \sum_{e=1}^{ne} D_e \text{ tel que } \lim_{e \rightarrow 0} (U_e D_e) = D \quad (\text{III.1})$$

Il faut donc pouvoir représenter au mieux la géométrie souvent complexe du domaine étudié par des éléments de forme géométrique simple. Il ne doit y avoir ni recouvrement ni trou entre deux éléments ayant une frontière commune.

Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés comme proposé sur la figure 2.1. Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution.

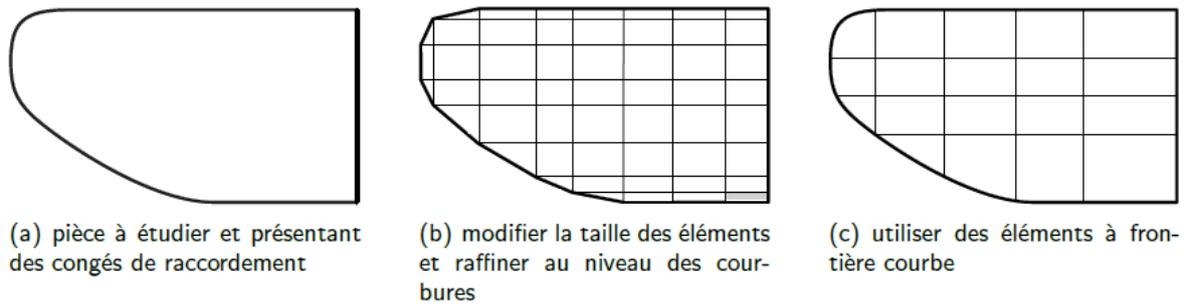


Figure III.1-Erreur de discrétisation géométrique [23]

III.3.3.3 Fonctions d'interpolation pour un élément

Approximation nodale

La méthode des éléments finis est basée sur la construction systématique d'une approximation u^* du champ des variables u par sous domaine. Cette approximation est construite sur les valeurs approchées du champ aux nœuds de l'élément considéré, on parle de représentation nodale de l'approximation ou plus simplement d'approximation nodale.

Définition de l'approximation nodale

L'approximation par éléments finis est une approximation nodale par sous domaines ne faisant intervenir que les variables nodales du domaine élémentaire De :

$$\forall M \in De, u^*(M) = N(m)u_n \quad (\text{III.2})$$

Où $u^*(M)$ représente la valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément et N , la matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément u_n variables nodales relatives aux nœuds d'interpolation de l'élément.

Dans le cas général le champ à approcher est un champ vectoriel. Nous utilisons alors la notation matricielle suivante $u^*(M) = N(m)u_n$. Les nœuds M_i sont des points de l'élément pour lesquels on choisit d'identifier l'approximation u^* à la valeur du champ de variables u . Nous en déduisons que :

$$\forall M_i, u^*(M) = u_i \quad (\text{III.3})$$

Soit pour l'approximation nodale :

$$\forall M_i, N_j(M_i) = \delta_{ij} \quad (\text{III.4})$$

Construction d'une approximation nodale linéaire

L'interpolation nodale est construite à partir d'une approximation générale :

$$\forall M, u^*(M) = \Phi(M)a \quad (\text{III.5})$$

Est une base de fonctions connues indépendantes, en général une base polynomiale et Φ , le vecteur des paramètres de l'approximation aussi dits paramètres généralisés, qui n'ont pas de signification physique.

Bases polynomiales complètes• **une dimension :**

- linéaire $(1, x)$: deux variables
- quadratique $(1, x, x^2)$: trois variables

• **deux dimensions :**

- Linéaire $(1, x, y)$: trois variables
- Quadratique $(1, x, y, x^2, xy, y^2)$: six variables

• **trois dimensions :**

- Linéaire $(1, x, y, z)$: quatre variables
- Quadratique $(1, x, y, z, x^2, xy, y^2, xz, z^2, yz)$: dix variables

Bases polynomiales incomplètes

• **deux dimensions :** « bi - linéaire » $(1, x, y, xy)$: quatre variables

• **trois dimensions :** « tri - linéaire » $(1, x, y, z, xy, xz, yz, xyz)$: huit variables

Quantités élémentaires

Afin de présenter la démarche générale utilisée pour construire les formes matricielles et vectorielles sur chaque élément, nous utiliserons comme point de départ la forme intégrale du Principe des Travaux Virtuels associée à un problème de mécanique des structures. Cette forme intégrale est de même type que celles pouvant être déduites des méthodes vibrationnelles et la généralisation à des problèmes de physique est donc simple.

III.3.3.4 Construction des matrices élémentaires

Matrices masse et raideur

Soit la forme intégrale du PTV :

$$\forall \delta \vec{u} \int_D \rho \ddot{\vec{u}} \cdot \delta \vec{u} dV = - \int_D \bar{\sigma} : \overline{\delta \varepsilon} dV + \int_D \vec{f} \cdot \delta \vec{u} dV + \int_{\partial D} \vec{T} \cdot \delta \vec{u} dS \quad (III.6)$$

Sur chaque élément nous utilisons l'approximation nodale pour exprimer le champ des déplacements \vec{u} et le champ des déplacements virtuels $\delta \vec{u}$. Ainsi le produit scalaire s'écrit maintenant

$$(M) \cdot \delta \vec{u}(M) = \delta u_n^T (M)^T N(M) \ddot{u}_n \quad (III.7)$$

D'où le premier terme :

$$\int_{D_e} \rho \ddot{\vec{u}} \cdot \delta \vec{u} dV = \delta \vec{u} dV = \delta u_n^T M_e \ddot{u}_n \quad (III.8)$$

Avec $M_e = \int_{D_e} N(M)^T \rho N(M) dV$, matrice masse élémentaire. Pour exprimer le second terme les deux tenseurs sont représentés par des vecteurs nous permettant de remplacer le produit doublement contracté par un simple produit scalaire. Ces notations ont été introduites dans la sous section :

$$\bar{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = [\varepsilon_{xx} \varepsilon_{yy} \varepsilon_{zz} 2\varepsilon_{xy} 2\varepsilon_{xz} 2\varepsilon_{yz}]^T \quad (III.9)$$

$$\bar{\sigma} \rightarrow \sigma = [\sigma_{xx} \sigma_{yy} \sigma_{zz} \sigma_{xy} \sigma_{xz} \sigma_{yz}]^T \quad (III.10)$$

De plus le vecteur des déformations s'exprime en fonction du champ des déplacements. Ces relations géométriques font apparaître des opérateurs différentiels appliqués à $\sim u$, que nous notons sous forme matricielle :

$$\varepsilon(M) = LN(M)u_n = B(M)u_n \quad (III.11)$$

Où B est la matrice d'opérateurs différentiels appliqués aux fonctions d'interpolation. Les lois de comportement permettent d'exprimer le vecteur des contraintes en fonction du vecteur des déformations, soit :

$$\sigma(M) = D(M)\varepsilon(M) = D(M)B(M)u_n \quad (III.12)$$

D'où le second terme, écrit dans la base de discrétisation :

$$\int_{D_e} \bar{\sigma} : \overline{\delta \varepsilon} dV = \delta u_n^T K_e u_n \quad (III.13)$$

Avec $K_e = \int_{De} B(M)^T D(M) B(M) dV$ matrice raideur élémentaire. Il nous reste à exprimer le travail virtuel des efforts. En pratique, on considère d'une part les efforts donnés et d'autre part les efforts inconnus qui sont les efforts nécessaires pour assurer les liaisons cinématiques. Sur chaque élément, nous utilisons l'approximation du champ de déplacement pour exprimer le travail virtuel de ces efforts.

III.3.3.5 Assemblage

Les règles d'assemblage sont définies par la relation :

$$D \approx \sum_{e=1}^{ne} D_e \quad (\text{III.14})$$

Matrices

L'assemblage des matrices élémentaires masse M_e et raideur K_e s'effectue selon les mêmes règles. Ces règles sont définies par sommation des termes correspondant au travail virtuel calculé pour chaque élément :

$$\sum_{e=1}^{ne} \delta u_n^T M_e \ddot{u}_n = \delta U^T M \ddot{U} \text{ et } \sum_{e=1}^{ne} \delta u_n^T K_e u_n = \delta U^T K U \quad (\text{III.15})$$

Cette opération traduit simplement que la forme quadratique associée à l'ensemble du domaine est la somme des formes quadratiques des sous-domaines. Elle consiste à « ranger » dans une matrice globale, les termes des matrices élémentaires. La forme de cette matrice dépend bien évidemment de l'ordre dans lequel sont définies les variables globales de U .

III.3.3.6 Introduction des conditions aux limites

Après constitution des matrices globales de la structure et avant de passer à la résolution du problème aux dérivées partielles, on se doit d'introduire les conditions aux limites sous peine de rendre le problème insoluble.

Les conditions aux limites nous informent sur l'état de certains points de la structure, comme par exemple le chargement, l'encastrement, les appuis ...etc. Il est possible de déterminer les valeurs propres ainsi que les vecteurs propres. [22]

III.3.4 Utilisation d'un logiciel éléments finis

Un programme général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de

logiciels : NASTRAN, ANSYS, ADINA, ABAQUS, CASTEM 2000, CESAR, SAMCEF, solidworks etc. Les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- analyse linéaire ou non d'un système physique continu ;
- analyse statique ou dynamique ;
- prise en compte de lois de comportement complexes ;
- prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermiques, électromagnétiques, de plasticité, d'écoulement. . .) pouvant être couplés ;
- Problèmes d'optimisation, etc.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale.

III.3.4.1 Déroulement d'une étude

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis . Le cadre de l'étude, c'est-à-dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée. Supposons toutes ces conditions remplies, l'étude proprement dite est organisée de façon logique selon les étapes suivantes :

III.3.4.2 Analyse du problème

Cette analyse doit fixer les paramètres du calcul et conduire à la réalisation d'un maillage.

Cette phase basée sur l'expérience personnelle acquise dépend de nombreuses considérations. La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail. L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats.

III.3.4.3 Choix du modèle

En calcul des structures, les plus classiques sont de type : poutre, élasticité plane, axisymétrique, coques mince ou épaisse, tridimensionnel. . . À ces modèles mathématiques correspondent des familles d'éléments finis.

III.3.4.4 Choix du type d'éléments

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible.

On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles.

III.3.4.5 Choix du maillage

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou globales. Sans oublier bien entendu le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage.

III.3.4.6 Hypothèses de comportement

Quel modèle retenir pour représenter le comportement du matériau. Le calcul est-il linéaire ? Doit-on modéliser l'amortissement ? Si le matériau est hétérogène ou composite, peut-on utiliser une méthode d'homogénéisation ? Peut-on traduire l'incompressibilité du milieu ?

Lors d'une étude, on peut être amené à utiliser des éléments finis nouveaux. Il est indispensable de vérifier leur comportement sur des problèmes élémentaires si possible proches de l'étude menée.

III.3.4.7 Création et vérification des données

Cette étape dépend du logiciel utilisé. La syntaxe utilisée pour définir le jeu de données est définie dans le mode d'emploi du bloc fonctionnel correspondant. En sortie, un fichier est créé, qui contient toutes les informations nécessaires à l'exécution des calculs. Les vérifications relatives au jeu de données se font généralement graphiquement, grâce à un module informatique appelé pré-processeur.

Différents contrôles peuvent être utilisés pour valider le jeu de données :

- Vérification de la géométrie de la pièce et du maillage ;
- Vérification de la prise en compte des sollicitations et des conditions cinématiques (liaisons) imposées à la structure ;
- Vérification des propriétés mécaniques utilisées. Pour des problèmes spécifiques, d'autres contrôles seront envisagés. L'objectif d'éviter de faire tourner un calcul inutilement. Ceci d'autant plus que la recherche d'une solution acceptable pour un problème donné est rarement le résultat d'un seul calcul.

III.3.4.8 Exécutions du calcul

Cette tâche coûteuse en temps nous donne un fichier de résultat permettant de vérifier que les différentes phases de calculs se sont correctement déroulées :

- Interprétation des données, vérification des paramètres manquants ;
- Construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes ;
- Singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments ;
- Convergence, nombre d'itérations, etc.

Ce fichier peut contenir aussi les résultats du calcul (déplacements, contraintes. . .) ce qui lui confère dans ce cas un volume généralement très important.

III.3.4.9 Exploitation des résultats

Elle a souvent pour objectif de valider ou de vérifier le dimensionnement d'une structure. Les résultats obtenus et les conclusions relatives aux phénomènes à étudier devront être présentés de façon synthétique : tableaux, courbes, visualisation. Cela justifie largement l'utilisation d'un post-processeur, qui propose des outils pour sélectionner les informations que l'on veut étudier.

Il faut savoir ce que cache l'information qui vous est proposée graphiquement, sachant que celle-ci est construite à partir de résultats discrets :

- Valeur moyenne sur un élément
- Valeurs aux nœuds
- les courbes d'iso-contraintes, etc .

Différentes vérifications doivent être effectuées pour valider les résultats. Elles poussent, dans la plupart des cas, à remettre en cause le modèle pour en créer un nouveau, dont on espère qu'il améliorera la solution précédente.

La comparaison des résultats des différents modèles permet d'améliorer puis de valider un modèle *final*. Une fois la fiabilité du modèle assurée, on peut conclure sur l'adéquation entre la structure et le cahier des charges. La synthèse de ces calculs préliminaires est indispensable car elle vous permet de justifier et de définir les limites du (des) modèle(s). [23]

III.5. Organigramme d'un logiciel éléments finis

Tout logiciel de calcul par la méthode des éléments finis contient les étapes caractéristiques ou blocs fonctionnels décrits sur la figure

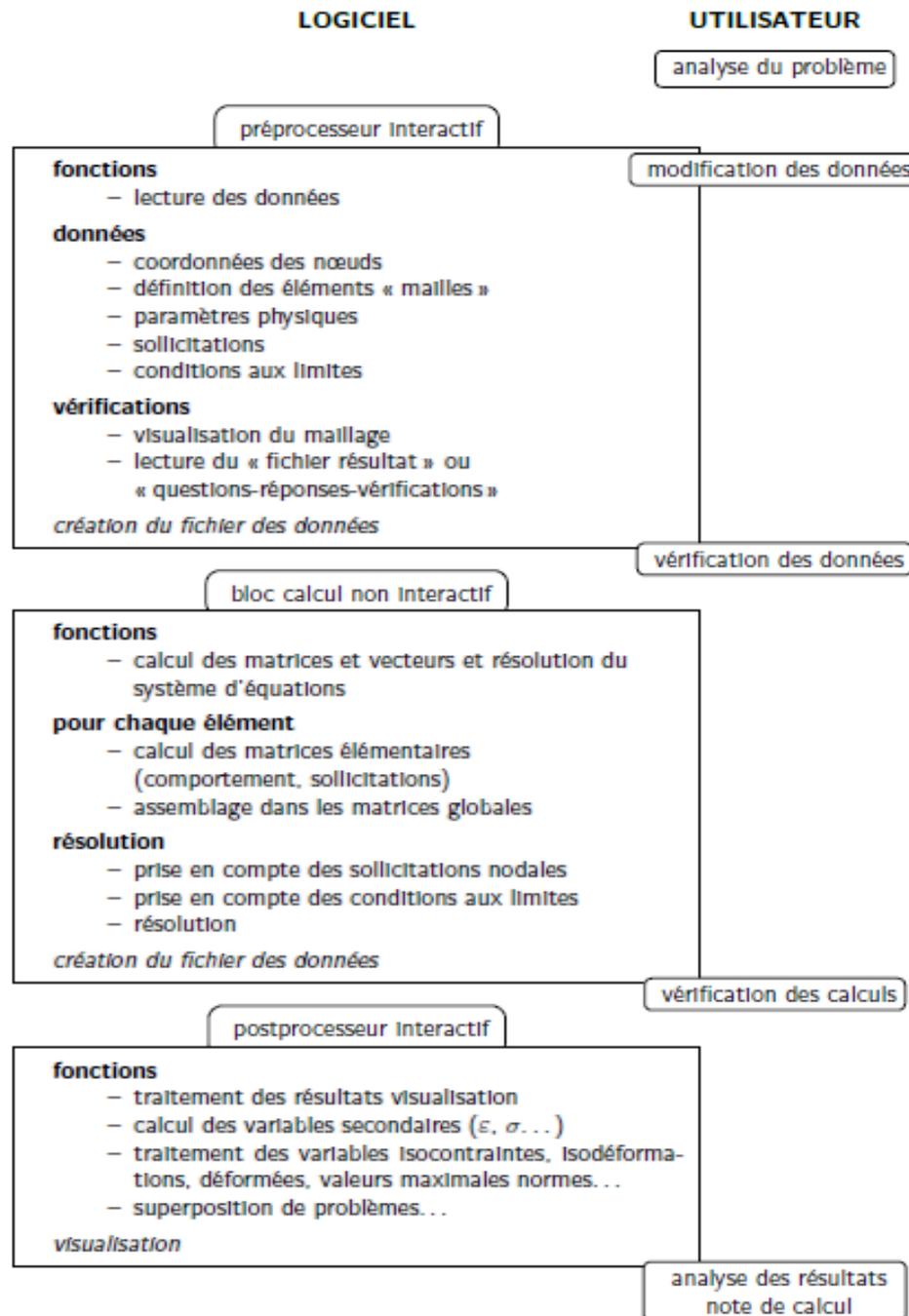


Figure.III.2-Organigramme d'un logiciel éléments finis.[23]

III.6 Conclusion

Une étape primordiale dans la conception et l'optimisation des structures complexes est l'établissement d'un modèle numérique de base, affiné successivement par des essais expérimentaux pour être finalement validé. Cette phase de modélisation essentielle pour une compréhension future du comportement du système sous différentes sollicitations, suppose le recours à un outil d'analyse numérique performant et maîtrisable, s'appuyant généralement sur la méthode des éléments finis.

IV.1 Introduction

L'approche numérique est aujourd'hui reconnue comme étant un outil pouvant largement faciliter la conception et la simulation de pièce ou produits.

Les études structurelles linéaires et non linéaires ne prévoient pas la ruine résultant de la fatigue. Elles calculent la réponse d'une conception soumise à des déplacements imposés et des chargements déterminés. Si les hypothèses de l'analyse sont observées et que les contraintes calculées sont dans les limites autorisées, elles concluent que la conception est sûre dans cet environnement, quel que soit le nombre d'applications du chargement.

Les résultats d'études statiques, non linéaires ou dynamiques linéaires en fonction du temps peuvent servir de base à la définition d'une étude de fatigue. Le nombre de cycles requis pour qu'une ruine par fatigue se produise à un emplacement donné dépend des matériaux et des fluctuations de contrainte. Ces informations sont fournies pour chaque matériau par une courbe appelée **courbe S-N**

IV.2 But de l'étude

La simulation numérique a pour but de réaliser des études de comportement d'un matériau ou d'une pièce, sans avoir recours à l'étude expérimentale.

Le but de l'étude de fatigue est de simuler cette dernière avec des sollicitations mixtes « contraintes mécaniques et effets thermiques » variables.

Une fois l'analyse terminée nous pouvons afficher la durée de vie de notre acier, ou le nombre de cycles avant tout dysfonctionnement ,dans un temps réduit par rapport à un test expérimental

IV.3 Description de l'essai

IV.3.1 L'éprouvette Les éprouvettes de traction sont normalisées ($\varnothing \geq 4\text{mm}$ ou $e \geq 3\text{mm}$)

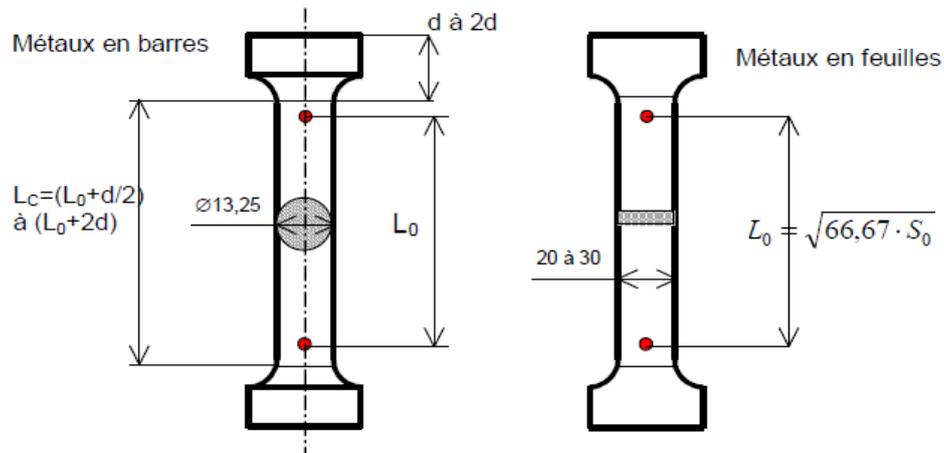


Figure.IV.1-Eprouvette de traction normalisée

On note

S_0 : section initial en mm^2

L_0 : longueur initiale entre repères

L_C : longueur de la partie calibrée

Avec : $L_C = (L_0 + d/2)$ à $(L_0 + 2d)$

Dimension des éprouvettes

Ép < 3 mm : largeur 20 mm et longueur 80 mm

Ép > 3 mm : largeur 30 mm et longueur $5.65 \cdot S_0$

Avec : $S_0 = \text{largeur} \times \text{épaisseur}$

Les variations de taille et de forme d'éprouvettes se traduisent par des valeurs de caractéristiques mécaniques non comparables, et des besoins spécifiques pour avoir plus d'informations dans une zone plus significatif.

Pour cela nous avons optés pour une éprouvette avec entaille, afin de mettre en évidence la zone de striction ou la concentration de contraint est grande.

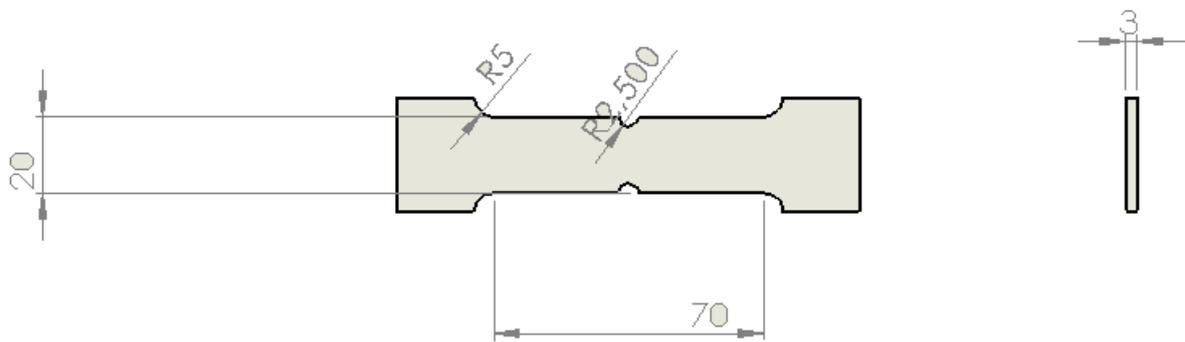


Figure.IV.2-Eprouvette avec entaille

IV.4 Etude statique

Cela consiste à faire des essais de traction a contraintes et températures variables équivalentes respectivement a (50, 100,150.....350 MPA) et (20,100.....300 °C).

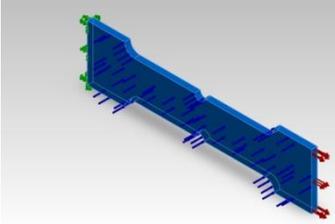
Cette étude statique va nous servir de référence afin de passer à l'étude dynamique

Etape 01 :

Pour notre éprouvette plate et a l'aide de solidworks simulation on spécifie une étude statique a notre matériau,

Etape 02 :

On procède au choix de notre matériau (AISI 304), dont les propriétés mécaniques sont déjà définies dans le logiciel.

Référence du modèle	Propriétés	Composants
	Nom: AISI 304 Type de modèle: Linéaire élastique isotropique Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max. Limite d'élasticité: 2.06807e+008 N/m² Limite de traction: 5.17017e+008 N/m² Module d'élasticité: 1.9e+011 N/m² Coefficient de Poisson: 0.29 Masse volumique: 8000 kg/m³ Module de cisaillement: 7.5e+010 N/m² Coefficient de dilatation thermique: 1.8e-005 /Kelvin	Corps volumique 1(Enlèv. mat.-Extru.1)(eprouvette)
	Données de la courbe:N/A	

Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	-31500	1.14441e-005	4.48227e-005	31500
Moment de réaction(N-m)	0	0	0	0

Tableau IV. 1. Propriété du matériau

Etape 3 : Imposer des géométries fixes (encastrement) à l'aide du conseiller de déplacement sur la face gauche de l'éprouvette

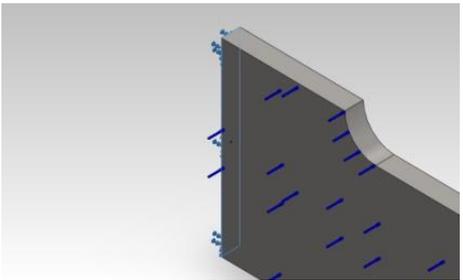
Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé	Détails du déplacement imposé
Fixe-1		Entités: 1 face(s) Type: Géométrie fixe
Forces resultants		

Tableau.IV.2-Actions extérieures

Etape 04 :

On applique une contrainte mécanique (MPa) sur la face droite ainsi qu'une source de chaleur sur le plan de face de l'éprouvette

Etape 05 :

Au cours de cette étape la géométrie de l'éprouvette est subdivisée en éléments finis par un maillage automatique, et pour cela on a utilisé un maillage volumique

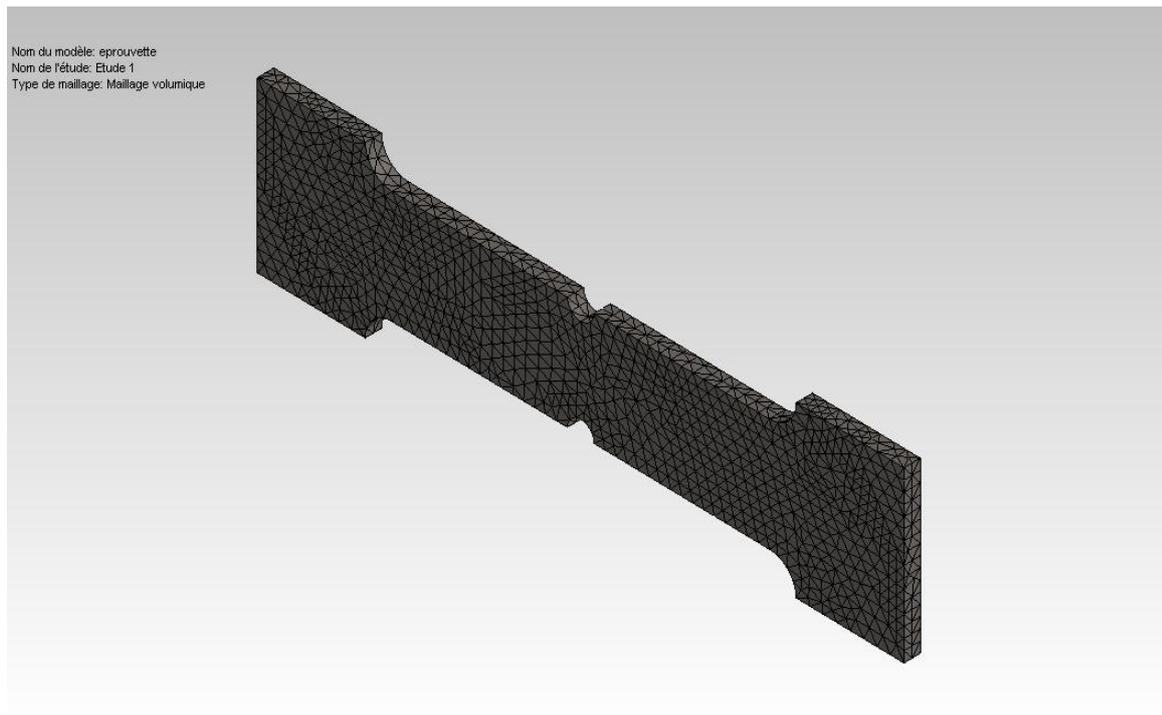


Figure.IV.3-Informations sur le maillage

Type de maillage	Maillage volumique
Mailleur utilisé:	Maillage basé sur la courbure
Points de Jacobien	4 Points
Taille d'élément maximum	2.03403 mm
Taille d'élément minimum	0.678002 mm
Qualité de maillage	Haute

Tableau IV.3 Informations sur le maillage

- **Le solveur :**
Dans les propriétés de notre étude on choisit une méthode directe

Etape 06 :

Qui est la dernière opération permettant d'exécuter l'étude et passer à la visualisation des résultats.

Ces étapes ci-dessus sont répétées pour des valeurs de températures correspondants respectivement à (20°C, 100°C, 200°C ,300 °C).

IV.4.1 Résultats des études statiques**Etude 01**

Les valeurs des contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées pour une température $T=20^{\circ}\text{C}$, sont montrées dans le tableau ci-dessous.

σ_{app} (MPa)	50	100	150	200	250	300	350
σ_{rep} (MPa)	211	450,37	620,26	826,43	1032,5	1238,5	1554,6

Tableau IV.4 Contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées

Les résultats du tableau (IV.4) sont interprétés dans la figure suivante :

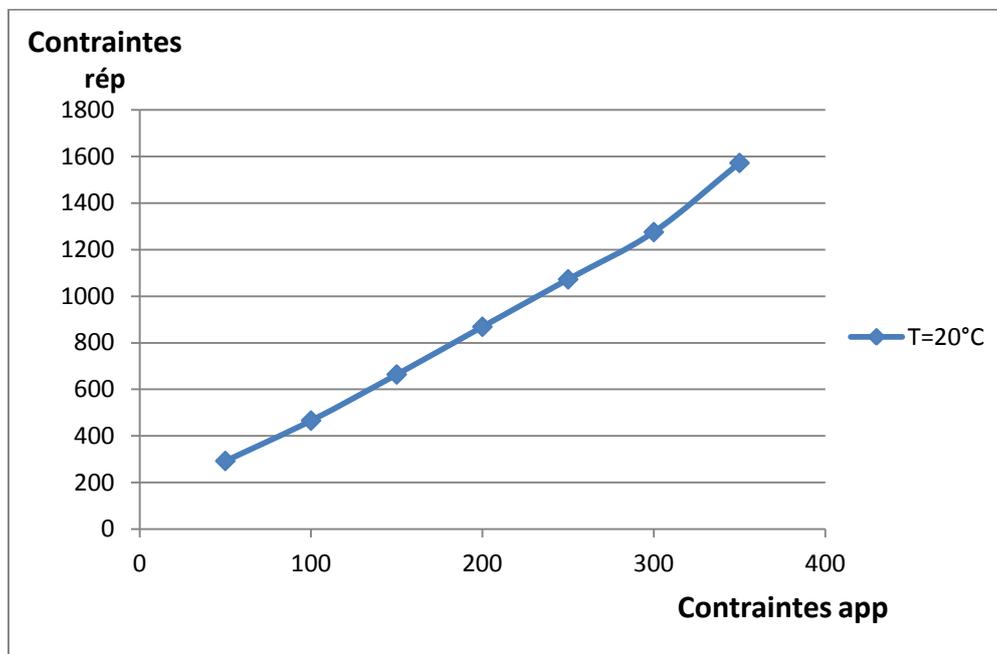


Figure.IV.4-Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à $T=20^{\circ}\text{C}$

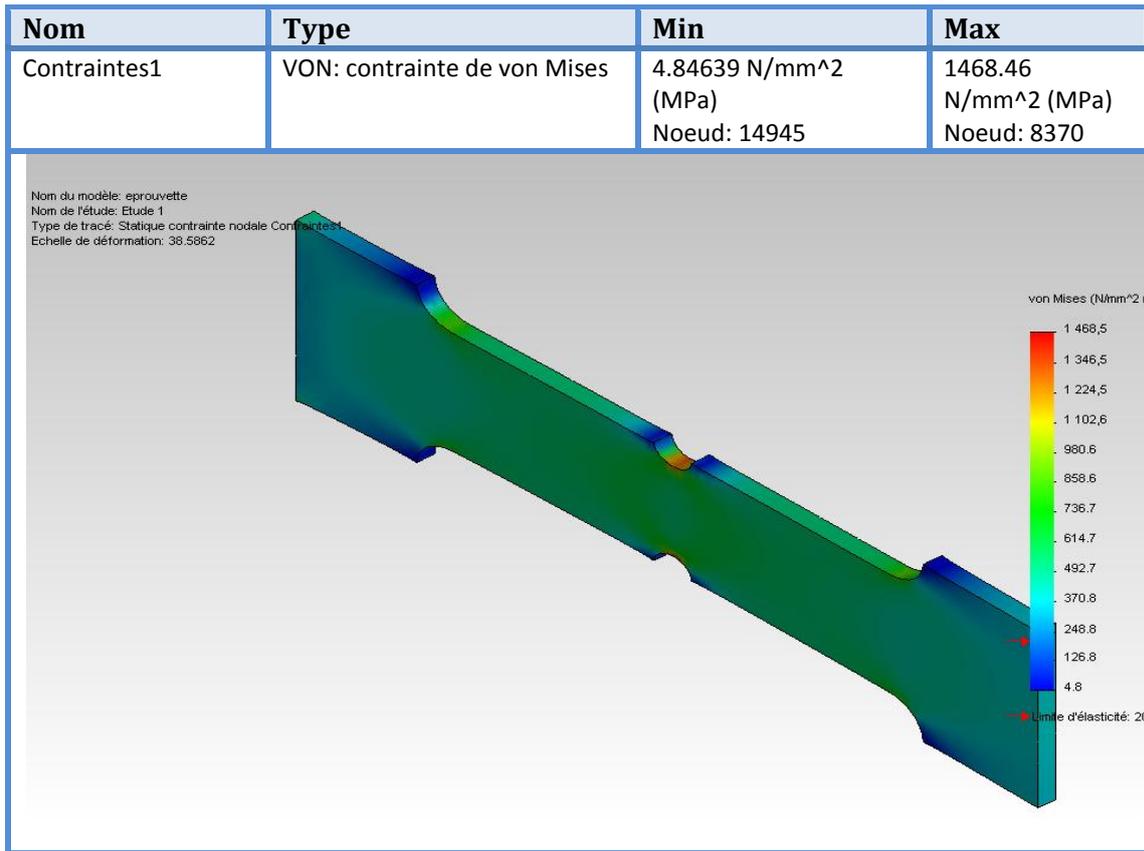


Figure.IV.5-Eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes

Etude 02 :

Les valeurs des contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées pour une température T=100 °C, sont montrées dans le tableau ci-dessous :

σ_{app} (MPA)	50	100	150	200	250	300	350
σ_{rep} (MPA)	292,28	465,57	663,64	868,48	1072,2	1275,2	1572

Tableau IV.5 Contraintes rép en fonction des contraintes app à T=100 °C

Les résultats du tableau (IV.5) sont interprétés dans la figure suivante :

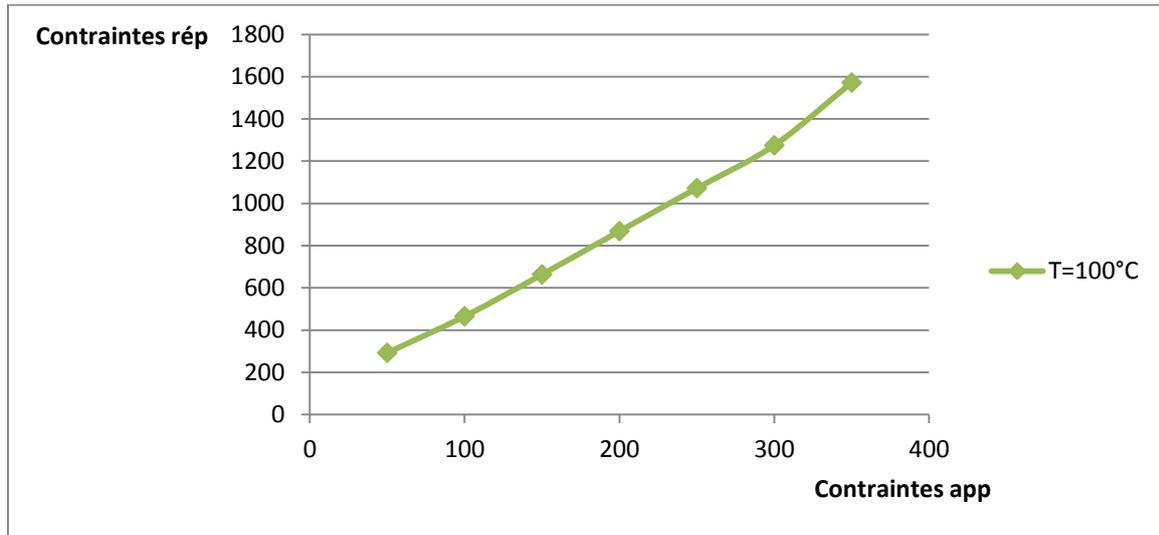


Figure.IV.6-Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à T=100°C

Nom	Type	Min	Max
Contraintes1	VON: contrainte de von Mises	4.21744 N/mm ² (MPa) Noeud: 11160	281.304 N/mm ² (MPa) Noeud: 3800

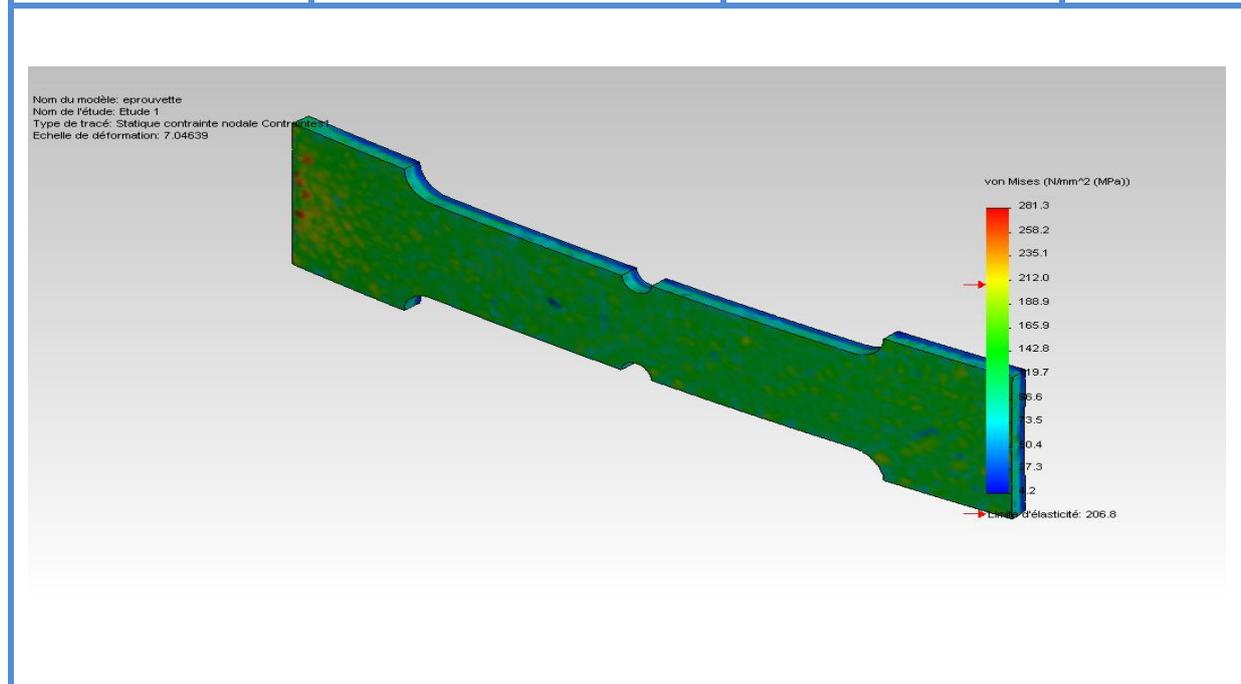


Figure.VI.7-Epreuve-Etude 1-Contraintes-Contraintes

Etude 03

Les valeurs des contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées pour une température $T=200^{\circ}\text{C}$, sont montrées dans le tableau ci-dessous

$\sigma_{app}(\text{MPa})$	50	100	150	200	250	300	350
$\sigma_{rep}(\text{MPa})$	442,53	573,66	765,31	959,05	1153,9	1356,6	1667,3

Tableau IV.6 Contraintes rép en fonction des contraintes app à $T=200^{\circ}\text{C}$

Les résultats du tableau (IV.6) sont interprétés dans la figure suivante :

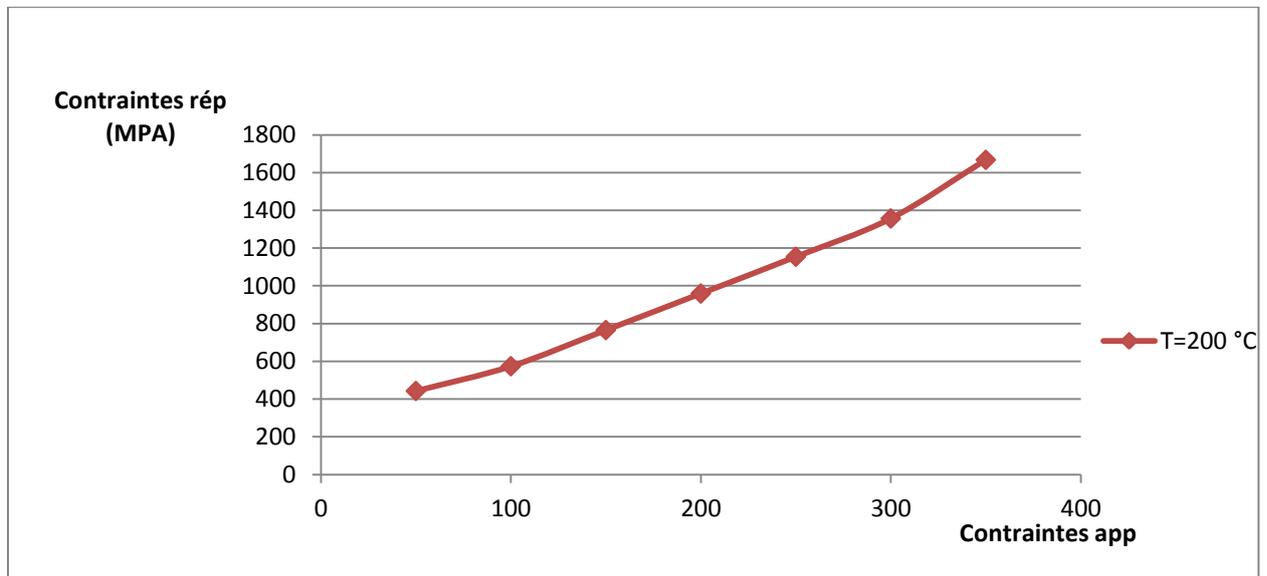


Figure.IV.8-Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à $T=200^{\circ}\text{C}$

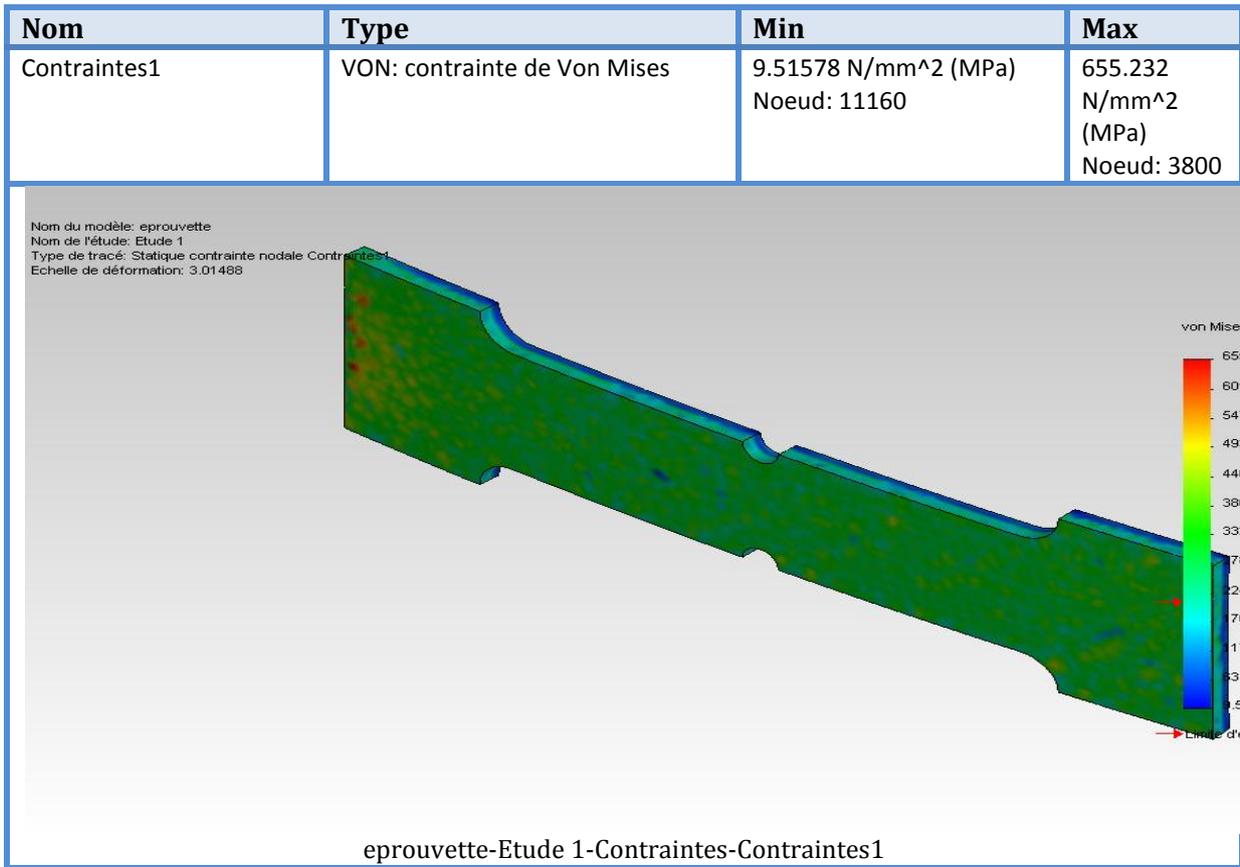


Figure.VI.9-Eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes1

Etude 04

Les valeurs des contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées pour une température $T=300$, sont montrées dans le tableau ci-dessous.

σ_{app} (MPa)	50	100	150	200	250	300	350
σ_{rep} (MPa)	702,48	749	876,4	1065,4	1258,3	1451	1767,2

Tableau IV.7 Contraintes rép en fonction des contraintes app à $T=300$ °C

Les résultats du tableau (IV.8) sont interprétés dans la figure suivante :

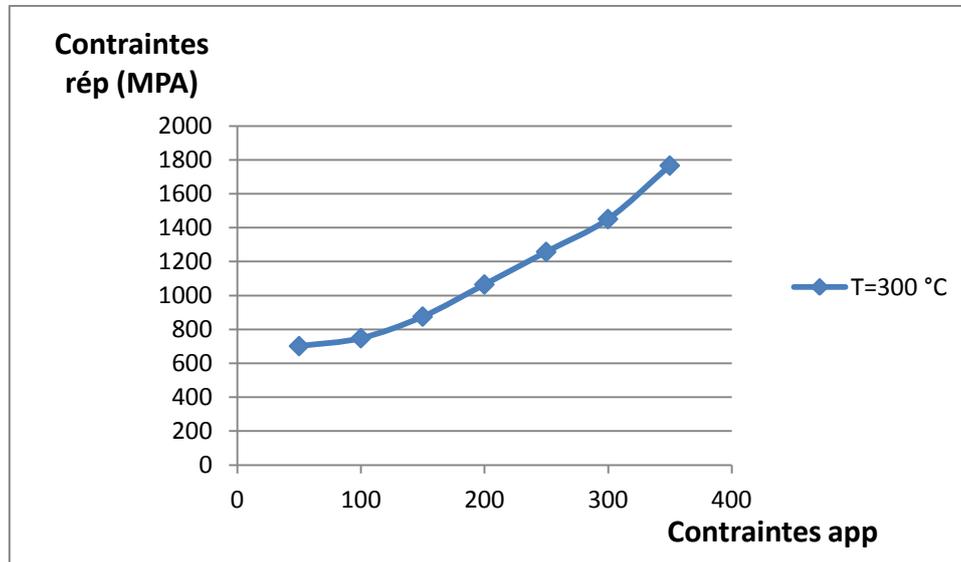


Figure.IV.10-Courbe de la contrainte rép en fonction de la contrainte app à T=300°C

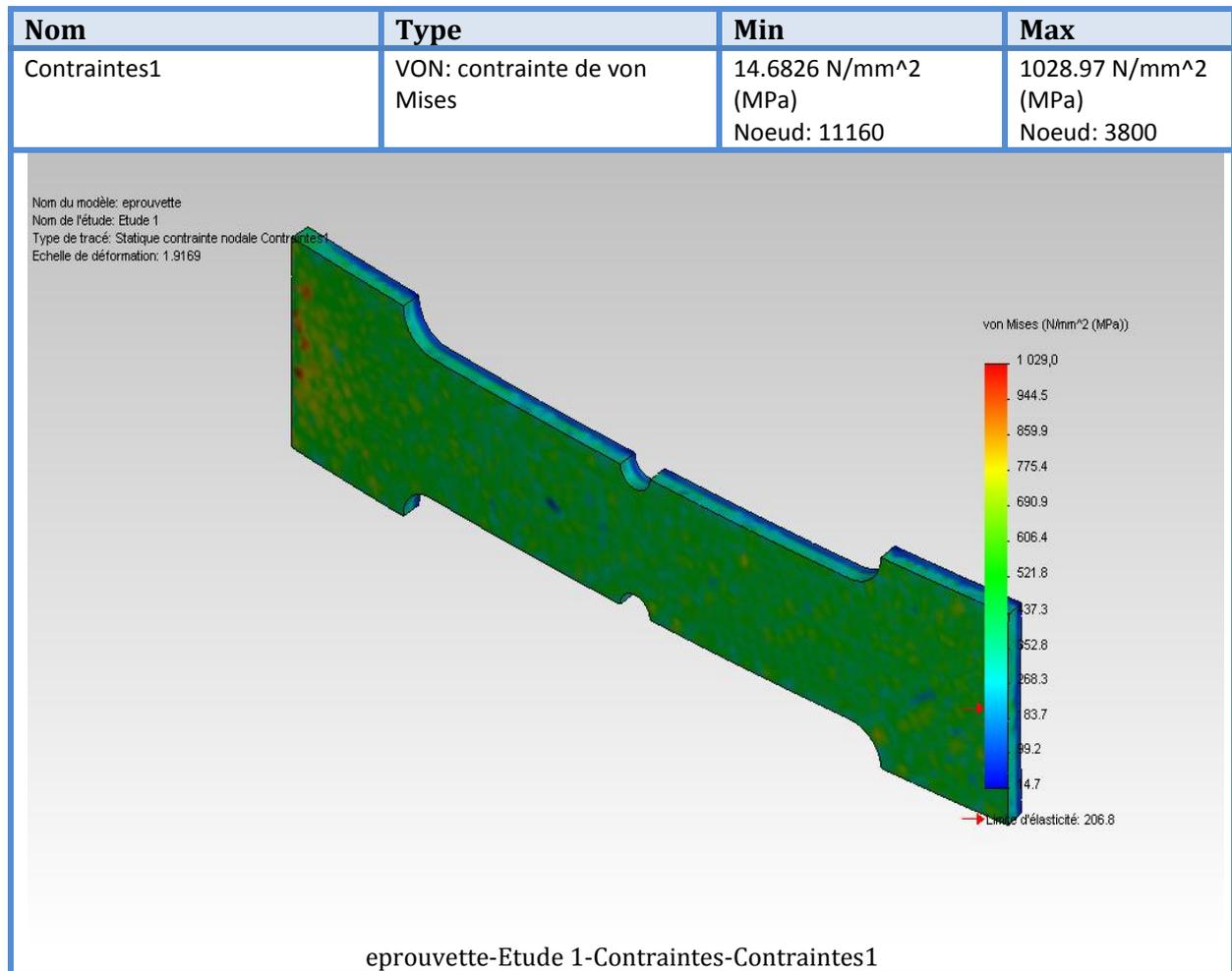


Figure.IV.11-Epreuve-Etude 1-Contraintes-Contraintes1

Courbes superposées : Composé de toutes les courbes déjà étudié

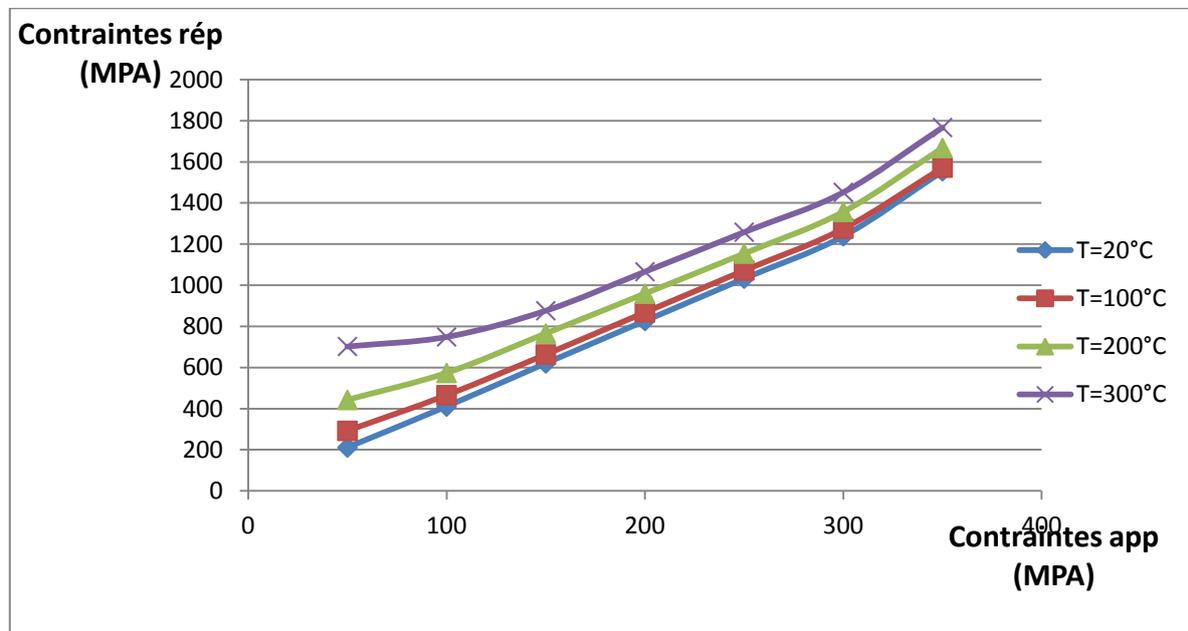


Figure.IV.12-Courbes superposées Contraintes rép en fonction des contraintes app

IV.4.2 Interprétation des résultats statiques

L'évolution de la contrainte réponse (Von-mises) augmente proportionnellement par rapport à la contrainte appliquée, et cela se traduit par un durcissement ou écrouissage locale de la zone touchée.

Ces résultats statiques nous permettent de lancer une étude dynamique.

IV.5 Etude dynamique

Une fois qu'on a collecté les données des résultats statiques, nous pouvons utiliser ces derniers pour enchaîner une étude de fatigue par les étapes suivantes

Etape 01

Spécifier la fatigue comme étant l'étude souhaitée.

Etape 02

Ajouté « l'étude 01 » qui est l'étude statique précédemment exécuté comme référence pour entamer l'étude dynamique de fatigue, ainsi que la spécification du rapport de charge ($R=-1$)

Etape 03

Choisir la courbe de fatigue S-N correspondante a notre acier austénitique

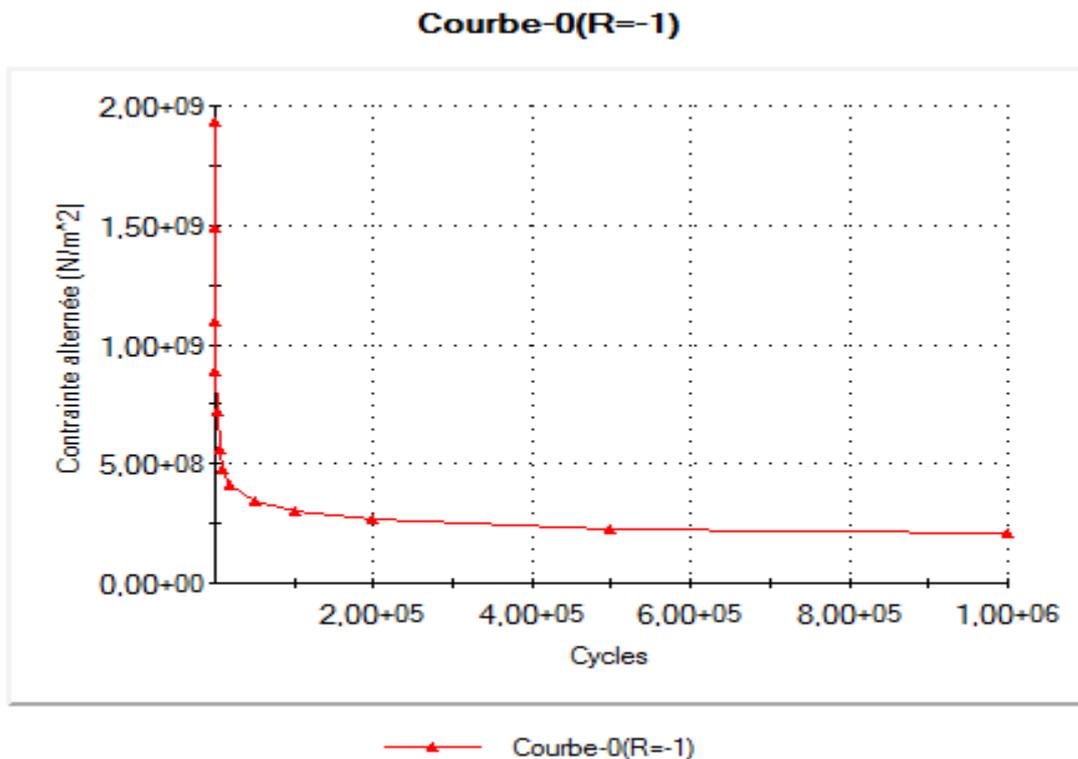


Figure.IV.13-La courbe de fatigue S-N de l'acier austénitique

Etape 04

Après l'exécution de l'étude , nous passons a la collecte des résultats pour chaque température, et cela en sondant les résultats sur les entités sélectionnées

IV.5.1 Résultats des études dynamiques

Etude 01

Les valeurs des contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle pour une température $T=20^{\circ}\text{C}$, sont montrées dans le tableau ci-dessous

σ_{app}	75	100	150	200	250	300	350
Nbr de cycles	6,94E+04	16089	3264	1069,1	520,53	340,73	192,56

Tableau IV.8 Contraintes appliquées-nombres de cycles

Remarque :

Pour des raisons d'interpolations, on enlève la valeur « 50 MPA » a ($T=20^{\circ}\text{C}$), vu que la limite d'endurance est très grande et que l'éprouvette est totalement sécurisé, et on la remplace par la contrainte de « 75 MPA » qui est plus significative

Les résultats du tableau (IV.8) sont interprétés dans la figure suivante :

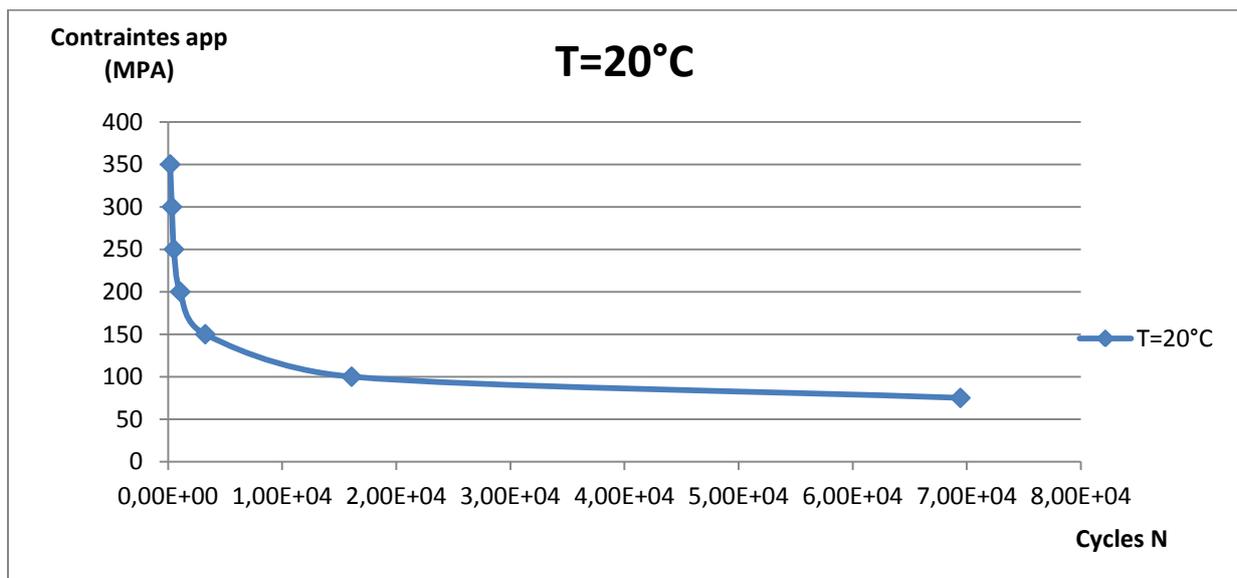


Figure.IV.14-Courbe de wohler a ($T=20^{\circ}\text{C}$).

Etude 02

Les valeurs des contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle pour une température $T=100^{\circ}\text{C}$, sont montrées dans le tableau ci-dessous

σ_{app}	50	100	150	200	250	300	350
Nbr de cycles	40939	5766	1658,9	735,06	407,97	234,73	134,11

Tableau IV.9 Contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

Les résultats du tableau (IV.9) sont interprétés dans la figure suivante :

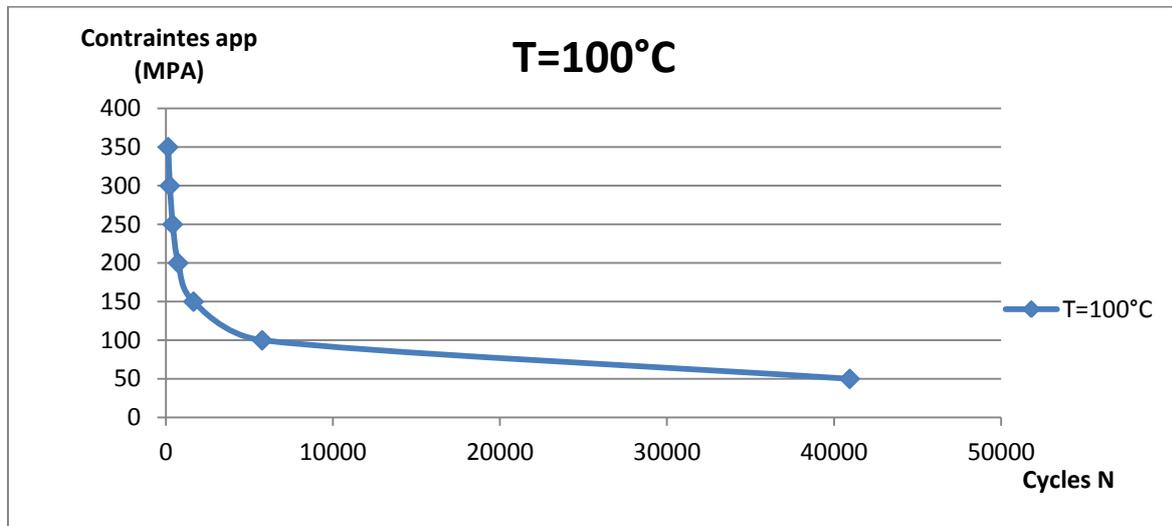


Figure.IV.15-Courbe de wolher a (T=100°C).

Etude 03

Les valeurs des contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle pour une température T=200°C, sont montrées dans le tableau ci-dessous

σ_{app}	50	100	150	200	250	300	350
Nbr de cycles	4988,7	2053	894,17	462,3	294,64	178,24	100

Tableau VI.10 contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

Les résultats du tableau (IV.10) sont interprétés dans la figure suivante :

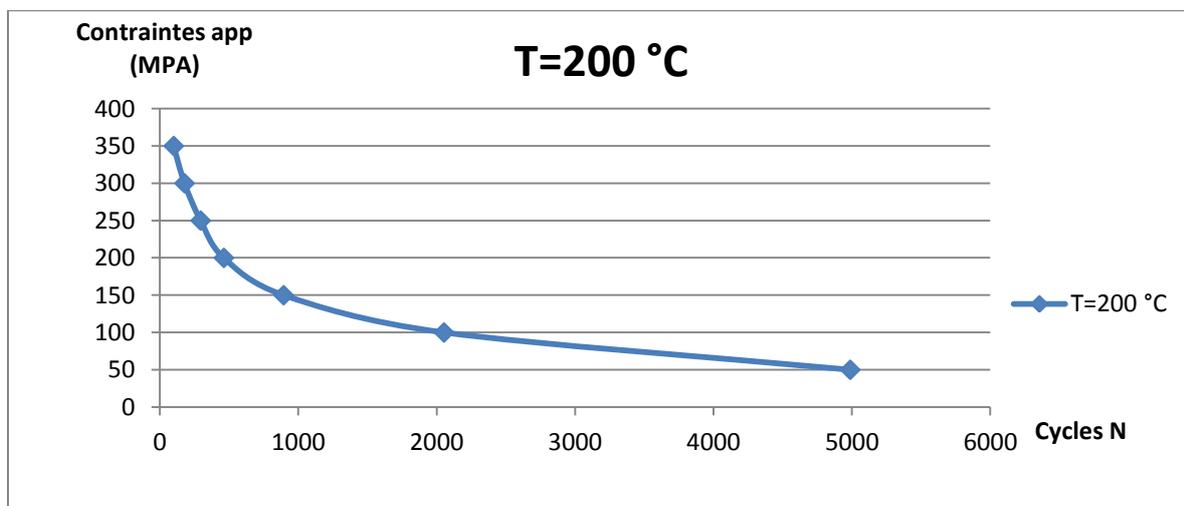


Figure.IV.16-Courbe de wolher a a (T=200°C).

Etude 04

Les valeurs des contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle pour une température $T=300^{\circ}\text{C}$, sont montrées dans le tableau ci-dessous

σ_{app}	50	100	150	200	250	300	350
Nbr de cycles	986,22	931,84	894,17	342,38	193,02	134,98	100

Tableau IV.11 contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

Les résultats du tableau (IV.11) sont interprétés dans la figure suivante :

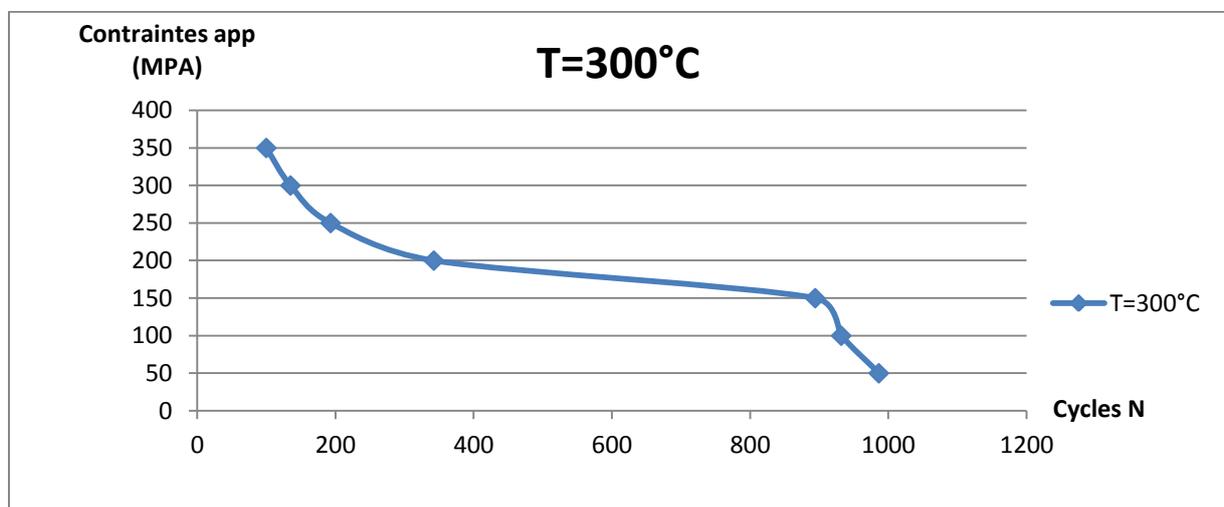


Figure.IV.17-Courbe de wolher a ($T=300^{\circ}\text{C}$).

Courbes superposées

Composé de toutes les courbes de Wohler déjà étudié

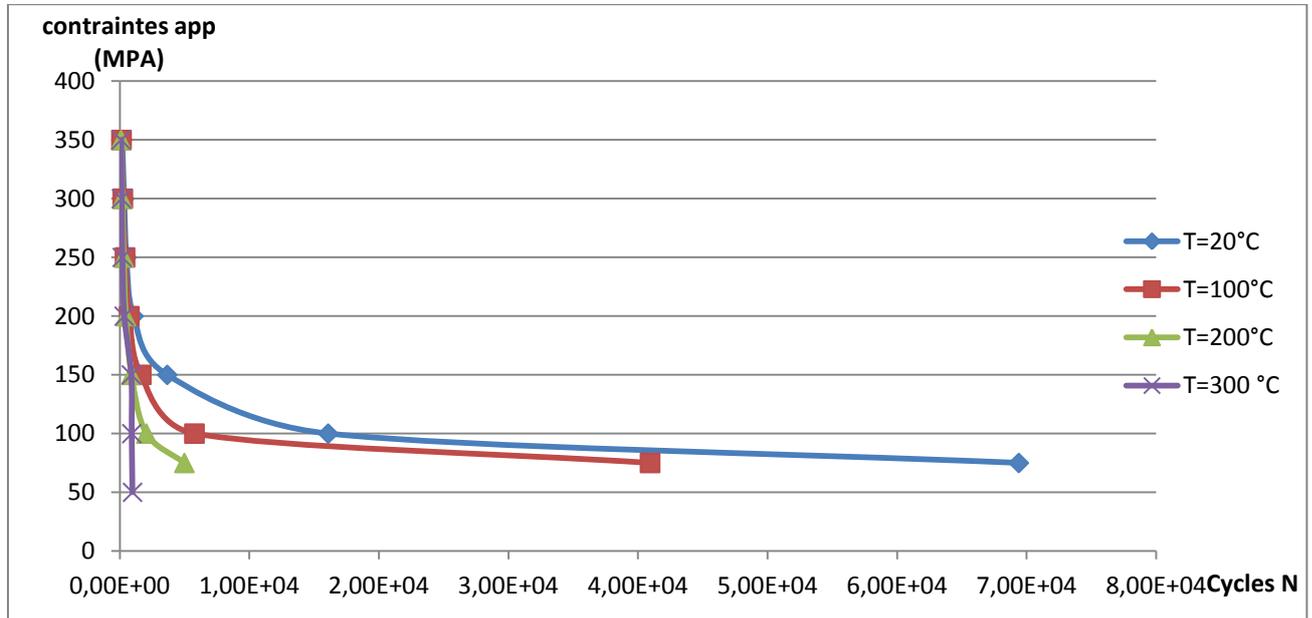


Figure.IV.18-Courbes superposes de wohler

Calcul des paramètres

A partir du modèle mathématique on procède a l'identification des paramètres (a ET b) de l'équation :

$$\text{Log (N)} = a - b \cdot S$$

Avec : $-\log N = -a + bs$

$$bS = a - \log N$$

$$S = a/b - \log N$$

$$Y = a - b \cdot x$$

Temperatures	T=20	T=100	T=200	T=300
A	4,08	4.30	4,5	3,3
B	0,00844	0,00660	0,00775	0,00355

Tableau IV.12 Paramètres des courbes de Wohler

IV.5.2 Comparaison

Pour mieux comprendre l'effet de la température sur notre acier, nous avons effectué un teste supplémentaire de fatigue sans l'influence de la température pour comparer deux courbes et voir la différence :

Les résultats de cet essai sont interprètes dans le tableau et la courbe qui suivent :

σ_{app}	50	100	150	200	250	300	350
Nbr de cycles	8,09E005	16282	3286,5	1075,9	522,97	341,46	192,75

Tableau IV.13 Contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

Les résultats du tableau (IV.13) sont interprétés dans la figure suivante :

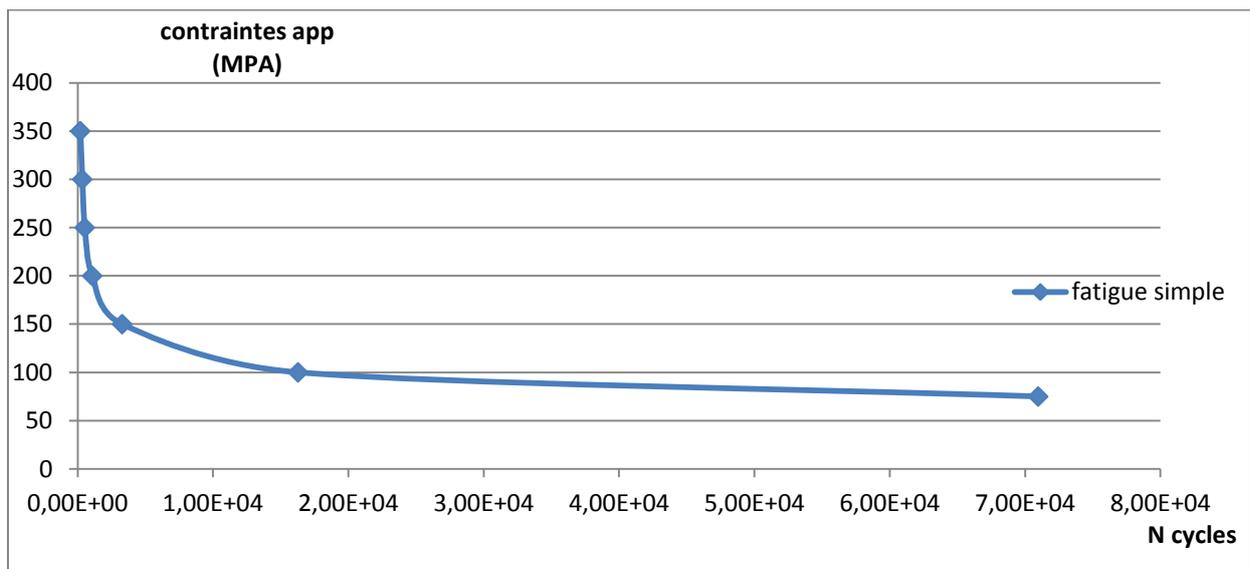


Figure.IV.19-Courbe de fatigue mécanique SN

Courbes superposées

On superpose la courbe à $T=100^{\circ}\text{C}$ et la courbe de fatigue simple

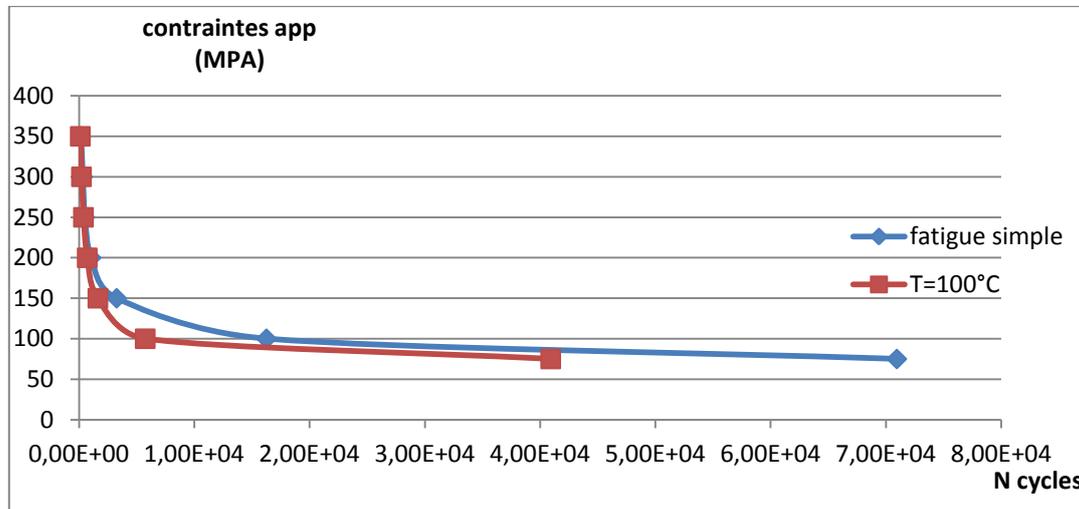


Figure.IV.20-Courbes de fatigue S-N superposées

IV.5.3 Interprétation des résultats

Quand on augmente la température « T° » la limite d'endurance « σ_D » diminue.

Sous l'effet TRIP et celui de la température la plastification diminue, la transformation martensitique rend notre matériau fragile.

A une température de $T^{\circ} = 300\text{C}^{\circ}$ le nombre de cycle à rupture correspondant à une contrainte de 350 MPA est de 100 cycles, on constate une chute libre de la limite d'endurance, cela est dû à l'effet thermique

A $T=20\text{ C}^{\circ}$ celle correspondant a une sollicitation égale à la limite de la fatigue indique qu'une amplitude de déformation plastique est bien présente, la limite de fatigue peut alors s'interpréter par le fait qu'un nombre de cycles ait été atteint ($1.e+005$), la déformation plastique qui en résulte reste très faible.

On observe qu'une diminution de niveau de contrainte entraîne une augmentation de la durée de vie, et qui se traduit aussi par une diminution de l'amplitude de la déformation plastique.

L'endommagement des aciers résulte d'un couplage de la contrainte mécanique et thermique.

La courbe S-N permet de connaître le nombre de cycles à la limite d'endurance d'un matériau pour un chargement et température donnée.

Conclusion générale

la simulation numérique par éléments finis des produits est aujourd'hui une réalité industrielle elle permet de mettre au point ,les produit tout en évitent de recourir a la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur –correction qui est plus couteuse (temps) ainsi, la modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement la mie en forme d'un matériau et de jouer sur certains paramètres (géométrie , rhéologique...) afin d'optimiser le procédé ,la simulation de la fatigue dans les procédés de mise en forme a pour but de réaliser des études de comportement d'un point d'un acier inoxydable entièrement austénitique de nuance AISI 304L.

afin de bien mené notre étude, nous avons fait appel à une série d'essais statiques (traction) , avec comme objectif l'observation de l'évolution de la contrainte de von-mises (contrainte réponse) en fonction de la contrainte appliqué en variant la température. Et la principale vocation de ces essais c'est d'être inclus dans les essais dynamique qui suivent.

En variant les températures la contrainte de Von mises augmente en fonction de la contrainte applique.

En augmentant la température on remarque une chute libre des caractéristiques mécaniques (endurance).

A une température basse l'allure de la courbe S-N est asymptotique, le nombre de cycle a rupture tend vers l'infini pour des faibles contraintes, on peut ne pas avoir des rupture en fatigue dans des délais raisonnable

La courbe S-N permet de connaitre le nombre de cycle à limite d'endurance d'un matériau pour un chargement et température données.

L'augmentation de la contrainte engendre une diminution de la durée de vie .

Perspective :

Vu les résultats obtenus par cette méthode, elle ne devrait pas être seulement testée par simulation, mais aussi des données de mesures réelles sans l'effet de la température, ce dernier est d'une importance particulière, car les erreurs de mesures sont présent dans la pratique. Il est encore un défi d'appliquer la méthode actuelle pour les cas réels.

On recommande l'utilisation d'autres codes de calcul pour modélisé le phénomène.

Références Bibliographiques

[1] AMY Zahia ;, Université Mouloud Mammeri de T.Ouzou, **Caractérisation de l'acier inoxydable X5.Cr Ni,18-10 et étude de son oxydation à température.**

Année 2013

[2] K.H.Lo , C.H.Shek, J.K.L, Lai **Recent developments in Stainless steels, Materials Sciences and Engineering**

R65(2009)

[3] M.K.AHN, H.S.Know et H.M.Lee **Quantitive Comparison of the influence of tungsten and molybdenum, on the passivity of Fe-29Cr ferritic Stainless Steels .**

Elsevier (1988)

[4] J.Baralis et G.Maeder **Précis métallurgie .**

Nathan , Paris 1997

[5] M.Schaeffler **Constitution diagram for Stainless steel weld , Metal Progress.**

56 (1949)

[6] Cohen M., Olson G.et Clapp P. **On the classification of displacive phase transformation. In Proceedings of the International Conference on the Martensitic Transformation Cambridge, Massachusetts**

USA, p.1_11. (1979).

[7] Olson G.B. et Cohen M.(1975).**Kinetics of Strain-Induced Martensitic Nucleation, Metall.Trans.**

6A, p.791-795.

Références bibliographiques

[8] Serri J. Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement plastique d'aciers à transformation martensique. Applications à la mise en forme, Thèse de doctorat.

L'Université Paul Verlaine de Metz (2006).

[9] Maki T. Microstructure and mechanical behaviour of ferrous martensite. Materials Science Forum.

56-58, p 157-168.(1990).

[10] Bosthekan M. comportement mécanique et stabilité microstructurale d'un acier inoxydable austénitique type AISI 316LN sous forte plasticité monotone et cyclique à 77k et 300k. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Lille (France) (1997).

[11] Souлами A. Modélisation du comportement des aciers 100% austénitiques à transformation de phase. Applications aux calculs des vitesses de propagation en fatigue,

Thèse de doctorat, l'Université Paul Verlaine de Metz. (2007).

[12] Mag C.L. Transformation kinetics, Microplasticity and Aging of Martensite in Fe-31Ni, PhDthesis. Carnegie Institute of Technology University, Pittsburg (PA)(1966).

[13] Greenwood G.W et Johnson R.H The deformation of metals under small stresses during phase transformation.

Proc. Roy Soc., A283, p.403_422. (1965).

[14] André JAUBERT Approche Variationnelle de la Fatigue.

Université Paris VIII.

[15] Anne Le PECHER . Fatigue thermique d'un Acier Inoxydable austénitique : influence de l'état de surface par une approche multi-échelles.

ECOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES « ECOLE CENTRALE PARIS »

Références bibliographiques

[16] Claude ROBIN .**Mécanique de la rupture et endommagement par fatigue**

Ecole de Mines.(2007).

[17] **Cours de Fatigue et mécanique de la rupture** CAMPUS, plate forme
d'enseignement commune des écoles des mines OIM.CM.F14.1

25/10/2014

[18] Encyclopédie Internationale des sciences et techniques.**article contraintes
thermiques.**

vol3 , Presse de la cité 1970.

[19] D.A.SPERA . **What's the thermal fatigue ?**

ASTM-STP, 1976

[20] G.DEGALLAIX , J.FOCT. **La Fatigue thermique.Aspects expérimentaux ,
Mécanique, Matériaux , Electricité**

N°382, 1981.

[21] Les éléments finis : de la théorie à la pratique, par Andre Fortin Professeur titulaire
Département de mathématiques et de statistique

Université Laval et Andre Garon Professeur titulaire Département de génie mécanique
Ecole Polytechnique de Montréal.1997-2011

[22] O.Rahmani, S.Kebdani **Introduction à la méthode des éléments finis pour
ingénieur**

Office des publications universitaires, 1988

[23] Hervé Oudin. **Method des èlements finis**

Centrale Nante 28/09/2008

Références bibliographiques
