

RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MÉMOIRE DE MASTER ACADÉMIQUE

SPÉCIALITÉ : GÉNIE MÉCANIQUE

OPTION : COMPORTEMENT ET MISE EN FORME DES MATÉRIAUX

THÈME

**ETUDE GEOMETRIQUE DE COMPORTEMENT A
LA STATIQUE D'UN ACIER INOX 304L SOUS
SOLLICATION MECANIQUE ET THERMIQUE**

PRÉSENTÉ PAR

KANA Sonia

Devant le jury d'examen composé de :

Mr. ALMANSBA	Madjid	UMMTO	Président
Mr. SEDJAL	Hamid	UMMTO	Promoteur
Mr. FERHOUM	Rabah	UMMTO	Examinateur
Mr. DJERIDI	Rachid	UMMTO	Examinateur

PROMOTION 2015 /2016

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience de mener à bien notre projet de fin d'études.

A Monsieur le Professeur H.SEDJAL, Mon promoteur

Je vous exprime toute ma reconnaissance pour votre aide, vos
Nombreux conseils, et votre bonne humeur. Soyez assurés de tout mon
Respect et de ma profonde gratitude.

J'exprime ma très sincère reconnaissance à Monsieur, le docteur FEHOUM et
DJERIDI, pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce projet et de participer au jury.

Je remercie Monsieur M.ALMANSBA, de m'avoir fait l'honneur de présider notre
jury de mémoire.

Je remercie aussi tout qui m'on aidé de près ou de loin pour ce modeste travail

Je souhaiterai également remercier tous mes enseignants du département de mécanique,
en particulier de la formation CMFM.

Introduction	1
--------------------	---

Étude bibliographique

I. Généralités sur les aciers inoxydables.....	3
I. 1Généralités sur les aciers inoxydables austenitiques.....	3
I.2. Etude des aciers inoxydables austénitiques AISI 304.....	5
I.3. Les applications des aciers AISI 304.....	6
II. La fatigue	7
II.1. Définition de la fatigue.....	7
II.2. Mécanismes de ruine par fatigue.....	8
III. Historique sur la méthode des éléments finis	11
III.1 La mécanique des milieux discrets	11
III.2 La mécanique des milieux continus	11
IV. Méthodes d'approximation en physique	13
IV.1. Processus d'analyse.....	13
IV.2. Démarche éléments finis	14
IV.2 .1. Formulation du problème physique à étudier	15
IV.2.2 Fonctions d'interpolation pour un élément	17
IV .2.3- Construction des matrices élémentaires.....	18
IV .2.4 Assemblage	19
IV .2.5 Introduction des conditions aux limites.....	20
IV.2.6 Utilisation d'un logiciel éléments finis.....	20
IV.2.7 Déroulement d'une étude	20
IV.2.8 Analyse du problème	21
IV.2.9 Choix du modèle.....	21
IV.2.10.Choix du type d'éléments.....	21
IV.2. 11.Choix du maillage	21
IV.2.12.Hypothèses de comportement.....	21
IV.2.13.Création et vérification des données.....	22
IV.2.14.Exécution du calcul	22
IV.2.15.Exploitation des résultats.....	22
VI. Conclusion	23

Techniques expérimentales

Introduction	24
--------------------	----

II.1.Matériau et techniques simulation.....	24
II.1.1.Le matériau utilisé.....	24
II.2.Essais de fatigue en traction uniaxial et simulation	24
II.3.Simulation sous SolidWorks	25
II.4.but de la simulation.....	
II.5.Présentation de SolidWorks simulation	25
II.5.1.dimensionnement de l'éprouvette	26
II.5.2.Analyse statique.....	26
II.5.3.Condition aux limites	26
II.5.4.Données du matériau.....	27
II.5.6.Simulation	28
II.5.7.Analyse de fatigue	29

Simulation numérique

III.1.Introduction.....	30
III.2.But de l'étude.....	30
III.3.Description de l'essai.....	31
III.3.1.L'éprouvette	31
III.4 .Etude statique	32
III.4.1.Résultants des études statiques.....	36
III.4.2.Interprétation des résultats statiques.....	45
III.5.Etude dynamique.....	45
III.5.1.Résultats des études dynamique.....	45
III.5.2.Comparaison	49
III.6 .Interprétation des résultats.....	51

Conclusion générale

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.

Première partie

Étude bibliographique

I. Généralités sur les aciers inoxydables

L'**acier inoxydable**, couramment appelé **acier inox** ou **inox**, a un grand rôle dans d'innombrables domaines : vie quotidienne, industries mécaniques, agroalimentaires, chimiques, transports, médecine, chirurgie, etc. C'est une famille d'aciers, alliages de fer et de carbone, auxquels on ajoute essentiellement du chrome qui, au-delà de 10,5 % en solution (selon la teneur en carbone) dans la matrice, provoque la formation d'une couche protectrice d'oxyde de chrome qui confère à ces aciers leur inoxydabilité.

D'autres éléments peuvent être ajoutés, notamment le nickel qui améliore les propriétés mécaniques en général et la ductilité en particulier, et d'autres éléments comme le molybdène ou le titane qui améliorent la stabilité de l'alliage pour des températures autres que l'ambiante ainsi que des éléments à hauts points de fusion comme le vanadium et le tungstène accompagné en général d'une augmentation de la teneur en chrome, pour obtenir la résistance aux hautes températures au contact d'une flamme (aciers réfractaires).

I.1. Généralités sur les aciers inoxydables austénitiques

Les aciers inoxydables austénitiques possèdent une bonne résistance à la corrosion, ainsi que de bonnes propriétés mécaniques depuis la température de l'azote liquide jusqu'à 650°C environ. Ils ont une forte capacité d'érouissage et sont ductiles. Par ailleurs, ils sont soudables par tous les procédés conventionnels. Ils constituent donc des matériaux de structure particulièrement intéressants et sont très largement employés dans le transport, l'industrie chimique et l'industrie de l'énergie.

Les aciers inoxydables austénitiques ont deux caractéristiques métallurgiques principales :

- Ils contiennent suffisamment de chrome pour leur conférer un caractère inoxydable.
- Ils contiennent suffisamment d'éléments gammagènes, comme le nickel, pour leur conférer leur structure cubique à faces centrées. Ils s'agissent de

Etude bibliographique

solutions solides obtenues par hypertrempe depuis une température de l'ordre de 1100°C.

Le Tableau suivant récapitule les compositions chimiques de différentes nuances d'aciers inoxydables austénitiques. La nuance 316 se différencie de la nuance 304 par l'ajout de 2.5% de molybdène. Cet ajout permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques ainsi que la résistance à la corrosion. Les nuances 321 et 347 sont stabilisées par des éléments carburigènes. Le sous type L signifie « lowcarbon » et indique que l'acier contient moins de 0.03% de carbone. Le sous type L(N) signifie de plus que la teneur en azote est contrôlée et donc supérieure à celle des aciers bas carbone simples. Par opposition aux aciers bas carbones, on notera parfois H « highcarbon » un acier qui possède une teneur en carbone supérieure à 0.03% [1].

Tableau I.1 : composition chimique de quelques aciers inoxydables austénitiques [1].

	C	N	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	Ti	Nb	S	P
	max	max	min-max	min-max	min-max	max	max	max	min-max	min-max	max	max
304	0.080		17-20	9-12		2	1	1			0.030	0.040
304 L	0.030		17-20	9-12		2	1	1			0.030	0.040
304 L(N)	0.035	0.080	18.5-20	9-10		2	1	1			0.030	0.040
316	0.080		16-19	10-14	2.25-2.75	2	1	1			0.030	0.040
316L	0.030		16-19	10-14	2.25-2.75	2	1	1			0.030	0.040
316L(N)	0.035	0.080	17-18.2	11.5-12.5	2.25-2.75	2	1	1			0.030	0.040
347	0.080		17-20	9-13		2	1	1		8*C-1.00	0.030	0.040
321	0.100		17-20	9-13		2	1	1	5*C-0.75		0.030	0.040

I. 2. Etude des aciers inoxydables austénitiques 304

L'acier inox AISI 304 (DIN 1.4301 - X 5 Cr-Ni 18 10) est le nuance des aciers austénitiques, sa résistance chimique est très élevée, sa ductilité est comparable à celle du cuivre ou du laiton, il est amagnétique, et aussi ses caractéristiques mécaniques sont élevées. Les teneurs en éléments d'addition tournent autour de 18 % de chrome et 10 % de nickel. La teneur en carbone est très basse et la stabilité améliorée par des éléments tels que le titane ou le niobium. Il est très mauvais conducteur de la chaleur. Le pliage à la presse ou à la molette ne présente pas de difficulté particulière. L'emboutissage nécessite des machines deux fois plus puissantes que celles qui servent pour l'acier doux. Le meilleur moyen pour souder les aciers inoxydables, est le soudage avec métal d'apport austénitique. Tous les procédés traditionnels sont utilisables, soudage à l'arc à l'électrode enrobée, le soudage à l'arc submergé, les procédés sous atmosphère inerte comme le TIG et le MIG, le soudage plasma. Le flux d'argon ou d'hélium autour de l'arc électrique empêche l'oxydation du bain de fusion ainsi que pendant le transfert du métal d'apport [2].

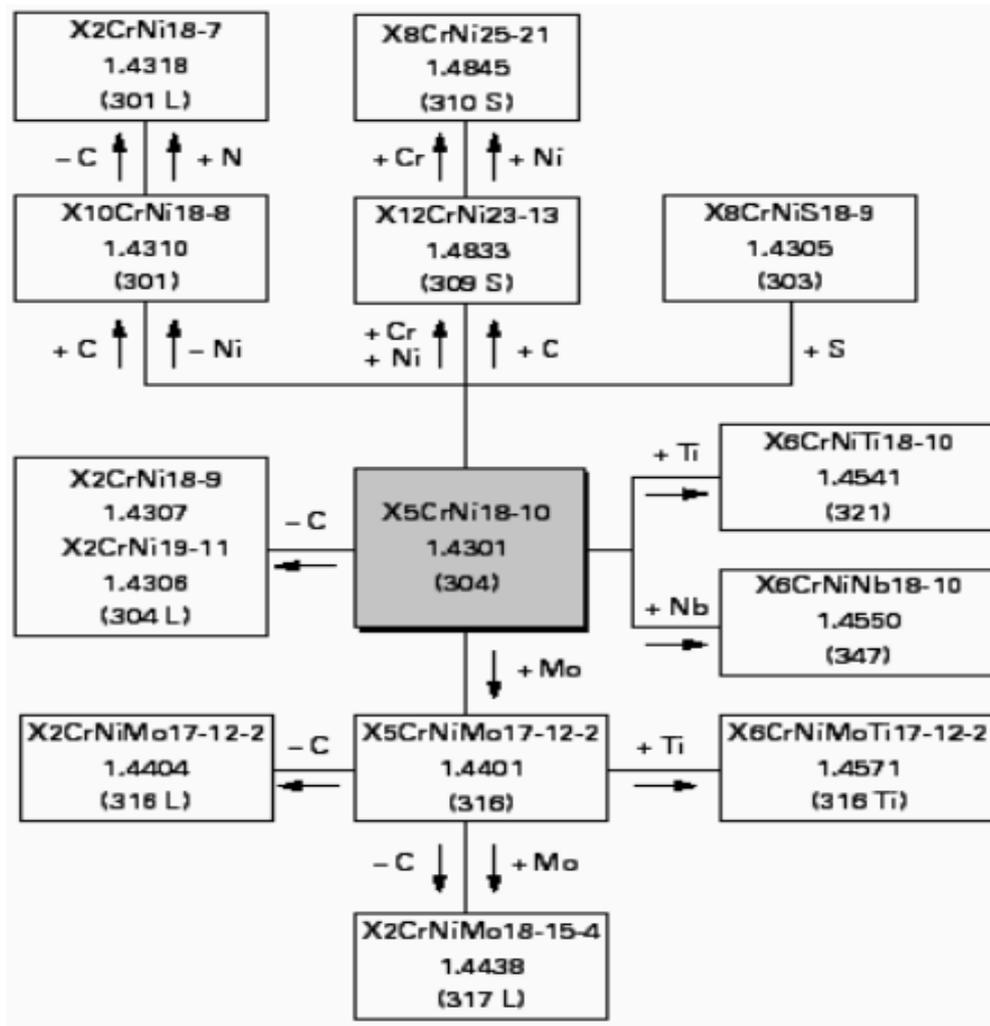


Figure II.1 : principaux types d'aciers inoxydables austénitiques au chrome-nickel (molybdène) dérivés de la nuance de base AISI 304 (DIN : X5CrNi18-10) [2].

I.3. Les applications des aciers 304

L'application des aciers 304 est très vaste, on cite par exemple :

- récipients pour les produits laitiers
- Cuisine domestique et équipement collectivité
- Equipements laitiers
- Structures soudées

- Appareils domestiques
- Eviers
- Cadres métalliques pour le bâtiment
- Plateaux de service et coutellerie
- Tubes décoratifs
- Systèmes d'échappement

II. La fatigue

II.1. Définition de la fatigue

La fatigue est définie comme étant la dégradation ou la rupture d'un matériau provoquée par chargement cyclique. Même si les contraintes appliquées sont inférieures à la limite d'élasticité, une sollicitation cyclique peut également provoquer l'apparition et la propagation des fissures à la surface des pièces grâce au glissement des plans cristallins. La fissure se propage ensuite dans un plan perpendiculaire à la contrainte principale majeure, en avançant d'un incrément à chaque cycle, jusqu'à la rupture finale brutale (figure III.3). Le tracé du nombre de cycles à la rupture NR en fonction de la contrainte maximale appliquée lors de chaque cycle (courbe de Wöhler) permet de définir la limite d'endurance σ_D , niveau de contrainte en dessous duquel le matériau étudié ne s'endommage pas par fatigue. Cette limite est très sensible à la nature des cycles de sollicitation et à l'environnement, en général largement inférieure à la limite d'élasticité Re , voire proche de 0 pour certains matériaux. Pour les niveaux de contrainte élevée et jusqu'à $NR=10^4$ à 10^5 cycles, dans la région de fatigue oligocyclique, chaque cycle produit une déformation plastique $\Delta\epsilon_p$ qui s'accumule selon la loi de Manson-Coffin:

$$\Delta\epsilon_p \cdot NR^n = \text{Constante, avec } n \approx 0,5$$

Au-delà, NR est plutôt donné par la loi de Basquin en fonction de l'amplitude de contrainte $\Delta\sigma$ [3]:

$$\Delta\sigma \cdot NR^a = \text{Constante, avec } 0,12 \geq a \geq 0,07$$

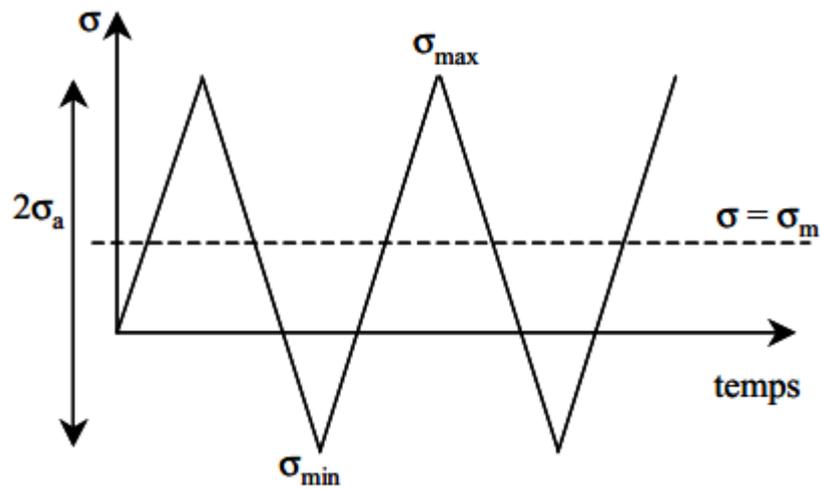


Figure III.1 : chargement d'une éprouvette de fatigue à contrainte imposée

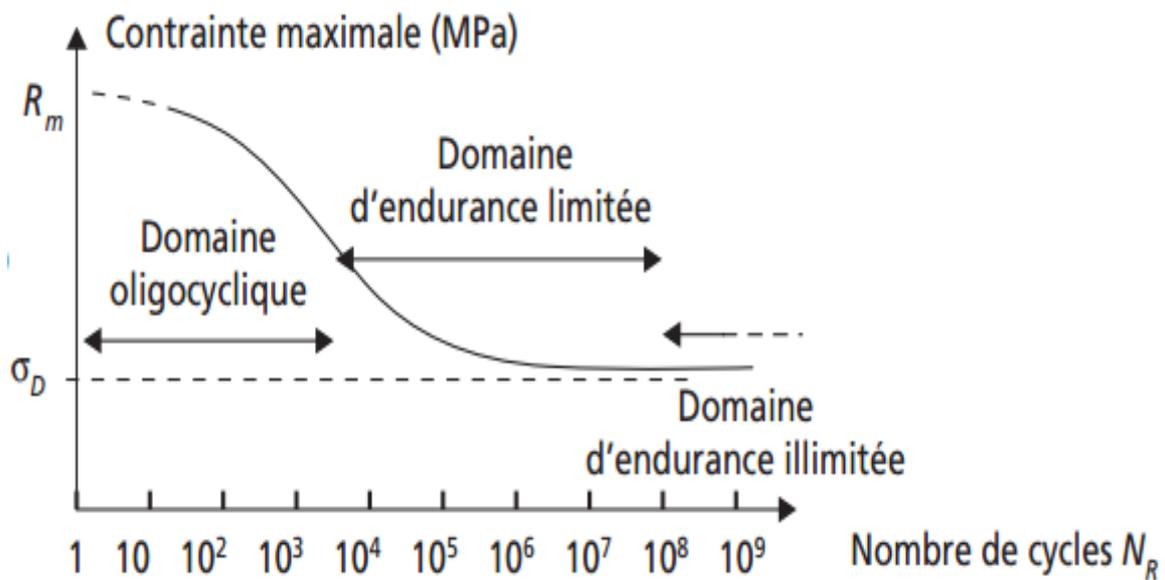


Figure III.2 : courbe de Wöhler [3]

II.2. Mécanismes de ruine par fatigue

On distingue généralement quatre étapes dans le processus de ruine par fatigue sur une éprouvette initialement non fissurée.

La première étape est l'amorçage de la fissure : Il a presque toujours lieu en surface dans les matériaux métalliques comme les aciers inoxydables ou

éventuellement à une discontinuité proche de la surface (gros précipité, gros oxyde, interface entre deux couches de duretés différentes...), qui conduit localement à une forte concentration des contraintes. Le chargement mécanique ne déclenche pas la ruine immédiate de l'éprouvette mais certains grains vont se déformer de manière intense, soit parce qu'ils sont très bien orientés pour glisser et relativement peu confinés car proches de la surface, soit du fait d'une irrégularité géométrique (rayure), soit d'une manière assistée par la corrosion. Les structures de déformation (« en échelle » avec des parois de dislocations et des canaux vides de dislocation sur les métaux de structure cubique à faces centrées, en bandes dénudées de précipités pour les alliages à précipités cisailables...) forment des bandes de glissement persistantes, dans lesquelles la déformation se localise peu à peu. Le cumul de déformation cyclique donne naissance à de petites extrusions de ces bandes ou, à l'inverse, de minuscules entailles (intrusions), toutes les deux servant d'amorces de fissures de fatigue.

La deuxième étape, dite « stade I », est la propagation d'une ou plusieurs petites fissures : généralement dans les bandes de glissement persistantes ou tout au moins selon les plans de glissement de la structure cristalline. Les microfissures se propagent très lentement (de l'ordre du nm/cycle) et sont souvent arrêtées par les joints de grains qu'elles ne peuvent pas franchir facilement si le grain adjacent n'est pas favorablement orienté.

La troisième étape, dite « stade II », est la propagation d'une fissure plus longue : qui cette fois suit le plan orthogonal à la plus grande contrainte principale (positive). La fissure est beaucoup plus facile à détecter que dans l'étape précédente, elle risque en revanche de conduire rapidement à la rupture. La vitesse de propagation lors du stade II est de l'ordre du $\mu\text{m}/\text{cycle}$. La fissure se propage par une succession d'émoussesments (par déformation plastique) et de pincements (lors des déchargements). Des stries, caractéristiques de la rupture par fatigue, sont souvent visibles sur les surfaces de rupture. Une strie représente généralement un cycle de fatigue.

La dernière étape est la rupture finale : lorsque la section portante, qui se réduit à mesure que la fissure progresse, ne peut plus supporter le chargement appliqué, la pièce rompt, généralement de manière ductile.

La surface de rupture comporte donc une zone d'amorçage (sur une piqûre de corrosion, un gros précipité, une entaille sévère, etc...), une zone de propagation par fatigue et une zone de rupture ductile finale.

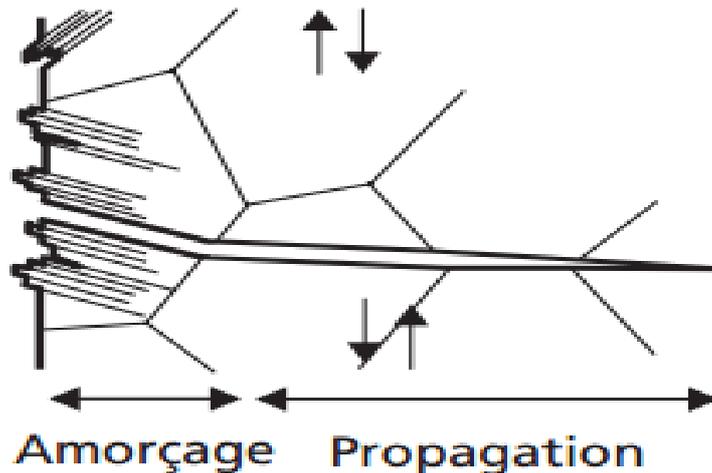


Figure III.3 : amorçage et propagation des fissures de fatigue dans un acier inoxydable austénitique [4]

III. Historique sur la méthode des éléments finis

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 côtés, 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 pose 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.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. 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 recourent 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. Conjoncture

IV. Méthodes d'approximation en physique

IV.1. Processus d'analyse

De façon générale, les différentes étapes d'analyse d'un problème physique s'organisent suivant le processus schématisé par la figure V.1. Nous partons d'un problème physique. Le cadre précis de l'étude est défini par les hypothèses simplificatrices qui permettent de déterminer le modèle mathématique approprié. La difficulté pour l'ingénieur est de savoir choisir parmi les lois de la physique, celles dont les équations traduiront avec la précision voulue la réalité du problème physique. Un bon choix doit donner une réponse acceptable pour des efforts de mise en œuvre non prohibitifs.

En résumé, les questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par un modèle numérique dans de bonnes conditions, sont les suivantes :

- Quel modèle mathématique utiliser.
- Quel modèle numérique faut-il lui associer.
- Quelle est l'erreur d'approximation commise.
- Quelle est l'erreur numérique commise.

- peut-on améliorer le modèle numérique.
- faut-il changer le modèle mathématique etc.

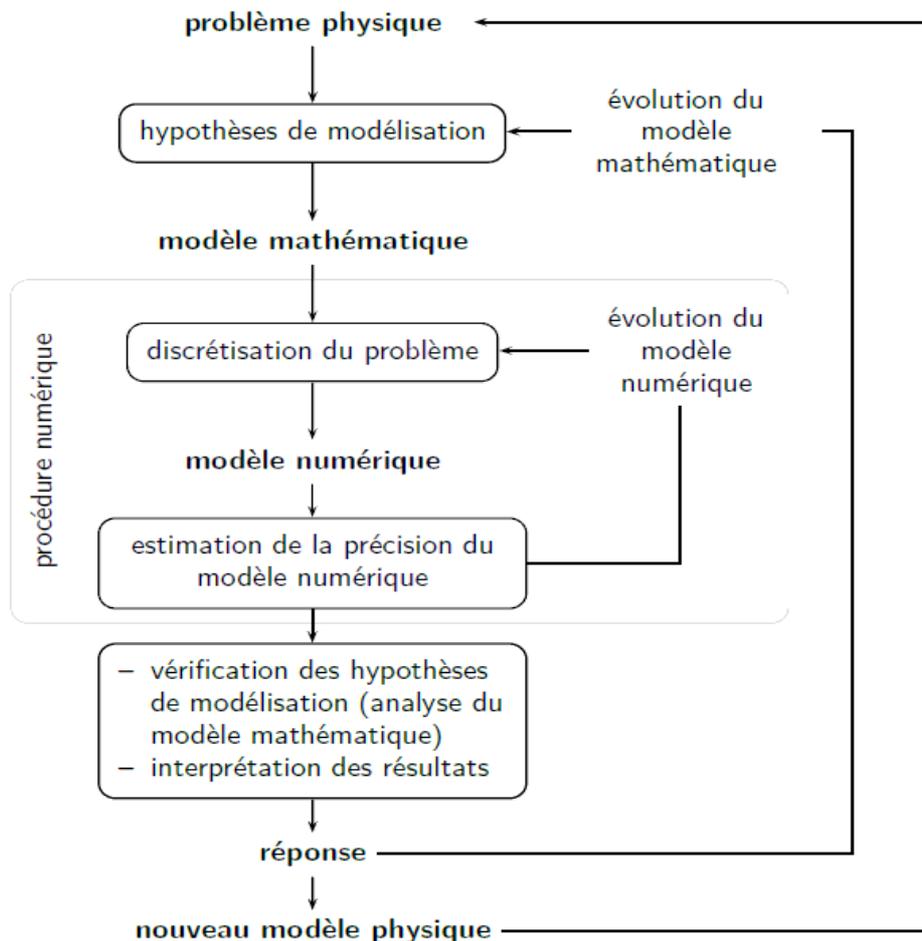


Figure V .1- Processus d'analyse utilisant un modèle numérique

IV .2 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

IV.2.1 . Formulation du problème physique à étudier

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

$$D = \sum_{e=1}^{n_e} D_e \quad \text{tel que} \quad \lim_{e \rightarrow 0} \left(\bigcup_e D_e \right) = D \quad (2.1)$$

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 V.2. Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution.

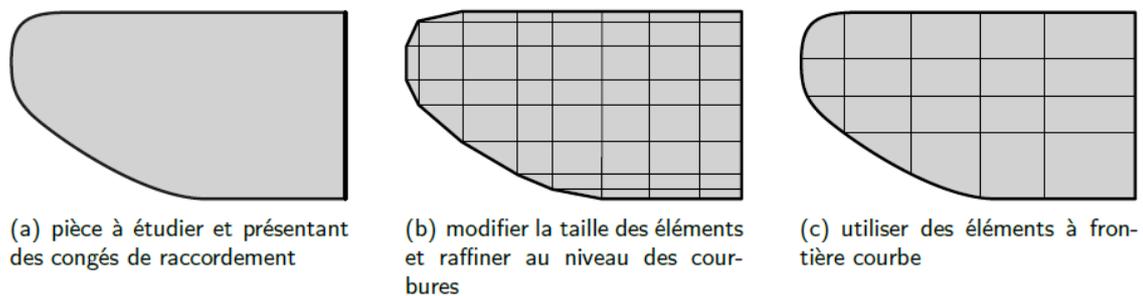


Figure V.2 : Erreur de discrétisation géométrique

IV .2.2. 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 D_e :

$$\forall M \in D_e, u^*(M) = \mathbf{N}(M)\mathbf{u}_n \quad (2.2)$$

Où $u^*(M)$ représente la valeur de la fonction approchée en tout point M de l'élément et \mathbf{N} , la matrice ligne des fonctions d'interpolation de l'élément \mathbf{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 $u^*(M) = \mathbf{N}(M)\mathbf{u}_n$. 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 :

$$\forall M_i, u^*(M_i) = u_i \quad (2.3)$$

Soit pour l'approximation nodale :

$$\forall M_i, N_j(M_i) = \delta_{ij} \quad (2.4)$$

Construction d'une approximation nodale linéaire

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

$$\forall M, u^*(M) = \Phi(M)\mathbf{a} \quad (2.5)$$

Φ est une base de fonctions connues indépendantes, en général une base polynomiale et \mathbf{a} , 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 variationnelles et la généralisation à des problèmes de physique est donc simple.

IV.2.3-Construction des matrices élémentaires

Matrices masse et raideur

Soit la forme intégrale du PTV :

$$\forall \delta \vec{u}, \int_D \rho \ddot{\vec{u}} \cdot \delta \vec{u} dV = - \int_D \bar{\bar{\sigma}} : \bar{\bar{\epsilon}} dV + \int_D \vec{f} \cdot \delta \vec{u} dV + \int_{\partial D} \vec{T} \cdot \delta \vec{u} dS \quad (2.6)$$

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 :

$$\ddot{\vec{u}}(M) \cdot \delta \vec{u}(M) = \delta \mathbf{u}_n^T \mathbf{N}(M)^T \mathbf{N}(M) \ddot{\mathbf{u}}_n \quad (2.7)$$

D'où le premier terme :

$$\int_{D_e} \rho \ddot{\vec{u}} \cdot \delta \vec{u} dV = \delta \mathbf{u}_n^T \mathbf{M}_e \ddot{\mathbf{u}}_n \quad (2.8)$$

Avec $\mathbf{M}_e = \int_{D_e} \mathbf{N}(M)^T \rho \mathbf{N}(M) dV$, 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 :

$$\begin{aligned} \bar{\bar{\epsilon}} &\rightarrow \boldsymbol{\epsilon} = \left[\epsilon_{xx} \quad \epsilon_{yy} \quad \epsilon_{zz} \quad 2\epsilon_{xy} \quad 2\epsilon_{xz} \quad 2\epsilon_{yz} \right]^T \\ \bar{\bar{\sigma}} &\rightarrow \boldsymbol{\sigma} = \left[\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \sigma_{xy} \quad \sigma_{xz} \quad \sigma_{yz} \right]^T \end{aligned} \quad (2.9)$$

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 :

$$\boldsymbol{\epsilon}(M) = \mathbf{L} \mathbf{N}(M) \mathbf{u}_n = \mathbf{B}(M) \mathbf{u}_n \quad (2.10)$$

Où \mathbf{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 :

$$\boldsymbol{\sigma}(M) = \mathbf{D}(M)\boldsymbol{\varepsilon}(M) = \mathbf{D}(M)\mathbf{B}(M)\mathbf{u}_n \quad (2.11)$$

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

$$\int_{D_e} \bar{\boldsymbol{\sigma}} : \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} \, dV = \delta \mathbf{u}_n^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}_n \quad (2.12)$$

Avec $\mathbf{K}_e = \int_{D_e} \mathbf{B}(M)^T \mathbf{D}(M) \mathbf{B}(M) \, dV$ 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.

IV .2.4 Assemblage

Les règles d'assemblage sont définies par la relation :

$$\mathbf{D} \simeq \sum_{e=1}^{n_e} \mathbf{D}_e \quad (2.12)$$

Matrices

L'assemblage des matrices élémentaires masse \mathbf{M}_e et raideur \mathbf{K}_e s'effectue selon les mêmes règles. Ces règles sont définies par sommation des termes correspondant au travail virtuel calculé pour chaque élément :

$$\sum_{e=1}^{n_e} \delta \mathbf{u}_n^T \mathbf{M}_e \ddot{\mathbf{u}}_n = \delta \mathbf{U}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{U}} \quad \text{et} \quad \sum_{e=1}^{n_e} \delta \mathbf{u}_n^T \mathbf{K}_e \mathbf{u}_n = \delta \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \quad (2.13)$$

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 \mathbf{U} .

IV.2.5 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.

IV.2.6 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.

IV.2.7. 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 :

IV.2.8. 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.

IV.2.9. 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.

IV.2.10. 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.

IV.2.11. 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.

IV.2.12. 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.

IV.2.13. 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 appelée-processueur.

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.

IV.2.14. Exécution 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.

IV.2.15. 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) retenu(s).

VI. 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.

Deuxième partie

**Techniques
expérimentales**

Introduction

Dans ce chapitre, nous exposerons la technique expérimentale et de caractérisation utilisées dans ce travail. Nous aborderons le principe de fonctionnement et le mode opératoire de chaque appareillage ainsi que les paramètres d'expérience.

II.1. Matériau et techniques de simulation

II.1.1. Le matériau utilisé

Le matériau, utilisé dans cette étude, est l'acier austénitique **AISI 304 (DIN 1.4301 - X 5 CrNi 18 10)**. Il a été fourni par la société **ORFEE (ex BCR)** de **BORDJ MENAIEL**, sous forme de deux différentes tôles avec son certificat d'analyse qui comporte les différentes informations sur l'acier en question.

Tableau II.1 : la composition chimique de l'acier 304

Composition chimique (% massique)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N
0,043	1,420	0,410	0,028	0,001	18,030	8,040	0,055

Tableau II.2 : les propriétés mécaniques de l'acier 304

Propriétés mécaniques				
$R_{p0,2\%}$ (N/mm ²)	$R_{p1\%}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A (%)	HRB
206,0	325,0	638,0	57	85
260,0				
292,0				

Pour la limite d'élasticité nous avons choisie trois limites d'élasticités.

II.2. Essais de fatigue en traction uniaxial et simulation

L'essai de fatigue est un essai normalisé qui consiste à appliquer à une éprouvette de forme plane un nombre de cycles identiques de charge ou déformation imposées. Dans ce chapitre, le but est de trouver, pour un déplacement imposé, le nombre de cycles à rupture de l'éprouvette testée.

Techniques de simulation

Dans l'étude de fatigue on a choisi une éprouvette de l'acier ASIA 304 avec et on a utilisé logiciel SolidWorks pour faire la simulation.

II.3. Simulation sous SolidWorks

Toutes les structures présentent des variations plus ou moins brutales de géométrie qui génèrent des concentrations de contraintes. Le champ des contraintes/déformations au voisinage de ces discontinuités conditionne la durée de vie en fatigue de toute la structure.

Ce travail a pour objectifs d'améliorer la compréhension des mécanismes qui régissent le phénomène de fatigue dans les structures d'éprouvette, et de développer une simulation de prévision par SolidWorks.

II.4 but de la simulation

L'objectif de cette expérience est de simuler le chargement en fatigue en flexion plane sur des éprouvettes en acier ASIA 304 sont entaillées et avec des limites d'élasticités d'épaisseur différente dans le but d'étudier leur effet sur la durée de vie en fatigue.

II.5 Présentation de SolidWorks simulation

SolidWorks Simulation est un logiciel de calcul par éléments finis intégré à SolidWorks. Il utilise les fichiers pièces et assemblages auxquels il intègre des études dans chacune desquelles sont définis les matériaux, les chargements, les conditions aux limites ainsi que les paramètres de maillage et d'analyse.

La mise en œuvre d'un problème d'analyse par la méthode des éléments finis sous

SolidWorks simulation nécessite la réalisation des tâches suivantes :

- Modélisation géométrique de la pièce,
- Définition des propriétés mécaniques et physiques du matériau,
- Mise en place des conditions frontière,
- Application du chargement,
- Création d'un maillage,
- Exécution de la solution,
- Analyse des résultats.

Cependant pour simuler un essai de fatigue, il faut procéder à deux types d'analyse l'une statique et l'autre de fatigue pour chaque valeur de chargement et pour chaque type d'éprouvettes.

I.5.1 Dimensionnement de l'éprouvette

Nous avons fait les calculs sur des éprouvettes plane ont été dessinées à l'aide de logiciel SolidWorks de (75 * 10 mm²) et d'épaisseur (2,4 et 6 mm) comme indique dans la figure suivant :

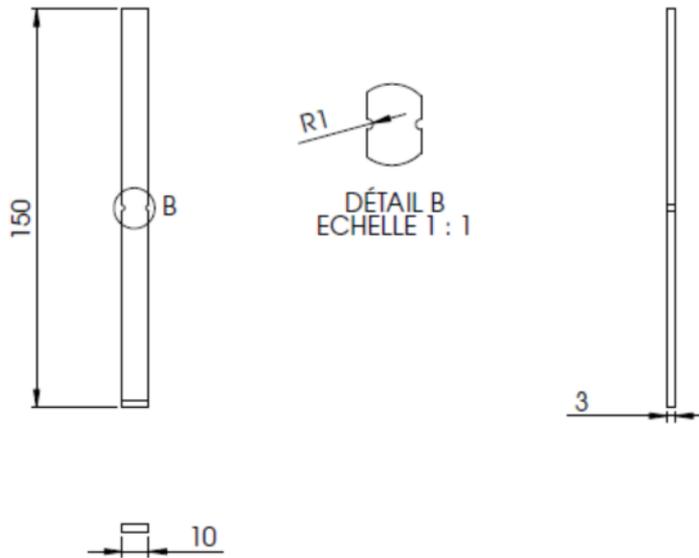


Figure II.1 : géométrie de l'éprouvette

II.5.2 Analyse statique

L'étude statique est faite en travaillant sur une éprouvette de même caractéristique soumise à une charge au centre de l'éprouvette.

II.5.3 Condition aux limites

Définition des conditions à la limite

- **Déplacement :**

L'éprouvette est fixé comme illustré la figure suivant :

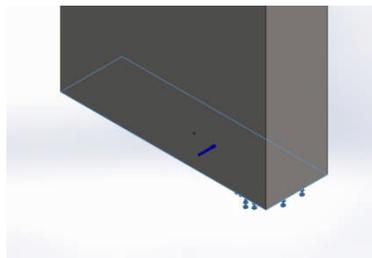


Figure II.3 : déplacement

Techniques de simulation

- Chargement

Pour modéliser le chargement, on a considéré la surface sur laquelle la force est active et on a appliqué une pression équivalente, nous avons utilisée des déférent prissions pour chaque éprouvette ((150 ,160,170,190,200,220,240,260,280,300) MPa).

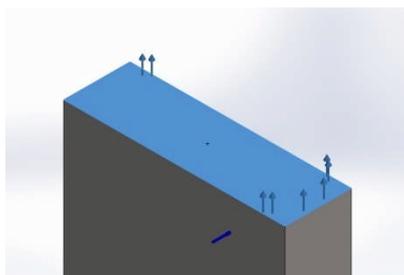


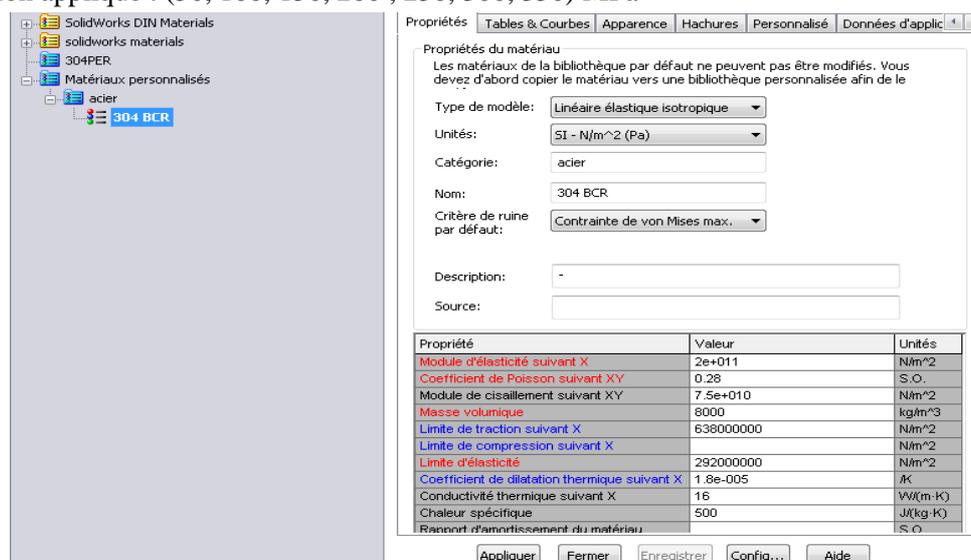
Figure II.4 : Configuration de chargement

II.5.4 Données du matériau

Identification du matériau la limite d'élasticité, Coefficient de Poisson, Module de cisaillement Coefficient de dilatation thermique, Conductivité thermique, Chaleur spécifique

- Module d'élasticité : 206 N/mm².

- la pression applique : (50, 100, 150, 200 , 250, 300, 350) MPa



Propriétés : Tables & Courbes | Apparence | Hachures | Personnalisé | Données d'applic

Propriétés du matériau
Les matériaux de la bibliothèque par défaut ne peuvent pas être modifiés. Vous devez d'abord copier le matériau vers une bibliothèque personnalisée afin de le

Type de modèle: Linéaire élastique isotropique
Unités: SI - N/m² (Pa)
Catégorie: acier
Nom: 304 BCR
Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max.
Description: -
Source:

Propriété	Valeur	Unités
Module d'élasticité suivant X	2e+011	N/m ²
Coefficient de Poisson suivant XY	0.28	S.O.
Module de cisaillement suivant XY	7.5e+010	N/m ²
Masse volumique	8000	kg/m ³
Limite de traction suivant X	638000000	N/m ²
Limite de compression suivant X		N/m ²
Limite d'élasticité	292000000	N/m ²
Coefficient de dilatation thermique suivant X	1.8e-005	K
Conductivité thermique suivant X	16	W/(m.K)
Chaleur spécifique	500	J/(kg.K)
Rapport d'amortissement du matériau		S.O.

Appliquer Fermer Enregistrer Config... Aide

Figure II.5 : configuration de matériau

II.5.6 Simulation

Après avoir activé le complément SolidWorks simulation, à une analyse statique. Pour cela on définit, les conditions frontières (déplacements imposés, le chargement imposé et le maillage). La figure suivante illustre la configuration choisie.

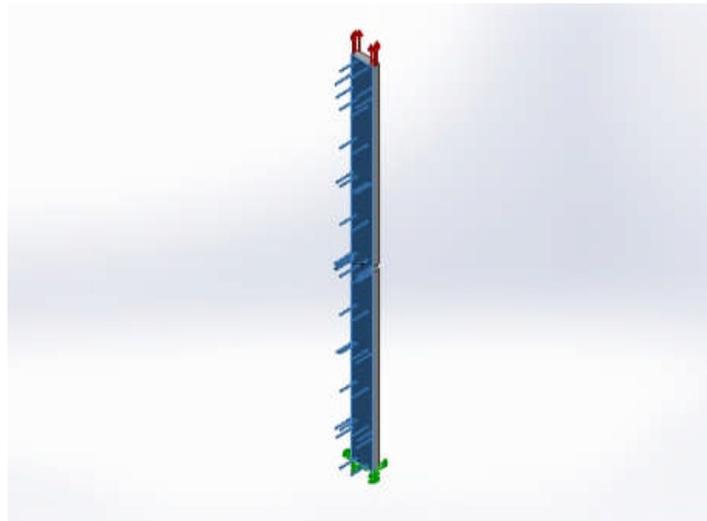


Figure II.6 : Configuration de l'éprouvette

Techniques de simulation

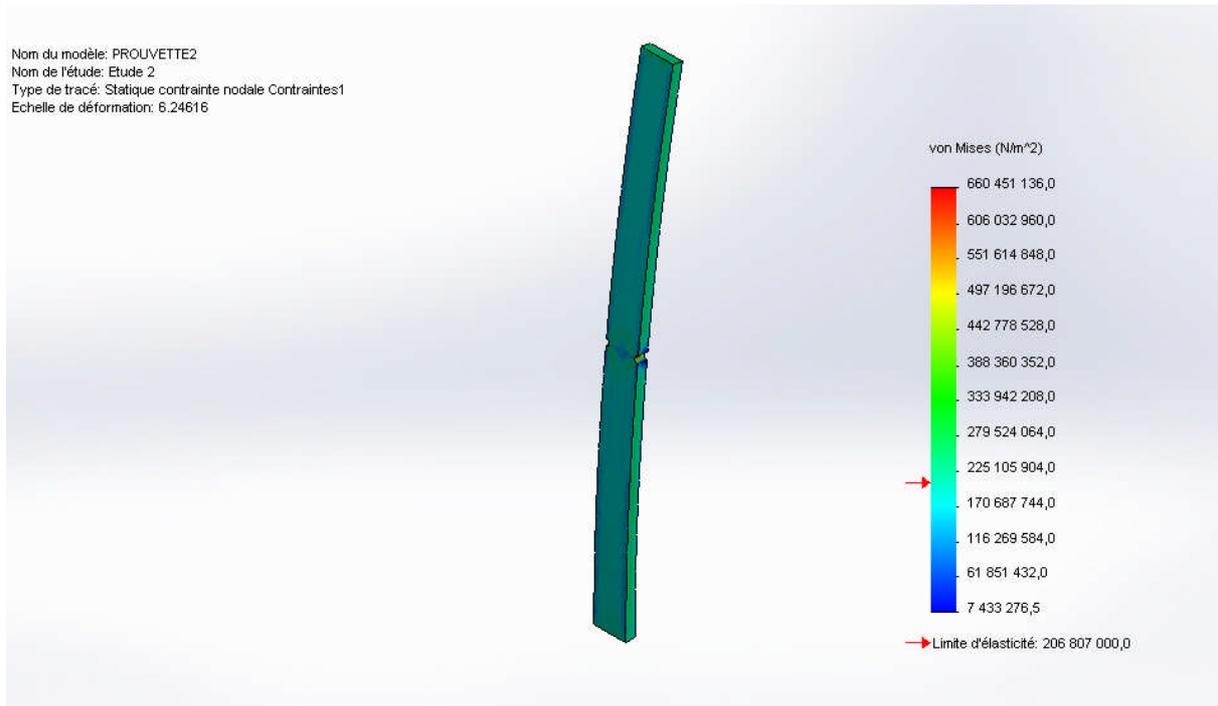


Figure II.7 : analyse statistique

II.5.7 Analyse de fatigue :

Pour faire une analyse en fatigue, il faut :

- Créer une étude de fatigue et définir ses conditions.
- Définir le type d'événements.
- Définir le chargement.
- Afficher les résultats.
- Exécuter l'étude de fatigue.

A partir de l'analyse statique, nous avons défini l'analyse de fatigue en précisant le type de chargement tel que $R = -1$. Notons qu'on procédera de la même manière pour chaque éprouvette.

III.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**

III.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

III.3. Description de l'essai

III.3.1 L'éprouvette : Les éprouvettes de traction sont normalisées ($b \leq 4\text{mm}$ ou $e \leq 3\text{mm}$)

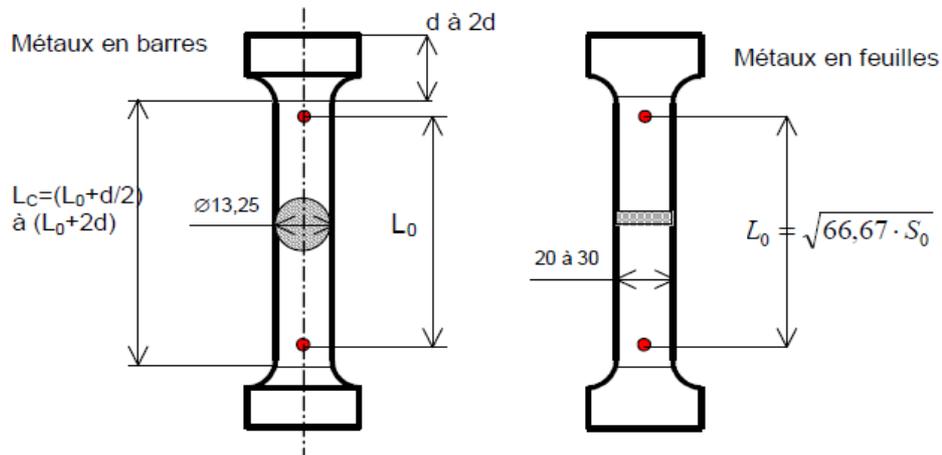


Figure III.1 : éprouvette de traction normalisée

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

$\acute{e}p < 03 \text{ mm}$: largeur 20 mm et longueur 80 mm

$\acute{e}p > 03 \text{ mm}$: 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 contrainte est grande.

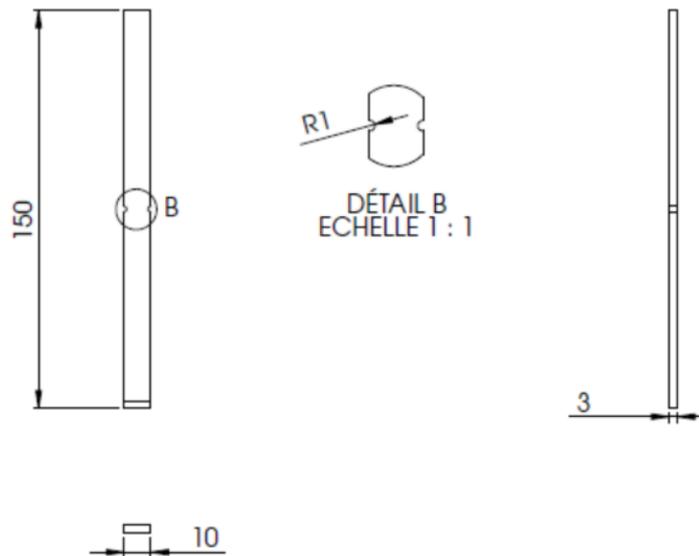


Figure III.2 Eprouvette avec entaille

III.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).

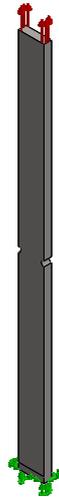
Cette étude statique va nous servir de référence afin de passer à l'étude dynamique

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.



Nom du modèle: PROUVETTE2
Configuration actuelle: Défaut

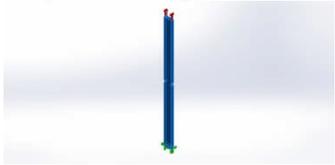
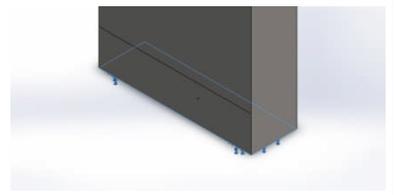
Corps volumiques			
Nom du document et référence	Traité comme	Propriétés volumétriques	Chemin/Date de modification du document
Ligne de séparation2 	Corps volumique	Masse:0.0359246 kg Volume:4.49058e-006 m ³ Masse volumique:8000 kg/m ³ Poids:0.352061 N	D:\PFE CMFM\PROUVETT E2.SLDPRT Oct 29 15:51:12 2016

Tableau III. 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 résultantes		

Nom du déplacement imposé	Image du déplacement imposé			Détails du déplacement imposé
Composants	X	Y	Z	Résultante
Force de réaction(N)	- 0.18337 8	- 10500. 2	- 0.27513 5	10500.2
Moment de réaction(N.m)	0	0	0	0

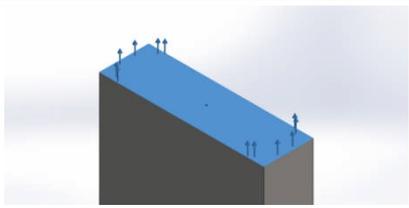
Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Pression-1		Entités: 1 face(s) Type: Normal à la face sélectionnée Valeur: -350 Unités: N/mm² (MPa) Angle de phase: 0 Unités: deg

Tableau III. 2 Actions extérieures

Etape 04 :

On applique une contrainte mécanique (MPa) sur la face droite ainsi qu'une source de chaleur sur les surfaces de l'éprouvette à l'exception des deux bases.

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 basé sur la courbure avec un raffinement de maillage dans les deux entailles.



Nom du contrôle de maillage	Image du contrôle de maillage	Détails du contrôle de maillage
-----------------------------	-------------------------------	---------------------------------

Figure III.3 Informations sur le maillage

Tableau III.3 Informations sur le maillage

Nombre total de noeuds	28326
Nombre total d'éléments	17336
Aspect ratio maximum	5.7068
% d'éléments ayant un aspect ratio < 3	98.8
% d'éléments ayant un aspect ratio > 10	0
% d'éléments distordus (Jacobien)	0
Durée de création du maillage (hh:mm:ss):	00:00:03

<p>Contrôle-1</p>		<p>Entités: 2 face(s) Unités: mm Taille: 0.412622 Ratio: 1.5</p>
-------------------	--	---

Raffinement du maillage :

Afin de contrôler mieux la zone de concentration de contraintes, on effectue un raffinement de maillage par diminution de la taille de maille dans les deux entailles

- **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 a 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).

III.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.

Pression	50	100	150	200	250	300	350
Contrainte	147,16	294,31	441,47	588,63	735,79	882,94	1030,1
déplacement	0,03969	0,07937	0,11906	0,15875	0,19843	0,23812	0,27781
déformation	0,000588	0,001175	0,001763	0,00235	0,002938	0,003525	0,004113

Tableau III.4 Contraintes réponses en fonction des contraintes appliquées

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

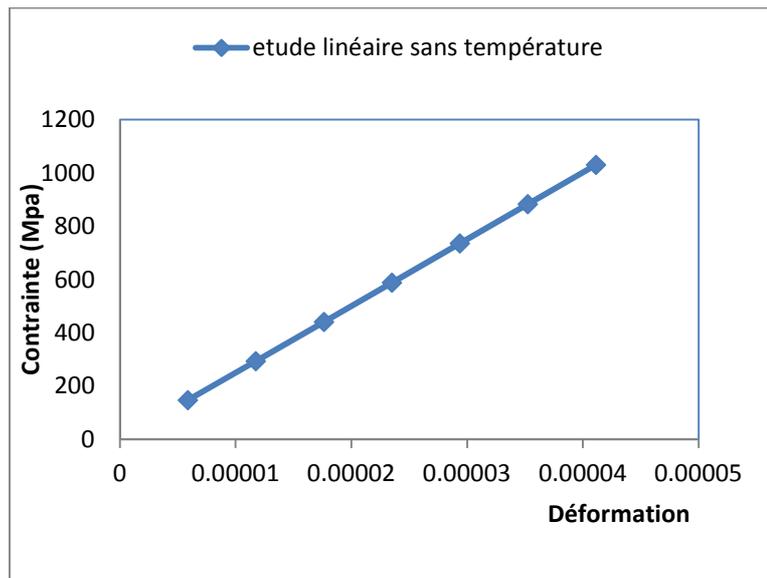


Figure III.4 courbe de la contrainte rép en fonction déformation sans effet de température

Nom	Type	Min	Max
Contraintes1	VON: contrainte de von Mises	4.84639 N/mm ² (MPa) Noeud: 14945	1030 N/mm ² (MPa) Noeud: 8370

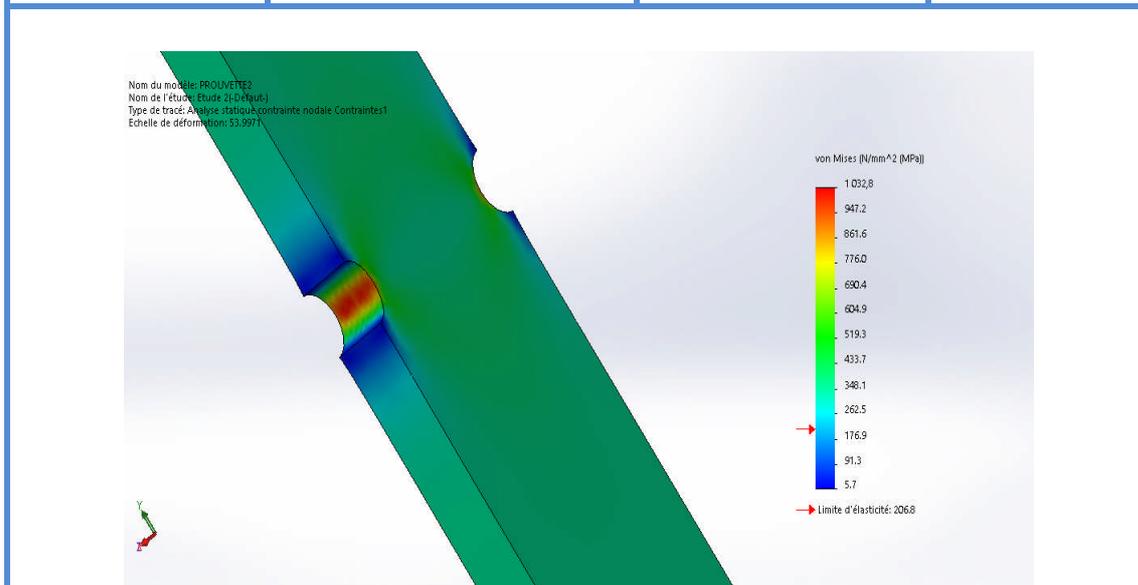


Figure III.5 distribution du champs de contrainte

Etude 02 :

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

Pression	50	100	150	200	250	300	350
Contrainte1	352.56	358.94	409.21	535.26	666.92	801.42	937.54
Déplacement1	0.09501	0.12782	0.1637	0.20101	0.23909	0.27762	0.31644
Déformation1	0.001182	0.001214	0.001618	0.002151	0.002708	0.003276	0.003849

Tableau III.5 Contraintes rép en fonction des contraintes app à $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

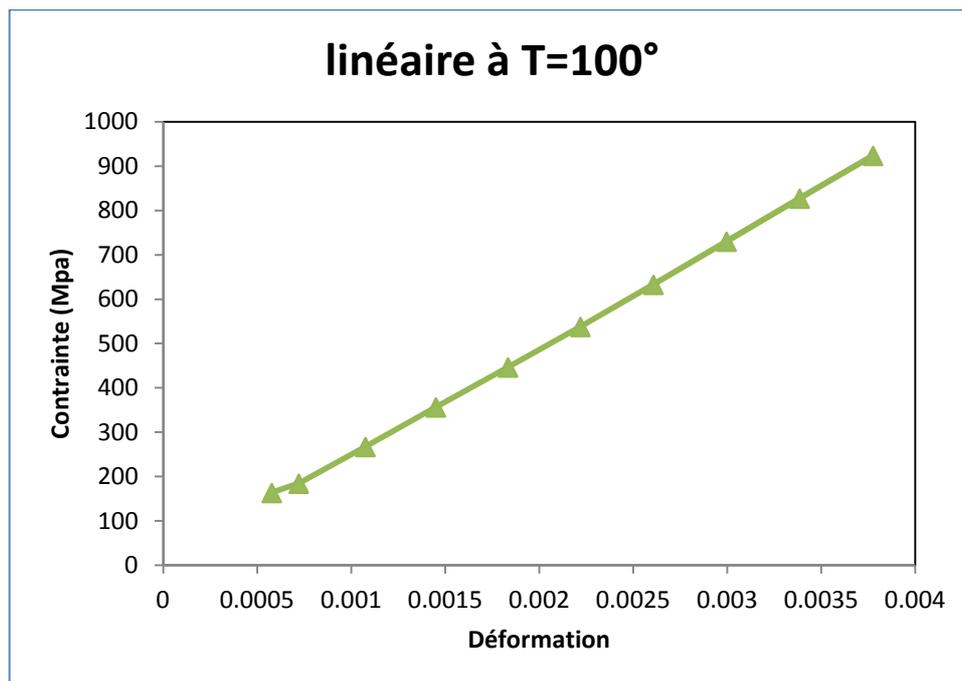


Figure III.6 éprouvette-Etude 1-Contraintes-Déformation

Etude 03

Effet de la température sur la contrainte de Von Mises pour une pression appliquée égale à 350MPa

Tableau III.6 Contraintes moyenne en fonction de la température

T(C°)	20	100	200	300	400	500
contrainte (Mpa)	1032	937	954	1312	1770	2333

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

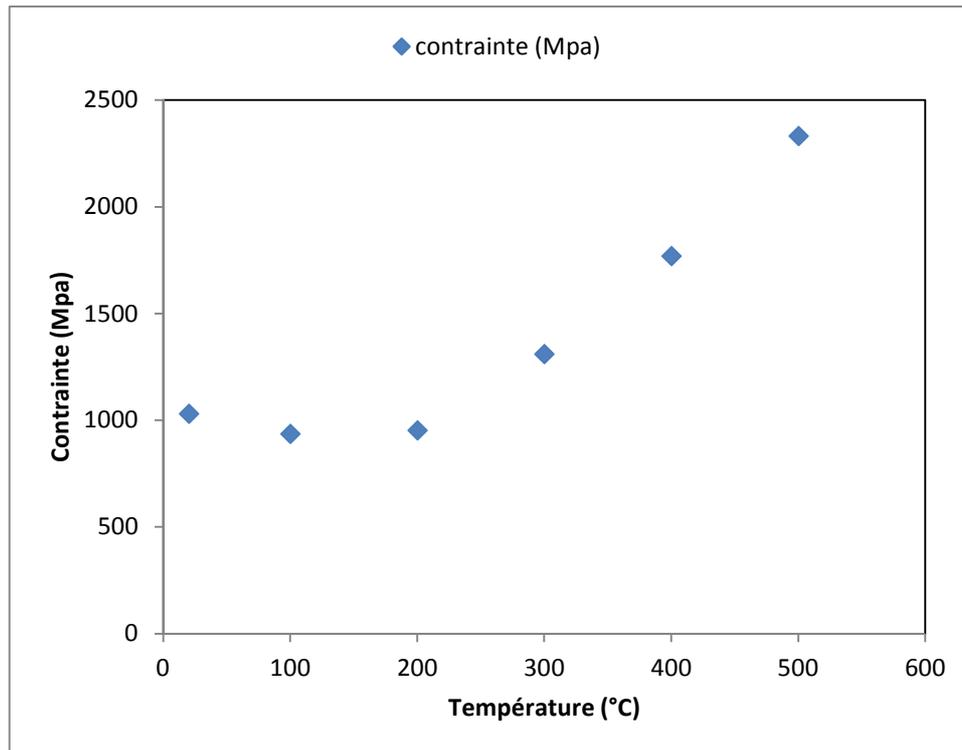
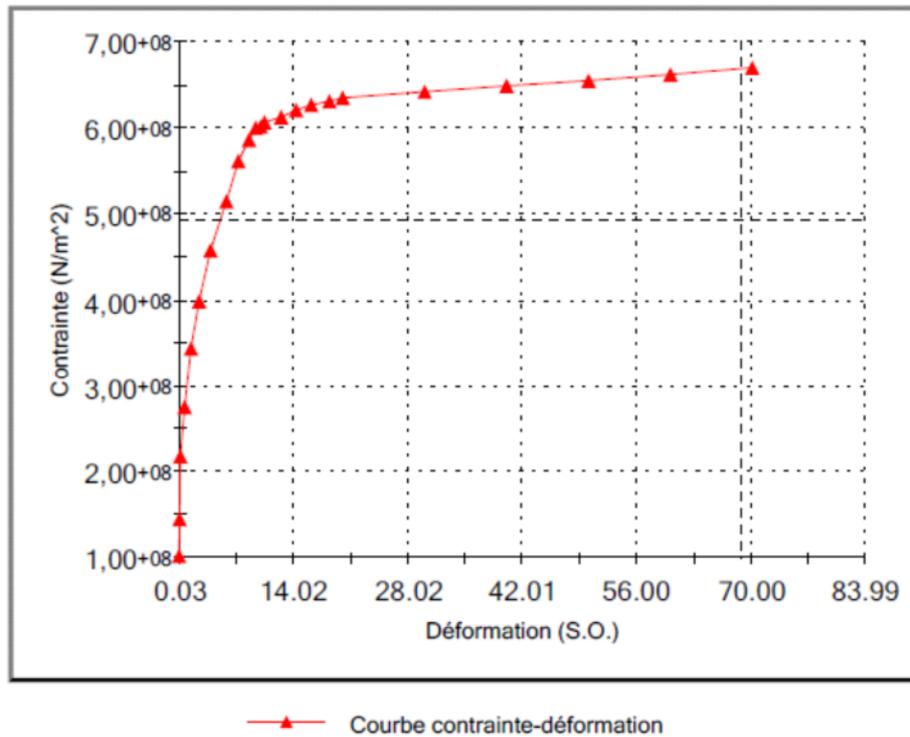


Figure III.7 courbe de la contrainte de VonMises en fonction de T pour une pression de 350MPa

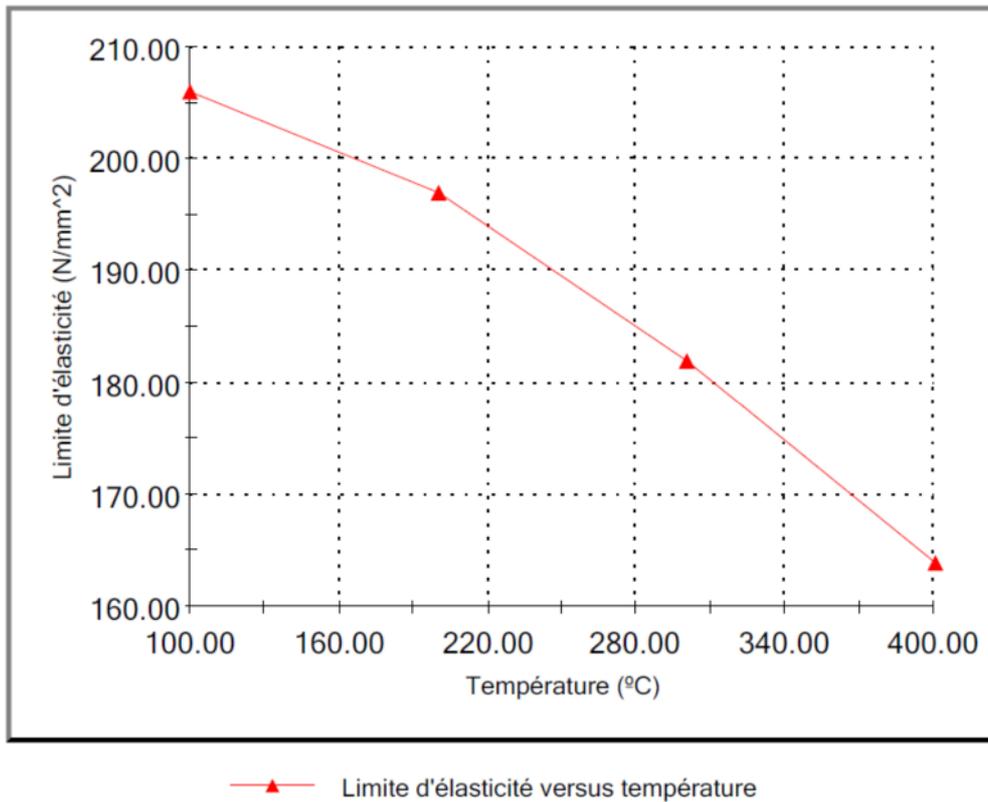
On remarque une certaine diminution de la réponse du matériau lorsqu'on augmente la température. Mais après une Température de 200°C, on remarque un durcissement du matériau. La contrainte continue à augmenter en fonction de la température. Il est à noter que dans le modèle linéaire, l'augmentation de la réponse du matériau est proportionnelle à la charge appliquée. or que dans la réalité, il faut passer au mode non linéaire pour traiter un cas plastique.

Etude 04 : étude non linéaire :

Dans cette étude, le comportement plastique du matériau est pris en considération, nous utilisons le modèle de Newton Raphson pour la convergence de résultats. Il faut aussi introduire une courbe théorique de traction dans le logiciel afin de l'utiliser comme référence.



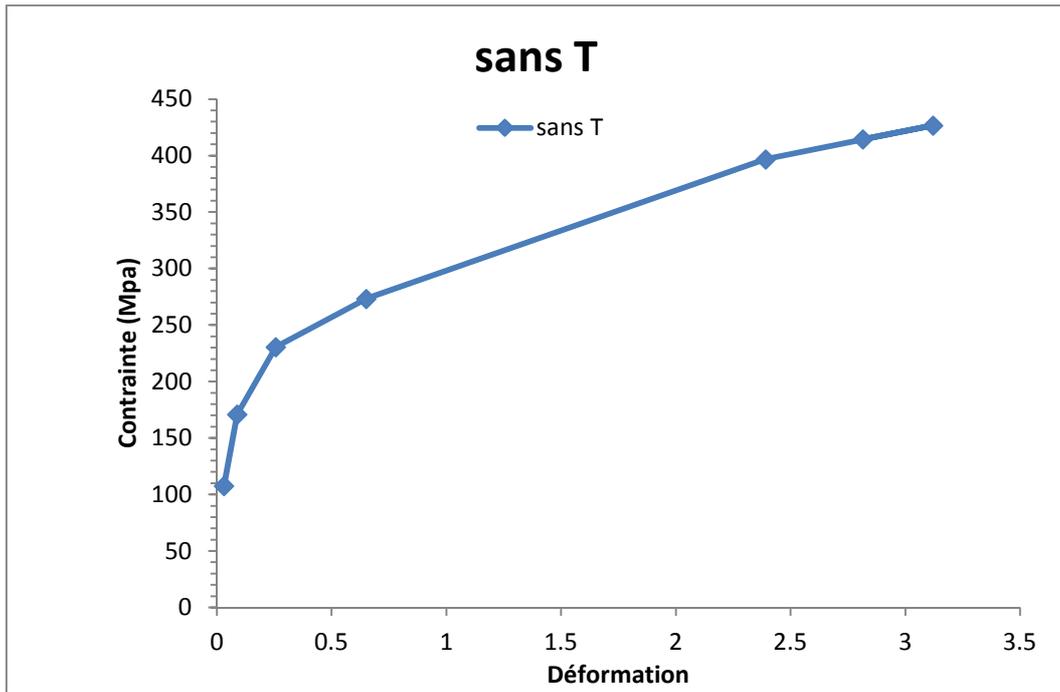
Il est à noter aussi que la limite élastique change en fonction de la température avec un pourcentage défini pour les inox



En variant la pression appliquée de 50 à 350MPa, on obtient la contrainte moyenne ainsi que les déplacements et déformations sans effet de température

contrainte	50	100	150	200	250	300	350
Contrainte1	107,8	170,87	230,6	273,26	396,78	426,82	414,68
Déformation1	0,031635	0,089419	0,256855	0,651736	2,391941	3,120546	2,815886

Tableau III.8 Contraintes de Von Mises en fonction de la pression appliquée sans T



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

contrainte	50	100	150	200	250	300	350
Contrainte1	107,73	170,68	230,32	272,81	396,23	370	340,25
Déformation1	0,031533	0,089273	0,256904	0,654374	2,402891	2,902305	3,908861
Déplacement1	2,4583	4,94763	10,96161	21,62772	68,62011	24,10682	24,14389

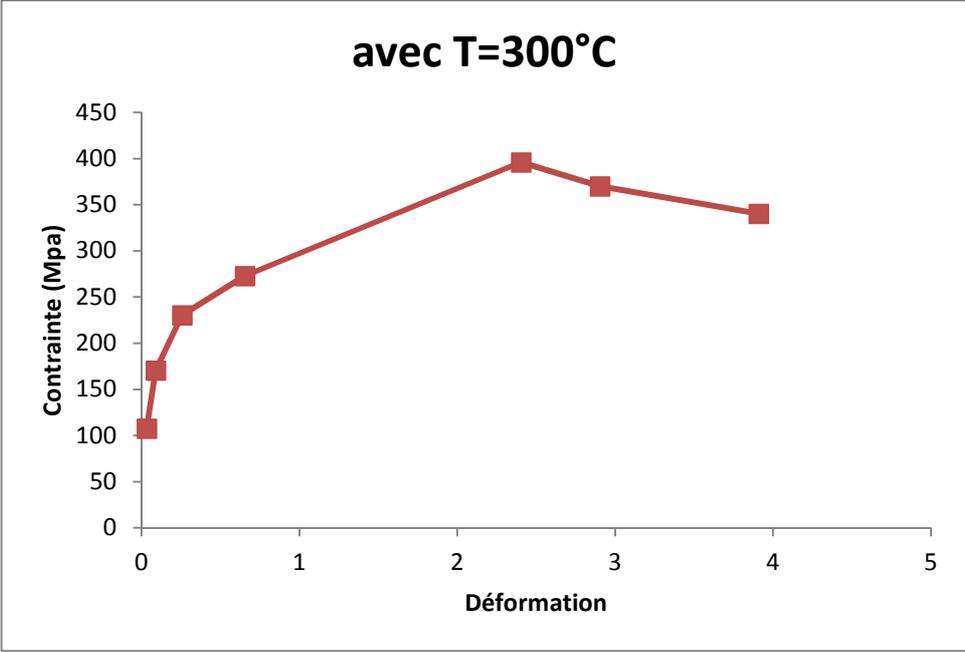


Figure III.8 Contraintes de Von Mises en fonction de la pression appliquée avec $T= 300^{\circ}\text{C}$

Nom	Type	Min	Max
Contraintes1	VON: contrainte de von Mises	14.6826 N/mm ² (MPa) Noeud: 11160	1028.97 N/mm ² (MPa) Noeud: 3800
eprouvette-Etude 1-Contraintes-Contraintes1			

Figure III.9 changement de contrainte de Von Mises en fonction de la température pour une pression de 350 MPa

Courbes superposées : Composé de toutes les courbes déjà étudié

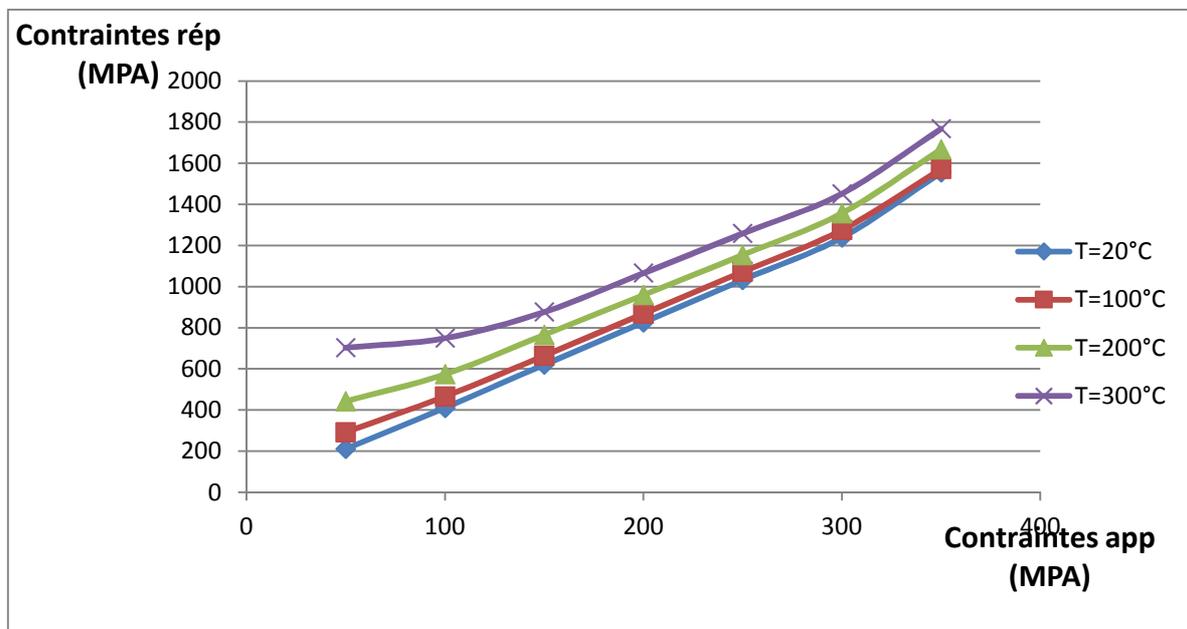


Figure III.9 Courbes superposées Contraintes rép en fonction des contraintes app

III.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.

III.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 à notre acier austinitique

Etape 04

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

III.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	6,94E+04	16089	3264	1069,1	520,53	340,73	192,56

cycles							
--------	--	--	--	--	--	--	--

Tableau III.9 : contraintes appliquées-nombres de cycles

Remarque :

Pour des raisons d’interpolations, on enlève la valeur « 50 MPA » a (T=20°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 (III.9) sont interprétés dans la figure suivante :

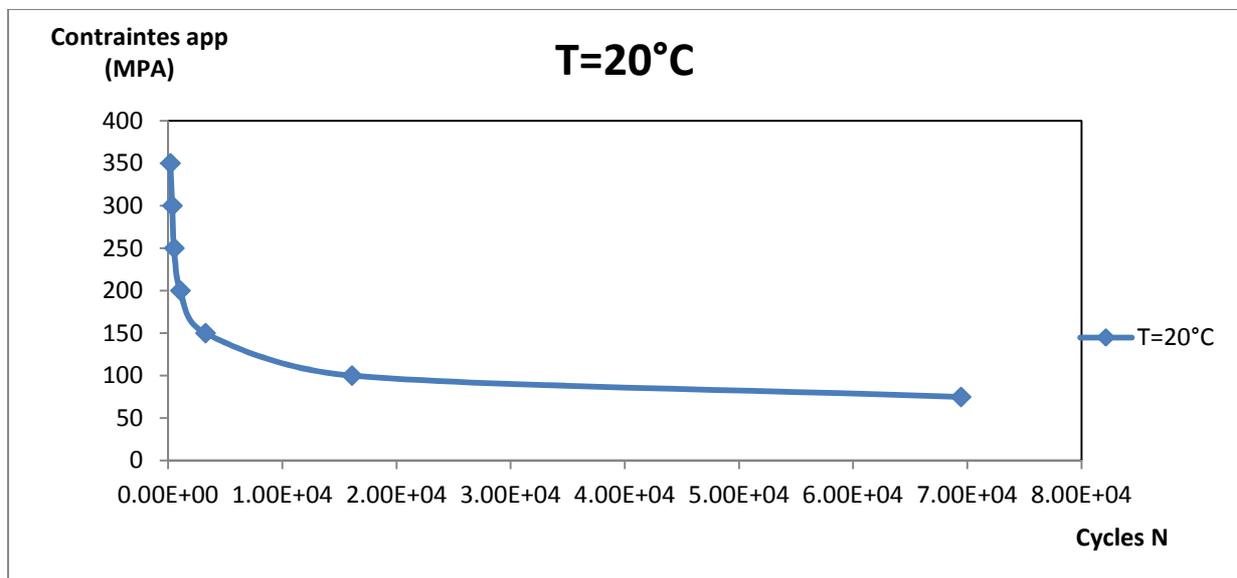


Figure III.10 courbe de wolher a a (T=20°C).

Etude 02

Les valeurs des contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle pour une température T=100°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 III.10 contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

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

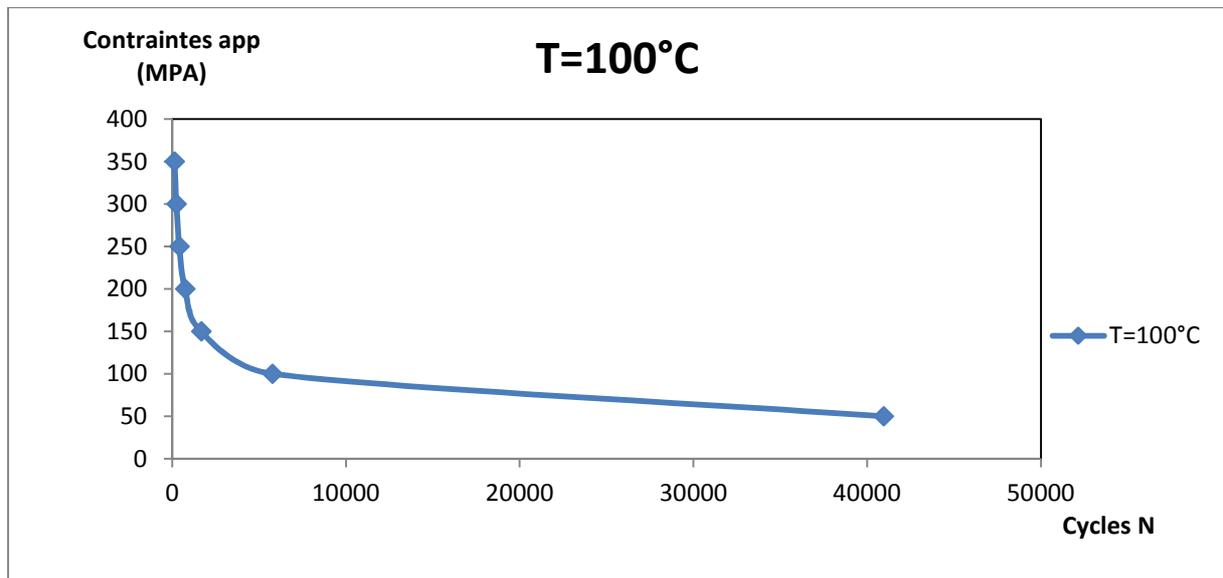


Figure III-11 courbe de wolher a a (T=100°C).

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 III.11 contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

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

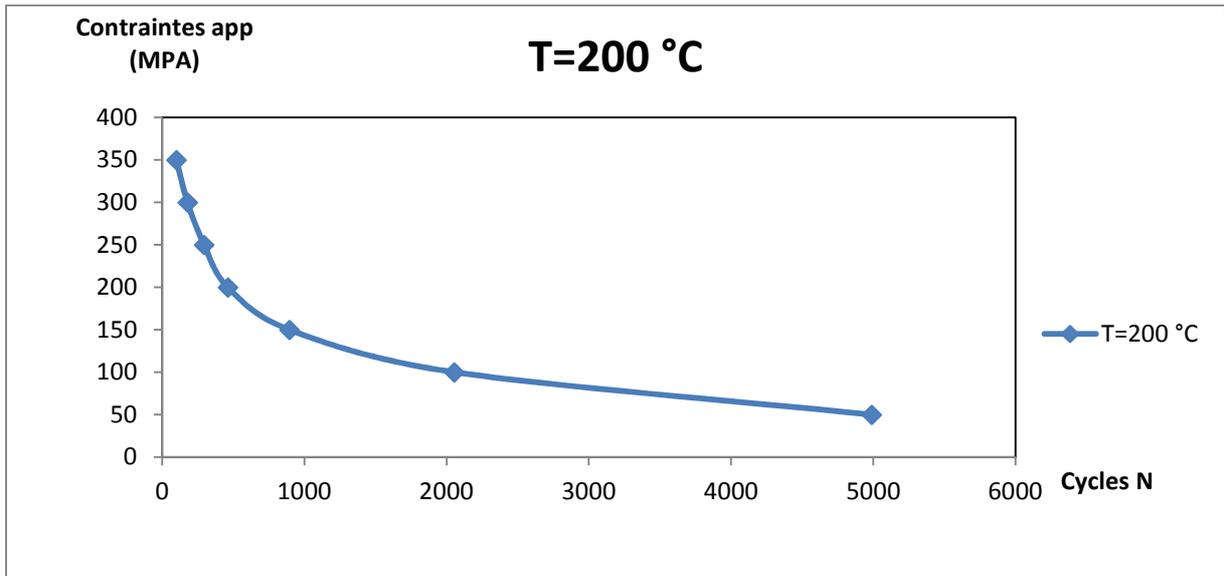


Figure III-12 courbe de wolher a a (T=200°C).

Courbes superposes

Composé de toutes les courbes de Wolher déjà étudié

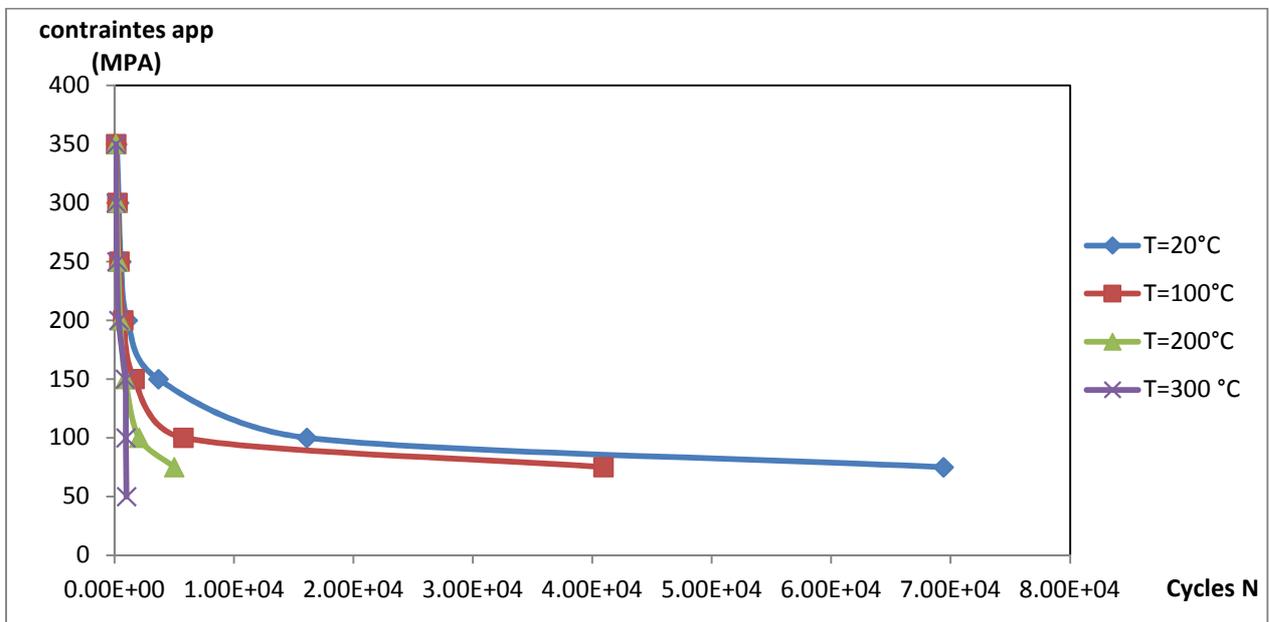


Figure III-13 Courbes superposes de wolher

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 III.13 Paramètres des courbes de Wolher

III.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 suivnt :

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 III.14 Contraintes appliquées en fonction de nombre de cycle

Les résultats du tableau (III.14) sont interprétés dans la figure suivante :

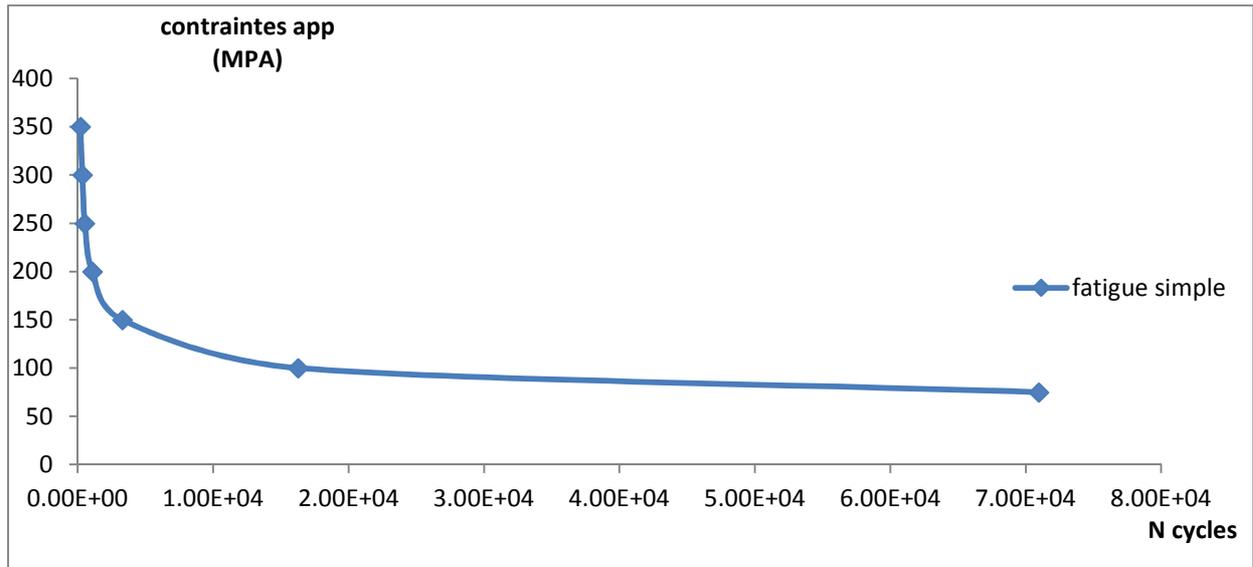


Figure III-14 Courbes de wolher pour fatigue simple

Courbe superposée

On superpose la courbe a T=100°C et la courbe de fatigue simple

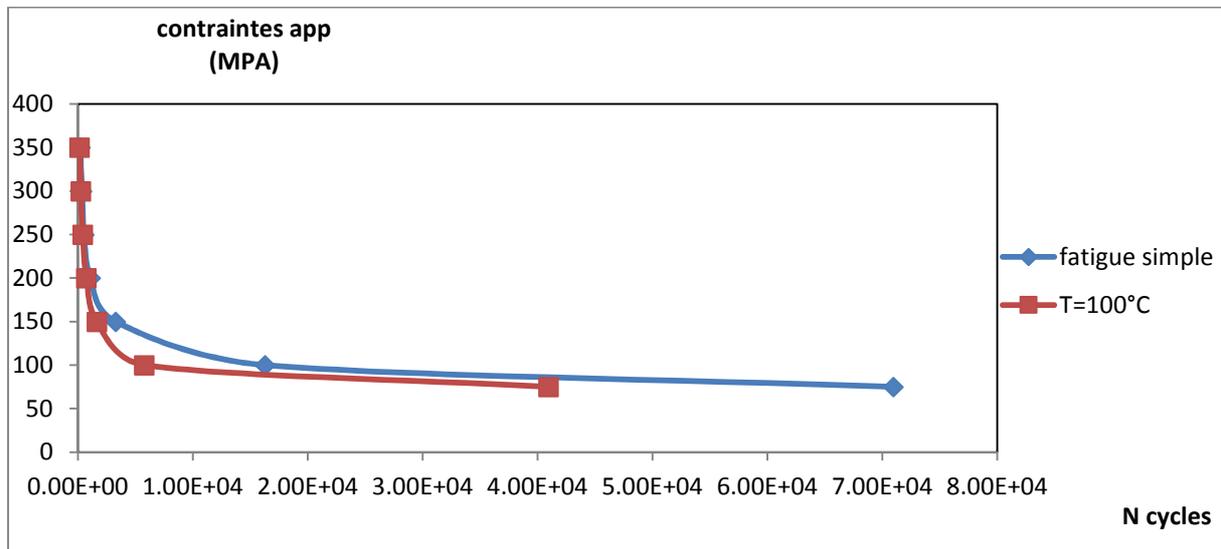


Figure III-15 Courbes superposes de wolher pour faigue simple et avec température

III.6. 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 $T^\circ = 300C^\circ$ 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 $T=20 C^\circ$ 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

Conclusion :

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 (géométrique , rhéologique...) afin d'optimiser le procède ,la simulation de la fatigue dans les procèdes 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 :

Vus 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.

Références bibliographique :

[1]: Q. AUZOUX«Fissuration en relaxation des aciers inoxydables austénitiques,influence de l'écrouissage sur l'endommagement intergranulaire». Thèse de Doctorat. L'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (2004).

[2]: O. MOHAMED « Effet du ph du milieu sur la corrosion de l'acier inoxydable 304 L». Mémoire de magistère. Université hadj Lakhdar BATNA (2013).

[3]: M. DUPEUX « Aide-mémoire science des matériaux ». (Pages 125-126). Dunod, Paris, (2004).

[4]:J. P. BAILON, J. M.DORLOT« Des matériaux» (pages 303). Presses internationales polytechnique. Montréal (2001).