

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

---

*PROJET DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT*



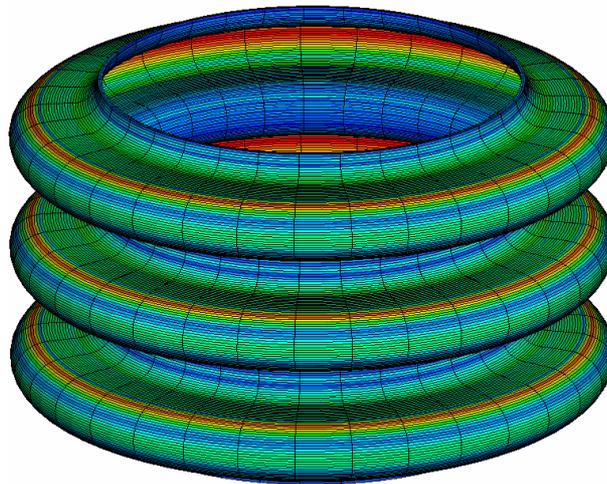
SPECIALITE : **Génie Mécanique**

Thème :

# *Etude de l'Influence des Paramètres de Formage sur le Comportement de l'Onduleux*

Réalisé par : *Hachemi Hakim*

Encadré par : *Mr.S.Rechak*  
*Mr.J.M.Roelandt*  
*Mr.H.Kebir*



---

Année universitaire : *2005 / 2006*



## ملخص:

العمل المقدم من خلال هذه المذكرة يتمثل في إيجاد, بالحساب, مدة حياة أنابيب مرنة موجية لمختلف قيم السعة, الأنابيب مصنوعة من طرف المصنع توباست باستعمال تكنولوجيا التصنيع بالمياه, قمنا أولا بتقديم المعارف الأساسية اللازمة لدراسة المشكل. قمنا أيضا بتقديم المثل اللازم للمقارنة, لحساب مدة حياة الأنابيب قمنا باستعمال قانون تعب شابوش. الحسابات قمنا بها باستعمال البرنامج أباكوس **كلمات مفتاحية:**

مدة حياة, منحنى بولير (منحنى N-S), اللانعواجات الباقية, تجارب التعب, العناصر المنتهية, التعب أليقوسيكليك, قانون التعب, أباكوس, اللانشقاق.

### **RESUME :**

Le travail présenté dans ce mémoire est une tentative de prédiction de la durée de vie des tubes flexibles onduleux pour différentes valeurs de déplacements, les tubes sont produit par l'entreprise TUBEST en utilisant la technologie de l'hydroformage, nous avons tout d'abord présenté les notions fondamentales nécessaires pour traiter le problème, nous avons défini le modèle de l'onduleux utilisé dans la simulation, pour le calcul de la durée de vie nous avons utilisé la loi d'endommagement de CHABOCHE. Les simulations ont été faites avec le logiciel éléments finis ABAQUS.

**Mots clés :** durée de vie, courbe de Wöhler (courbe S-N), déformations résiduelles, essais de fatigue, éléments finis, fatigue oligocyclique, ABAQUS, loi d'endommagement, fissures.

### **ABSTRACT :**

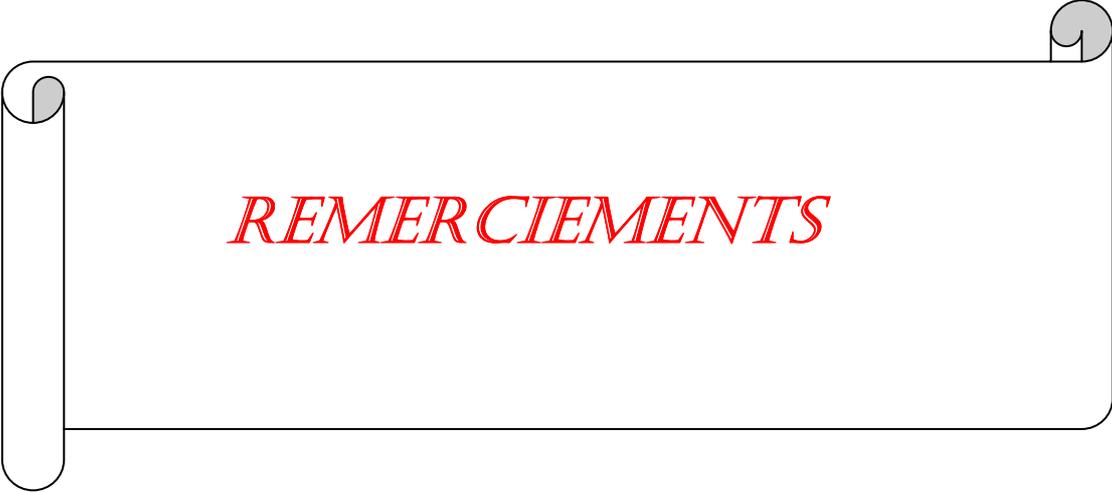
The work presented in this statement is an attempt to predict the safe life of flexible and wavy tubes for different values of displacements, the tubes are produced by the company TUBEST using hydroforming technology, first we have presented the basic notions required to handle the problem, we have defined the model used in the simulation, for the computation of the safe life we have used the CHABOCHE's law of damage. The simulations are made on with the finite element software ABAQUS.

**Key words:** safe life, Wöhler curve's (S-N curve), residuals strains, fatigue tests, finite element, oligocyclic fatigue, ABAQUS, damage law, cracks.

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à :*

- *Mes très chers parents en signe de reconnaissance pour leur soutien moral et matériel durant mes études*
- *Mes sœurs et frères*
- *La mémoire de mes grands-parents maternels et mon grand-père paternel*
- *Ma grand-mère taâlalouts*
- *Mes ami(e)s*



## *REMERCIEMENTS*

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire ROBERVAL du centre de recherche Royallieu de l'Université de Technologie de Compiègne.

J'exprime ma profonde gratitude aux messieurs **S.RECHAK** Professeur à l'ENP, **J-M ROELANDT** Professeur à l'UTC pour avoir assumé la lourde responsabilité de m'encadrer, m'orienter et me conseiller tout au long de la réalisation de ce travail ainsi que pour la confiance qu'ils m'ont accordée .

Je remercie aussi Mr **H. KEBIR** Maître de conférence à l'UTC pour ses conseils prodiges et son encouragement.

Je remercie aussi Mr **E.WINTREBERT**, ingénieur ENSAIS, responsable Recherche et développement de l'entreprise TUBEST pour ses suivis mensuels de mon travail et sa disponibilité.

Je remercie chaleureusement les autres membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de ma soutenance, je tiens à remercier aussi tous mes enseignants de l'ENP et en particulier Mr **Y.BELKACEMI** Docteur à l'ENP.

Un grand merci à mes ami(e) s : **S.BESSAOUDI**, **M.GAHLOUZ**, **Y.DJERRAFA**, **S.DOUCENE**, **L.FENNOUCHE**, **C.CHARMET**, **M.SEBASTIEN** et tous les étudiants de GENIE MECANIQUE DE L'ENP, Pour leurs aides et soutiens dans les moment difficiles.

# LE SOMMAIRE

## **Introduction général**

### **I) Généralités sur l'hydroformage**

#### **I.1) Introduction**

#### **I.2) l'évolution de l'hydroformage et ses caractéristiques**

I.2.1) définition

I.2.2) hydroformage des feuilles plates

I.2.3) hydroformage des tubes ou hydrobombement

I.2.4) étirage hydromécanique profond

I.2.5) les nouvelles innovations de l'hydroformage

#### **I.3) les avantages et les inconvénients de l'hydroformage**

#### **I.4) les facteurs affectant le processus de l'hydroformage**

I.4.1) le matériau de tube et formabilité

I.4.2) le frottement

I.4.3) l'outillage

#### **I.5) présentation de cas de notre étude**

### **II) Notion fondamentales sur la fatigue**

#### **II.1) Généralités sur la fatigue**

II.1.1) introduction

II.1.2) fatigue et endommagement

II.1.2.1) Définition

II.1.2.2) Essai d'endurance sous amplitude constante

a) classification des sollicitations

b) diagramme et endurance

b.1) courbe contrainte-nombre de cycles à rupture

b.2) fatigue plastique oligocyclique

b.3) zone d'endurance

b.4) zone d'endurance illimité ou de sécurité

II.1.3) Facteurs d'endurance des pièces

II.1.3.1) Facteurs métalliques

II.1.3.2) Facteurs géométriques

II.1.3.3) Conditions des surfaces

a) influence de la nature de la surface

b) influence de la microgéométrie de la surface

II.1.3.4) Condition de sollicitations

a) nature des efforts

b) effet de surcharge et de sous-charge

c) contraintes résiduelle

- d) influence de la fréquence
- II.1.3.5) influence de l'environnement
  - a) influence de la température
  - b) corrosion

## **II.2) LA FATIGUE PLASTIQUE OLIGOCYCLIQUE :**

- II.2.1) Introduction
- II.2.2) description phénoménologique de la fatigue plastique oligocyclique
  - II.2.2.1) influence de l'écrouissage sur le comportement cyclique.
  - II.2.2.2) relations contraintes-déformations
  - II.2.2.3) Influence d'un écrouissage préalable

## **III) Amorçage des fissures en fatigue et, endommagement:**

### **III .A) L'AMORÇAGE DES FISSURES DE FATIGUE**

- III.A.1) introduction
- III.A.2) Mécanismes physiques de l'amorçage
  - III .A.2.1) Rappel des trois stades de la ruine par fatigue
    - a) définition de l'amorçage
    - b) Importance relative des stades d'amorçage et de propagation.
  - III.A.2.2) influence du niveau de déformation
    - a) domaine des très faibles déformations
    - b) domaine de l'endurance
    - c) domaine des fortes déformations
- III.A.3) méthodes d'évaluation de l'amorçage

### **III .B) ENDOMMAGEMENT**

- III.B.1) mesure de la variable endommagement
- III .B.2) Variable d'endommagement
- III .B.3) Contrainte effective
  - III.B.3.1) définition
  - III.B.3.2) Cumul linéaire et non linéaire
  - III.B.3.3) principe d'équivalence en déformation
  - III.B.3.4) la loi d'endommagement en tenant compte de l'écrouissage
  - III.B.3.5) Mise en œuvre numérique

## **IV) Présentation de logiciel ABAQUS**

### **IV.1) Définition**

### **IV.2) La structure et fonctionnement d'ABAQUS**

- IV.2.1) Le pré traitement
- IV.2.2) la simulation
- IV.2.3) Post traitement

### **IV.3) Les composantes d'un modèle d'analyse en ABAQUS**

- IV.3.1) Discrétisation de la géométrie
- IV.3.2) Les données sur le matériau
- IV.3.3) Le chargement et les conditions aux limites
- IV.3.4) Types d'analyse
- IV.3.5) Les sorties des données souhaitées

### **IV.4) les éléments dans ABAQUS**

## **V) Définition de modèle de l'onduleux**

### **V.1) introduction :**

#### **V.1) la géométrie**

V.1.1) le volume déformable axisymétrique

V.1.2) les flasques, surfaces rigides

V.1.3) éléments de contacts

#### **V.2) caractéristiques mécaniques de l'acier inox316L**

V.2.1) la plasticité de l'acier inox316L

V.2.2) Définitions

V.2.3) la définition de la plasticité dans le code **ABAQUS**

#### **V.3) simulation de l'hydroformage en modélisant une onde**

V.3.1) les conditions aux limites et de liaisons:

V.3.2) parnor 1 POUCE

V.3.3) parrap 1POUCE

#### **V.4) simulation de l'hydroformage en prenant tout le procédé**

##### **V.4.1) hydroformage d'un tube de diamètre nominale 2.54mm**

V.4.1.1) parnor 1 POUCE

V.4.1.2) parrap 1POUCE

##### **V.4.2) hydroformage d'un tube de diamètre nominale 15.24mm**

V.4.2.1) parnor 6 POUCES

V.4.2.2) parrap 6 POUCE

## **VI) calcule des onduleux en fatigue:**

### **VI.1) Introduction**

### **VI.2) résultats expérimentaux**

Parnor 1 POUCE

Parnor 6 POUCE

### **VI.3) résultats de calculs**

Parnor 1 POUCE

Parnor 6 POUCE

### **VI.4) Comparaison des résultats expérimentaux et de calculs :**

## **Conclusion générale**

## INTRODUCTION GENERALE :

Depuis longtemps les recherches poursuivies en fatigue ont montré l'insuffisance des essais statiques des métaux (traction, dureté, choc...) pour les qualifier avec exactitude en vue des applications courantes où les efforts sont le plus souvent variables.

On a donc été amené, pour se mettre à l'abri des défaillances possibles du métal par suite de la fatigue, à calculer les pièces et les assemblages en adoptant certains coefficients dits de sécurité. Ces coefficients arbitraires qui affectent les résistances fournies par les essais de traction sont parfois trop faibles et il en résulte la rupture de pièces en service, ou parfois trop forts, et cela conduit à des dimensions et des poids excessifs.

Il est ainsi apparu indispensable de faire sur des éprouvettes et sur des pièces ou des assemblages eux-mêmes des essais dans des conditions aussi voisines que possible des conditions d'utilisation.

La première approche a consisté à effectuer des essais sous contraintes d'amplitude constante et à déterminer le nombre de cycles nécessaires pour atteindre la rupture (méthode de Wöhler). Il est cependant certain que les sollicitations de service ont très souvent une amplitude variable.

L'expérience industrielle montre que les ruptures de pièces de machines ou de structures en fonctionnement normal sont le plus souvent dues à la fatigue celle-ci est particulièrement insidieuse du fait de son caractère progressif masqué. Ceci est d'autant plus grave que la fissuration par fatigue conduit très souvent à une rupture brutale qui peut provoquer un accident.

Il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles. Souvent bien inférieures à la résistance à la traction et même à la limite d'élasticité du métal, lorsque leur application est répétée un grand nombre de fois [6].

Le but de cette étude est de déterminer les durées de vie à l'endommagement des tubes onduleux flexibles de diamètres 1 pouce (2.54cm) et 6 pouce (15.24cm) pour différentes valeurs de débattement.

Les tubes flexibles sont utilisés dans une large variété d'applications industrielles (automobile, aéronautique, climatisation...etc.) par exemple, ils sont utilisés dans les voitures pour découpler les vibrations du moteur dû au système d'échappement et afin de

recupérer les gaz d'échappement pour les réinjecter via la vanne EGR (Exhaust Gaz Return) dans la chambre de combustion. La figure (1) montre un tube flexible avec 8 ondes (8plis). Grâce à leurs formes ils donnent un joint flexible qui peut être quasi statique lorsqu'il vibre et permet des déplacements verticaux, horizontaux et des rotations.

Un processus d'hydroformage est utilisé pour fabriquer les onduleux à partir des tubes d'acier inox soudés qui sont roulés eux-mêmes à partir des feuilles métalliques. Le processus donne des déformations plastiques, des contraintes résiduelles importantes et un changement significatif de l'épaisseur

Dans le but d'avoir les calculs de la durée de vie aussi précise que possible toutes ces influences doivent être prises en compte.

Les simulations numériques ont été effectuées sur le LOGICIEL 'éléments finis' ABAQUS 6.1 au laboratoire ROBERVAL de l'UTC développée par 'HIBBIT, KARLOSSON & SORENSEN, inc'

Les résultats de calcul seront comparés à des résultats expérimentaux effectués au laboratoire de mécanique des structures de l'ENSAM sur machine d'essai servo-hydraulique MTS  $\pm 100$  KN.



Fig.1. Tube flexible avec huit ondes

# ***CHAPITRE I***

# **I) LA TECHNOLOGIE DE L'HYDROFORMAGE**

## **I.1) introduction**

L'hydroformage ou le formage hydraulique est devenu un des processus fondamentaux pour le formage des feuilles métalliques. Développé juste au début de la seconde guerre mondiale, ses applications dans l'industrie aéronautique allemande étaient limitées dans des applications spécifiques à cause des inconvénients particuliers et le manque de recherche et de savoir-faire dans ce domaine. Mais depuis 1990 beaucoup de travail a été fait pour l'application de cette technologie dans d'autres domaines d'industrie et spécialement l'industrie automobile.

En novembre 1997 un congrès est tenu à Bolsum en Allemagne où des chercheurs et industriels ont été réunis pour partager des connaissances sur le processus et ses applications dans l'industrie automobile. Maintenant presque tous les leaders de l'automobile au monde ont adopté cette technologie comme un moyen pour renforcer leur puissance de concurrence sur le marché [1]

Les étapes d'un processus d'hydroformage typique sont montrées sur la figure (I.1). Une pression interne due à un fluide est appliquée, après que les matrices soient fermées, pour forcer le matériau (le tube) dans la zone de déformation. Pendant ce processus l'avancement axial et la pression interne sont contrôlés simultanément pour augmenter les capacités de façonnage [2].

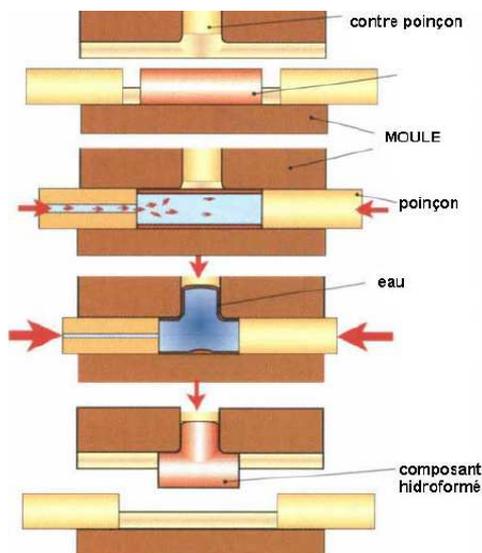


Fig.I.1



Fig.I.2

La figure .I.2 : Différents produits de l'hydroformage des tubes

## **I.2) l'évolution de l'hydroformage et ses caractéristiques:**

### **I.2.1) définition :**

On peut définir l'hydroformage comme une technologie de formage à outils souples (tendres) (*soft-tool forming technologie*), En hydroformage un fluide , généralement l'eau , est utilisé comme un poinçon ou une matrice.

L'hydroformage peut être classé en fonction des caractéristiques de processus [3] :

### **I.2.2) hydroformage des feuilles plates (*flat sheet hydroforming*) :**

Dans ce processus un diaphragme en caoutchouc est utilisé pour séparer le fluide et la tôle. La matrice n'est pas utilisée et un poinçon rigide se déplace vers la chambre fluide et la tôle est forcée à avoir la forme de poinçon sous la pression de fluide.

Cette technologie a été introduite dans l'industrie automobile pour produire des pièces de la carrosserie automobile. Elle est spécialement adaptée pour la production en série de pièces mécanique de petites dimensions, en effet c'est une technologie à matrice souple (figure.I.3)

### **I.2. 3) hydroformage des tubes ou hydrobombement (*hydroforming*) :**

Dans cette technologie le poinçon n'est pas utilisé .Un fluide est utilisé à la place (un poinçon souple).le tube est hydroformé dans la forme désirée par une application simultanée d'une force axiale de compression et une pression interne .finalement la pièce tubulaire est forcée à avoir la forme de la matrice .en effet c'est une technologie à outil souple (figure.I.1).

### **I.2.4) étirage hydromécanique profond (*Hydromechanical deep drawing process*):**

C'est la même technologie que la première mais sans le diaphragme en caoutchouc .elle est utilisée pour le façonnage des coques profondes (figure.I.4).

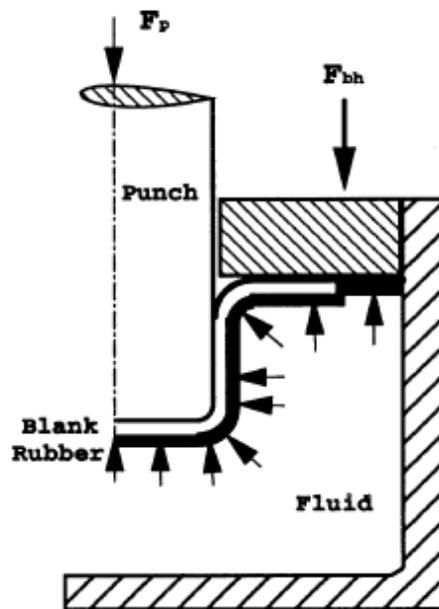


Fig.I.3: Hydroformage d'une coque cylindrique (hydroformage des feuilles plates)

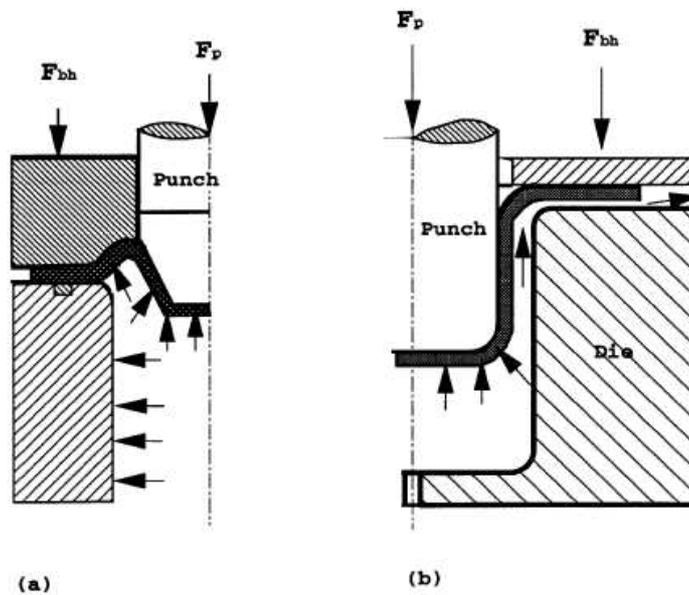


Fig.I.4 : traçage hydromécanique profond :

(a) : hydrostatique

(b): hydrodynamique

### I.2.5) les nouvelles innovations de l'hydroformage :

Les plus récentes évolutions de l'hydroformage sont :

**Le formage de compression visqueux (*viscous pressure forming*) VPF** et le formage par **hydrobombement intégrale (*intégrale hydrobulge forming*) IHBF**

La première utilise un milieu visqueux comme une souple matrice sur laquelle la pression peut être varier le long de la feuille métallique qui est l'interface entre les deux milieux (voir fig.I.5). cette technologie est destinée au formage des matériaux difficilement formable.

La deuxième a été développée dans les années 1990, elle est adaptée pour les formes sphériques.

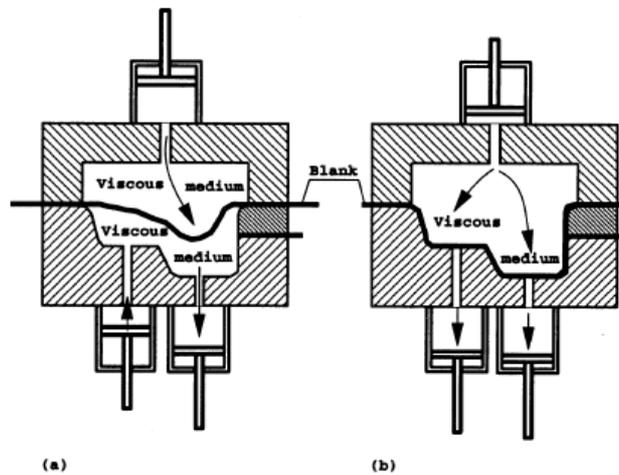


Fig.I.5 : le formage de compression visqueux de feuilles de tôle plates :

(a) pendant le formage

(b) la forme finale souhaitée

### I.3) Les avantages et les inconvénients :

La technologie de l'hydroformage est généralement utilisée pour produire des pièces tubulaires et coques métalliques de formes complexes. Les produits de l'hydroformage sont utilisés dans l'automobile, l'aéronautique, la bicyclette et le ménage.

La technologie de l'hydroformage a les caractéristiques et *les avantages* suivants : Elle nécessite un seul outil rigide, soit le poinçon, soit la matrice. L'autre outil est un milieu fluide ce qui entraîne de réduction des coûts liés aux outils, elle augmente la qualité et la performance des produits d'une manière significative. Les produits de l'hydroformage sont

moins lourds, moins chers, résistants, rigides et de haute qualité comparés aux produits de l'emboutissage. On a aussi des dimensions des pièces plus exactes et des contraintes résiduelles moins significatives.

Les pièces hydroformées peuvent être très complexes, cette technologie permet d'obtenir des formes complexes que les méthodes conventionnelles ne permettent pas (le cas de notre étude).

La plupart des matériaux utilisés pour le formage conventionnel peuvent être utilisés dans l'hydroformage. Les matériaux nécessitent des propriétés d'allongements suffisantes pour permettre le fléchissement, le bombement et extension sans rupture. L'aluminium, différents alliages de cuivre et les aciers inox sont utilisés.

Parmi les *désavantages* de l'hydroformage (les inconvénients et limitations) on cite :

- 1) un cycle de temps de production relativement lent ce qui limite le processus à des pièces de petites dimensions
- 2) nécessite des matrices très polies (un excellent état de surface)
- 3) les équipements de l'hydroformage coûtent 30% de plus par rapport aux équipements de l'emboutissage.
- 4) la nécessité d'une presse puissante pour maintenir la pression hydrostatique activant contre le poinçon.

Dans le procédé de l'hydroformage, une tôle tubulaire est préformée souvent par flexion et dans des locations multiples pour avoir une forme de telle sorte qu'il puisse être insérée dans la matrice. Puis on ferme la matrice. Le tube est fixé à chaque extrémité et finalement un liquide hydraulique remplit le tube et une pression hydraulique à l'intérieure de tube est appliquée et simultanément une force axiale est appliquée aux extrémités de tube poussant le tube dans la matrice. La paroi du tube est pressée dans le contour interne de la matrice et la pièce est formée.

#### **I.4) les facteurs affectant le processus d'hydroformage :**

La figure (I.6) montre les éléments d'un système d'hydroformage typique.

Chacun de ces éléments joue un rôle important dans le succès de processus et doivent être étudiés dans le stage de développement de processus.

Comme l'hydroformage est devenu largement utilisé beaucoup d'études doivent être faites sur :

La préparation de tube (le choix de matériaux, la qualité de tube)

Le design des pièces

Le soudage des tubes et des pièces hydroformées

Le choix de lubrifiants (ils ne doivent pas s'écouler pour les grandes pressions)

L'amélioration de la rapidité de processus

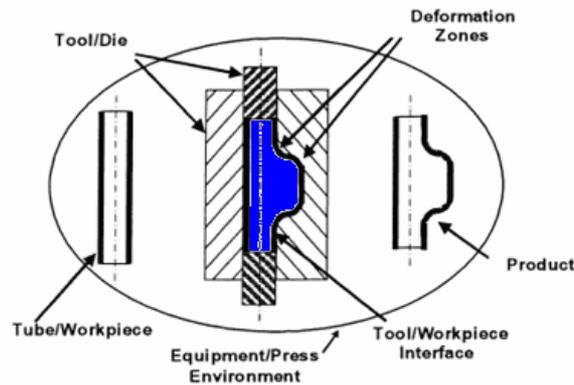


Fig.I.6:les éléments d'un système d'hydroformage

#### **I.4.1) Le matériau de tube et formabilité :**

Plusieurs facteurs jouent un rôle important dans le choix de matériaux pour l'hydroformage des tubes, parmi ces facteurs on peut citer :

- a) les propriétés finales de la pièce
- b) le processus de formage
- c) aptitude à la déformation

Dans beaucoup de cas le choix de matériau est un compromis entre différents paramètres .par exemple l'acier HSLA (*high strength low alloy*) peut être utilisé pour réduire le poids au dépend de la rigidité (très cher et difficile pour le formage) .les matériaux les plus utilisés dans l'hydroformage sont :

les aciers à faible teneur en carbone (SAE 1006 /1008 .1010)

les aciers inox (AISI 304, AISI309, AISI 316L)

Les alliages d'aluminium

Le cuivre et ses alliages

La qualité de tube à former est très importante pour le succès de l'opération.

Les propriétés de matériau (la composition chimique, le type de soudage, la limite élastique, la résistance ultime) et les dimensions (ie le diamètre et l'épaisseur) du tube doivent être déterminés en se basant sur les recommandations de la pièce.

#### I.4.2) les frottements [5]:

Les conditions de lubrification et de friction en hydroformage sont très critiques et spécialement dans les pièces où un avalement axial est nécessaire. Dans ce cas un lubrifiant est utilisé pour diminuer la force des frottements et donc l'usure des outils.

Dès que la surface de tube est en contact avec la matrice. Une interface de friction est générée et en fonction de coefficient de frottement la distribution des déformations ne sera pas uniforme. Le matériau sera localement étiré.

Dans le but de distribuer l'étirement sur toute la section de tube. On diminue le coefficient des frottements. Le matériau pourra donc s'écouler sur toute la zone de déformation.

Le lubrifiant piégé dans les aspérités entre le tube et la matrice fournit la lubrification (voir fig.I.7) mais comme la pression interne augmente, la surface de contact augmente et les

frottements augmentent. Pour cela on doit asservir le coefficient de frottement  $\mu = \frac{\tau}{\sigma}$

$\tau$  : Contrainte tangentielle de frottement.

$\sigma$  : Contrainte normale.

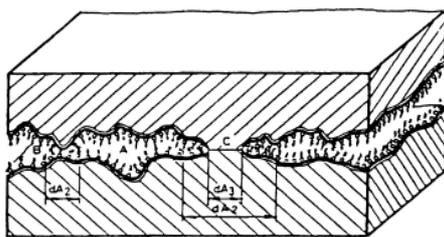


Fig.I.7: surface de contact en hydroformage [5]

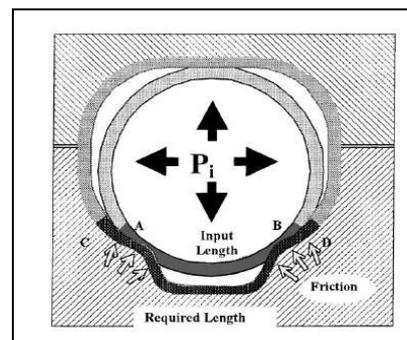


Fig.I.8: surface de frottement dans l'hydroformage des tubes [4]:

*La section AB de tube initiale est étirée pour former l'arc de longueur CD.*

Une grande variété de lubrifiants est utilisée dans l'hydroformage :  
Les lubrifiants solides (graphite, MoS<sub>2</sub>), huile, la cire et à base de polymère.

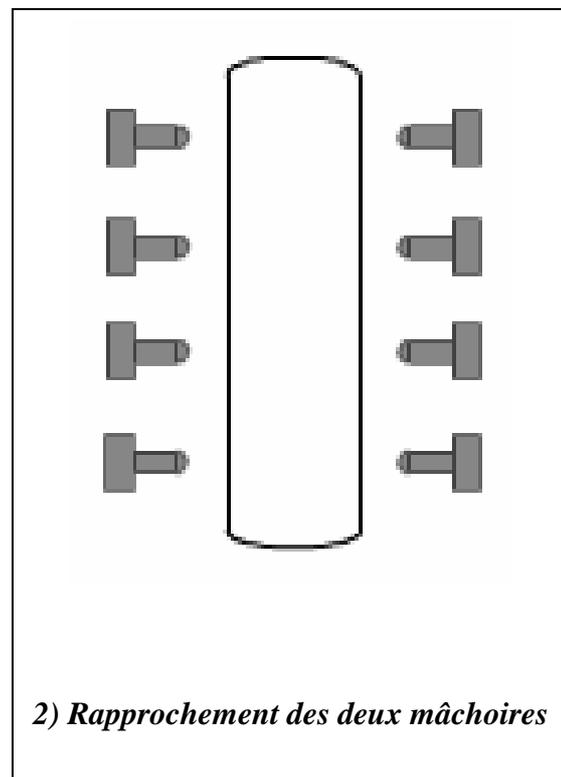
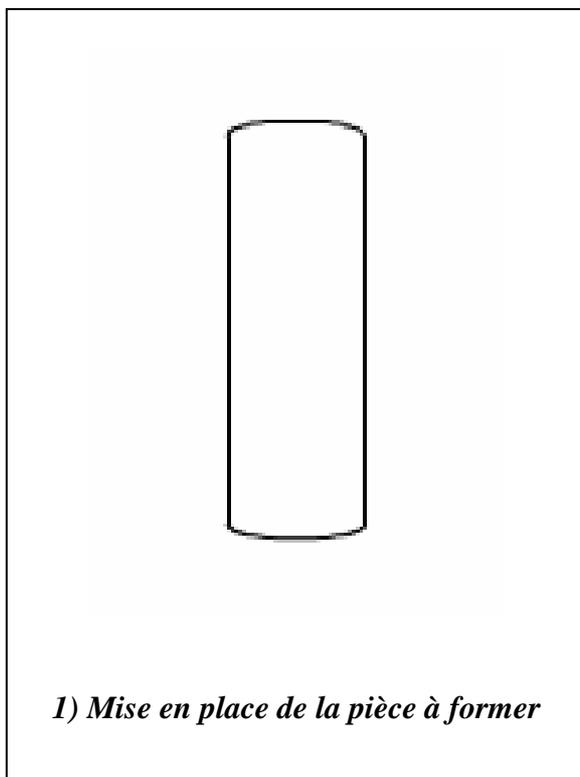
#### **I.4.3) L'outillage :**

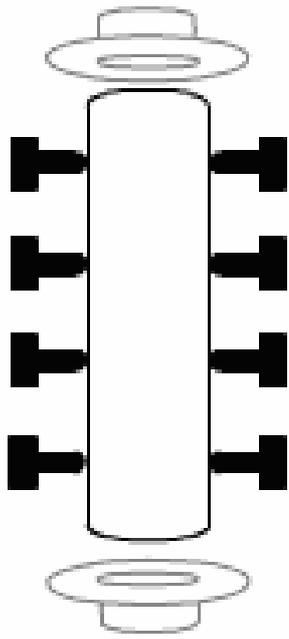
La fonction principale de la presse en hydroformage est d'ouvrir et de fermer la matrice, fournissant l'effort de serrage nécessaire durant le processus de formage pour éliminer la séparation des matrices.

Pour réduire le cycle du temps on doit augmenter le volume des fluides circulant dans la presse ce qui augmente la productivité.

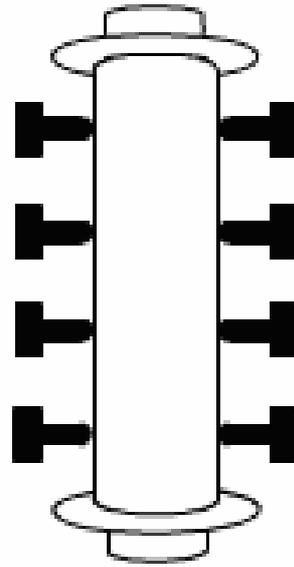
#### **1.5) la présentation de notre cas :**

**Dans notre étude on a affaire à un hydroformage à poinçon souple et à matrice rigide les étapes sont schématisées dans les figures suivantes :**

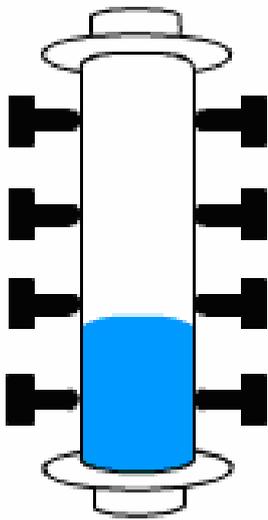




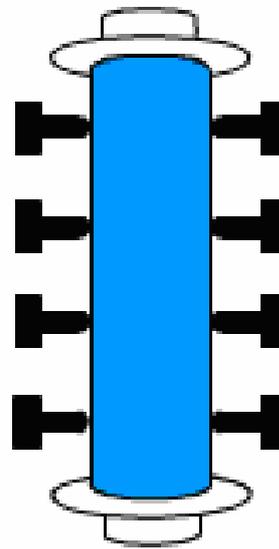
*3) La pièce à former est serrée par deux mâchoires*



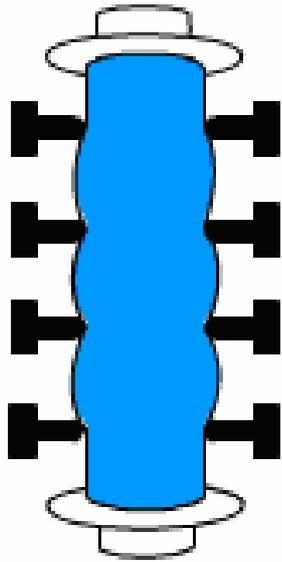
*4) La pièce est fermée aux extrémités*



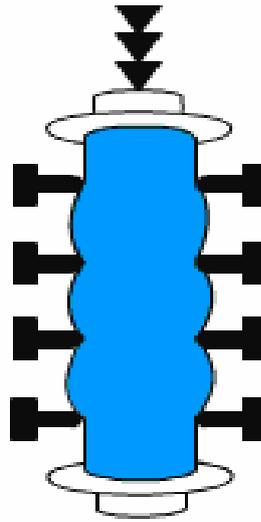
*5) L'injection de l'eau*



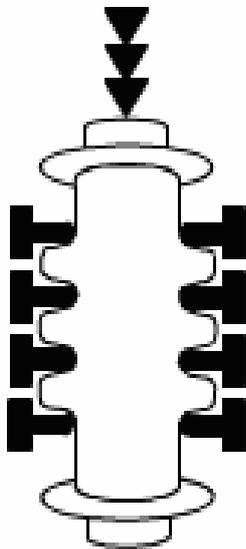
*6) L'eau sous pression est injectée dans la pièce à former*



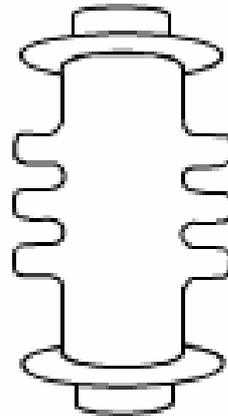
*7) Mise sous pression : la pièce se déforme sous l'action de la pression interne*



*8) Compression : la pièce est compressée de l'extérieur pour sa mise en forme*

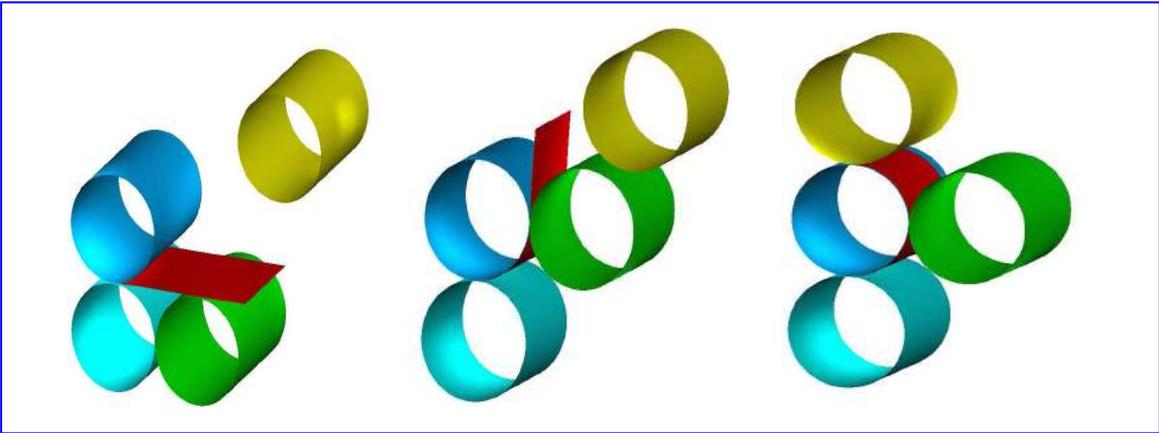


*9) Relâchement de la pression interne*



*10) Retrait des deux mâchoires*

Avant l'hydroformage on a deux autres opérations : le roulage et le soudage qu'on négligera dans notre étude.



**Figure1.9.Procédé de roulage du tube**



**Figure 1.10. Tube à cinq ondes (plis)**

# **CHAPITRE II**

## II ) NOTIONS FONDAMENTALES SUR LA FATIGUE :

### II.1) GENERALITES SUR LA FATIGUE :

#### II .1.1) INTRODUCTION :

L'expérience montre que, si l'amplitude et le nombre de sollicitations périodiques (chargement variable dans le temps) sont suffisants, il en résulte une **fissuration progressive puis une rupture par fatigue**. Généralement, celle-ci se produit brutalement, sans allongement précurseur, et la *cassure* présente deux zones distinctes : une *zone lisse*, qui est la cassure de fatigue proprement dite, sur laquelle on peut observer des lignes d'arrêt successives, et une *zone d'arrachement*, à nerf ou à grain, qui correspond à la rupture finale instantanée. Cette rupture peut survenir pour des contraintes appliquées bien inférieures à la charge de rupture statique et même à la limite d'élasticité apparente.

#### II.1.2) FATIGUE ET ENDURANCE:

##### II.1.2.1) Définitions :

**Fatigue (endommagement par fatigue) :** On entend **fatigue** par la modification des propriétés des matériaux consécutifs à l'application de cycles d'efforts, cycles dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces constituées avec ces matériaux [6].

**Endurance :** On appelle endurance la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des assemblages [6].

**Durée de vie :** elle est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture **N**. l'exécution de **n** cycles ( $n < N$ ) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de chiffrer car il détermine sa capacité de vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident.

##### II.1.2.2) Essai d'endurance sous amplitude constante :

###### A) Classification des sollicitations :

Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle,  $\sigma_{\max}$ , par la valeur moyenne de la contrainte,  $\sigma_m$ , et par le rapport de la contrainte minimale

à la contrainte maximale  $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$

On est parfois conduit à distinguer la composante alternative  $\sigma_a$  de la composante

statique  $\sigma_m$  .ainsi, selon les valeurs relatives de ces deux composantes, on distingue les essais sous différentes sollicitations (fig. II.2)

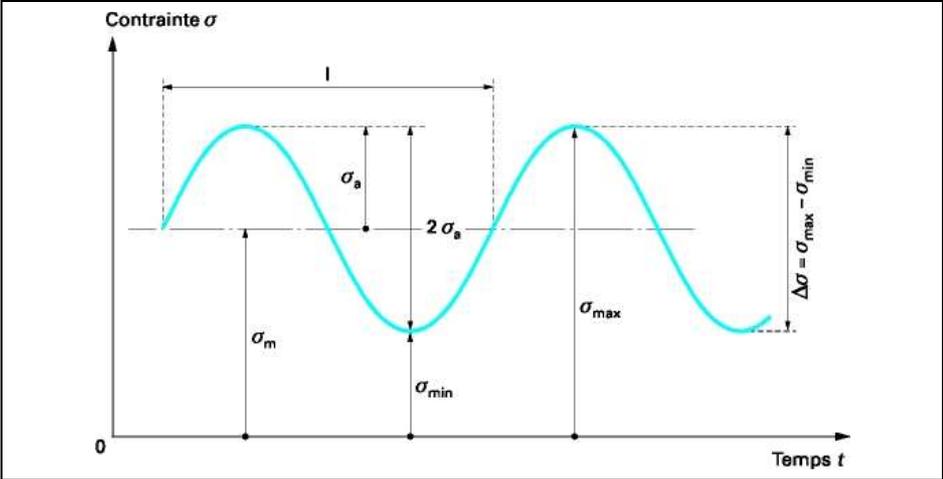


Fig. II.1 : cycle de contrainte de fatigue: définitions

- $\sigma_a$  : amplitude de la contrainte
- $2\sigma_a$  : étendue de variation de la contrainte
- $\sigma_m$  : contrainte moyenne
- $\sigma_{max}$  : contrainte maximale
- $\sigma_{min}$  : contrainte minimale
- $l$  : cycle de contrainte

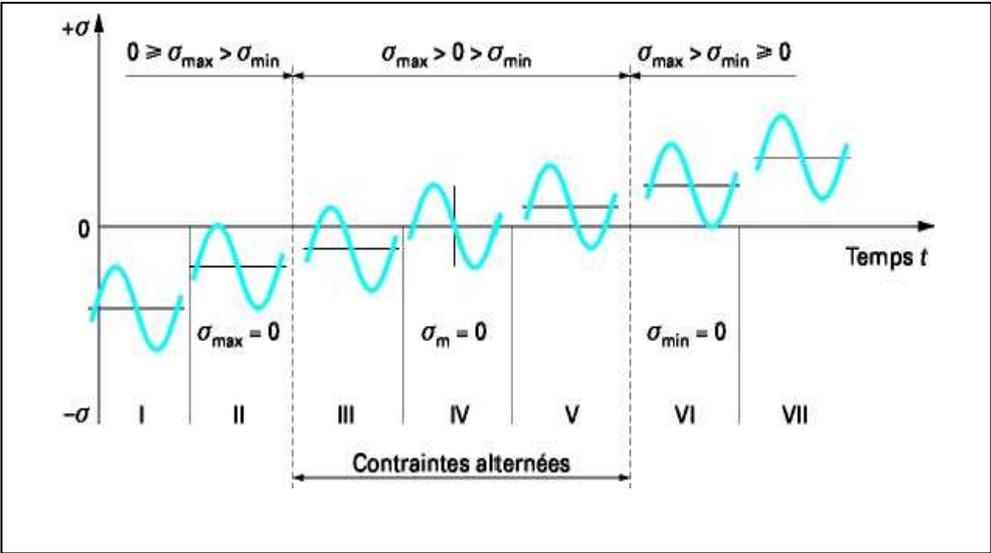


Fig.II.2 : Différents cas de sollicitation : effort-temps

- I contrainte ondulée de compression :  $1 < R_\sigma < +\infty$
- II contrainte répétée de compression :  $R_\sigma \rightarrow +\infty$

III contrainte alternée dissymétrique :  $-\infty < R_\sigma < -1$

IV contrainte purement alternée :  $R_\sigma = -1$

V contrainte alternée dissymétrique :  $-1 < R_\sigma < 0$

VI contrainte répétée de traction :  $R_\sigma = 0$

VII contrainte ondulée de traction :  $0 < R_\sigma < 1$

## B) diagrammes d'endurance:

### B.1) courbe contrainte-nombre de cycles à rupture (courbe de Wöhler) :

L'essai de fatigue le plus simple consiste à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude maximale et de fréquence constantes, et à noter le nombre de cycles  $N_r$  au bout duquel la rupture se produit. On reporte ce nombre  $N_r$ , en générale sur une échelle logarithmique, en fonction de la contrainte maximale des cycles. A chaque éprouvette correspond un point du plan  $(\sigma, N)$  et, à partir d'un lot d'éprouvettes soumises à des contraintes maximales différentes, on obtient une courbe qui a l'allure de celle représentée sur la figure (II.3)

Sur cette courbe, connue sous les noms de **courbe de Wöhler** et **courbe S-N** (stress-Number of cycles) ou **courbe d'endurance**, on peut distinguer trois domaines :

**-I** : zone de *fatigue plastique oligocyclique*, sous forte contrainte ; la rupture survient après un très petit nombre d'alternances et elle est précédée d'une déformation plastique notable ;

**-II** : zone de *fatigue ou d'endurance limitée*, où la rupture est atteinte après un nombre limité de cycles, nombre qui croit quand la contrainte décroît ;

**-III** : zone *d'endurance illimitée ou zone de sécurité*, sous faible contrainte, pour laquelle la rupture ne se produit pas avant un nombre  $N_f$  donné de cycles :  $10^7$ ,  $3 \cdot 10^7$  et même  $10^8$ , voir  $10^9$ , supérieur à la durée de vie envisagée pour la pièce.

Dans de nombreux cas, on peut tracer une branche asymptotique à la courbe de Wöhler, l'asymptote étant la limite d'endurance ou la limite de fatigue  $\sigma_d$ . par contre dans certains cas, il ne semble pas qu'il y ait d'asymptote horizontale : c'est par exemple, ce qui se produit lorsqu'il y a simultanément fatigue et corrosion [6].

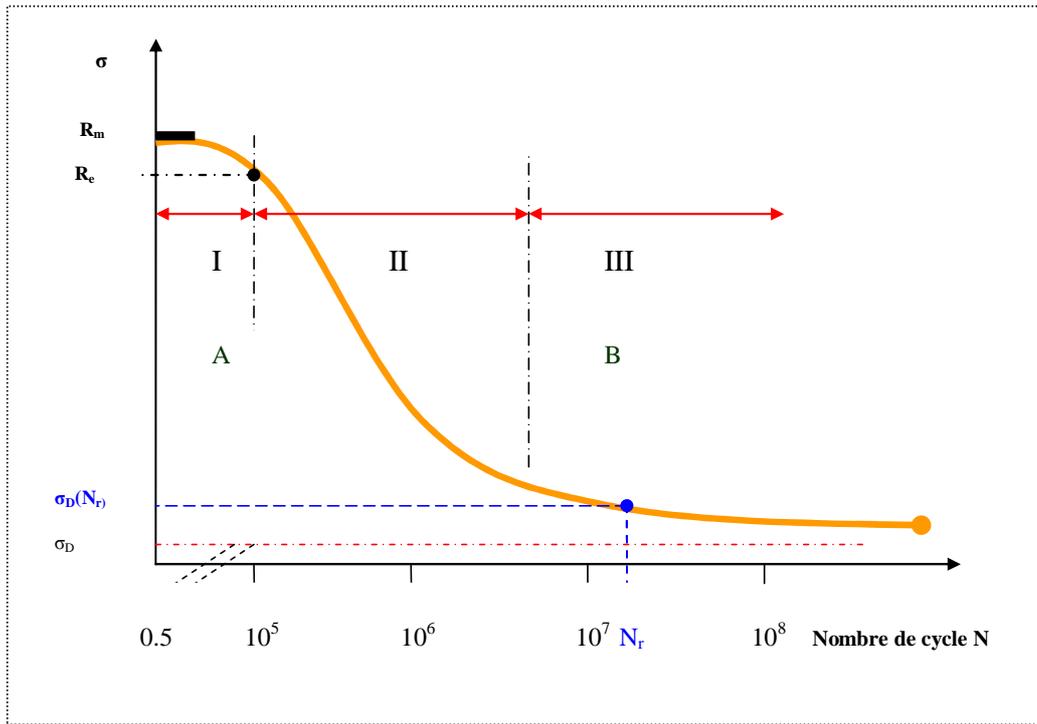


Fig.II.3 : Courbe de Wöhler

**I** : domaine plastique oligocyclique

**II**: domaine d'endurance limitée

**III**: domaine d'endurance illimitée

**A**: zone de non rupture probable

**B**: zone de rupture probable

$R_e$ : limite d'élasticité

$R_m$ : charge de rupture

$\sigma_D(N_r)$  : limite d'endurance conventionnelle à  $N_r$  cycles

$\sigma_D$  : limite de fatigue

### **B.2) fatigue plastique oligocyclique** [7], [8]

Il est généralement admis que ce domaine correspond à des contraintes élevées supérieures à la limite d'élasticité du matériau. Le nombre de cycles à rupture s'étend de  $1/2$  jusqu'à  $10^4$  ou  $10^5$  selon la nature du matériau.

Coffin a montré que, dans ce cas, la relation entre la déformation plastique  $\Delta\varepsilon_p$  et le nombre de cycle à rupture  $N_r$  est :

$$\frac{\Delta\varepsilon_{p\ell}}{2} = A(2N_r)^a$$

A, a étant des constantes liées au matériau.

### ***B.3) Zone d'endurance limitée***

C'est le domaine de la fatigue habituellement considérée où la rupture apparaît après un nombre limité de cycles ( $10^5$  à  $10^7$ ) sans être accompagnée d'une déformation plastique d'ensemble mesurable. Le nombre de cycle à rupture  $N_r$  croît quand l'amplitude de la contrainte  $\sigma$  décroît. Parmi les nombreuses expressions proposées pour relier  $N_r$  à  $\sigma$ , nous citerons celle de **Wöhler** assimilant la courbe à une droite [9] :

$$\ln N_r = a - b\sigma$$

Où  $a$  et  $b$  sont des constantes que l'on détermine expérimentalement :

Celle de **Weibull** :

$$N_r(\sigma - \sigma_D)^n = A$$

Avec  $n=1$  ou  $2$  selon les métaux

Et enfin celle de **Bastenaire** :

$$N_r + B = \frac{Ae^{-c(\sigma - \sigma_D)}}{\sigma - \sigma_D}$$

Où  $\sigma_D$  est la limite d'endurance qui borne inférieurement ce domaine,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  des paramètres caractéristiques de la nature de matériau et des conditions d'essai.

### ***B.4) Zone d'endurance illimitée ou de sécurité :***

Pour les contraintes maximales appliquées, la durée de vie peut être considérée comme supérieure à celle envisagée pour la pièce ou la construction:  $N_r > 10^7$  ou  $10^8$  selon la position de la limite d'endurance  $\sigma_D$ . pour des conditions maximales inférieures à  $\sigma_D$ . Les conditions de germination des microfissures sont rarement réunies ou alors leur dimension n'atteint pas la taille critique.

**La limite d'endurance théorique** : c'est la limite supérieure de la contrainte périodique qui peut être appliquée indéfiniment sans causer la rupture. Nous avons indiqué qu'elle n'existait pas toujours.

**La limite conventionnelle** : c'est la valeur maximale de la contrainte qui n'entraîne pas la rupture avant un nombre de cycles donné. celle-ci peut toujours être déterminée.

En pratique la détermination de la limite d'endurance pose un problème particulier par suite du caractère aléatoire des ruptures de fatigue dans la zone d'endurance. C'est pourquoi Les seules méthodes rigoureuses de détermination de la limite d'endurance font appel à des *méthodes statistiques* [6].

Notons enfin que la dispersion des résultats des essais de fatigue est un fait d'expérience. Celle-ci provient en effet de nombreuses causes liées à l'hétérogénéité des matériaux, aux tolérances d'usinage, aux défauts superficiels, à la présence de contraintes résiduelles, aux tolérances de montage sur la machine, aux variations de températures et de milieu au cours de l'essai, etc. On peut la réduire en précisant tous les paramètres et en les maintenant dans les limites étroites, on peut réduire cette dispersion en précisant tous les paramètres et en les maintenant dans les limites étroites, mais on ne peut pas l'éliminer par suite du caractère aléatoire des ruptures par fatigue. C'est pourquoi, sur la courbe de Wöhler, la durée de vie pour une contrainte donnée  $\sigma$  ne peut pas être représentée par un point mais par une distribution du nombre de cycles  $N$ .

### II.1.3) FACTEURS DE L'ENDURANCE DES PIÈCES :

On peut dire, pour simplifier, que l'endurance d'une pièce ou d'un élément de structure est la résultante de plusieurs *phénomènes compétitifs* :

- **D'une part**, l'endommagement progressif du métal par suite de l'existence des concentrations locales de contrainte, qui entraîne des déformations plastiques, et de l'irréversibilité des glissements au cours des cycles successifs (interaction de dislocations, rôle de l'environnement) ; ces phénomènes entraînent la fissuration du métal ;
- **D'autre part**, l'adaptation, c'est à dire la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée, qui entraîne la disparition des « pointes de contraintes », puis l'accommodation, c'est à dire la modification des propriétés du métal, qui le rend plus apte à supporter des effets cycliques, par la consolidation liée à l'érouissage et par le durcissement qu'entraîne le vieillissement du métal, qui le rend plus apte à supporter des effets cycliques.

Il en résulte que tous les facteurs qui agissent sur ces différents phénomènes joueront un rôle vis-à-vis de l'endurance des pièces mécaniques. Ces facteurs sont très nombreux et on peut les ranger, pour schématiser, en *quatre catégories* : les facteurs métallurgiques, les facteurs géométriques, les conditions de surface, les conditions de sollicitations.

#### II.1.3.1) Facteurs métallurgiques :

On peut ranger dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure cristallographique), à son élaboration et à sa mise en

forme (inclusions, défauts...etc.), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique) subis par la pièce.

Les observations faites sur les pièces rompues par fatigue montrent que les inclusions, lorsqu'elles sont assez grosses, sont toujours à l'origine des fissures.

De plus, celles-ci cheminent au sein du métal d'une inclusion à l'autre, mettant ainsi en évidence leur rôle lors de la propagation de ces fissures. Plus généralement, la résistance à la fatigue dépend de la quantité, de la taille, de la nature et de la répartition des inclusions, ainsi que de leur forme par rapport à la direction des efforts.

L'influence des inclusions est attribuée à la concentration locale de contrainte qu'elles provoquent par leur manque de plasticité, et qui peut conduire à la formation de microfissures supprimant ainsi la phase d'amorçage.

En conséquence, les métaux doivent être d'autant plus propres que l'on cherche une résistance et une endurance plus élevées [6].

### **II.1.3.2) Facteurs géométriques :**

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et par leurs formes (effet d'entaille). L'effet d'échelle consiste en une augmentation de la contrainte de rupture en diminuant le diamètre de l'éprouvette, bien que sa valeur moyenne soit fonction décroissante de la taille de l'échantillon,  $\sigma_R$  présente toujours une grande dispersion quelque soit le soin pris pour opérer sur des échantillons identiques, ce sont les inévitables défauts de réseau cristallin qui sont responsables des effets d'échelle et de dispersion, de fait de leur répartition statistique plus un échantillon est volumineux et plus le défaut qu'il contient peuvent être de taille importante diminuant sa résistance à la rupture[6],[10].

La résistance effective à la rupture  $\sigma_R$  des matériaux massifs de nos structures est **10 à 100** fois plus faible que la contrainte de cohésion  $\sigma_{th}$  de la matière (somme des forces de liaison de la section la plus faible).

### **II.1.3.3) conditions des surfaces :**

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure de possible celle des couches superficielles. On peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur

la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes de signe favorable.

**a) influence de la nature de la surface :**

Il convient de s'opposer à un adoucissement de la surface des pièces par rapport au métal du cœur. Dans le cas des aciers, cet adoucissement est le plus souvent la conséquence d'une décarburation se produisant lors d'un traitement thermique effectué en atmosphère oxydante. Il en résulte une baisse de l'endurance de la couche superficielle dont la limite est alors celle d'un acier à bas carbone. Cet abaissement permettra la formation de fissures qui se propageront dans toute la pièce pour des contraintes inférieures à la limite d'endurance du métal non décarburé, non entaillé.

De façon plus générale, tous les procédés de durcissement superficiels sont utilisables pour améliorer l'endurance des pièces, mais leur action est inséparable de celle des précontraintes développées dans les pièces par ces procédés.

**b) Influence de la microgéométrie de la surface :**

Les irrégularités de surface se comportent comme des micro-entailles qui provoquent des concentrations de contraintes dans les couches superficielles les plus chargées. L'expérience a montré que ces conditions peuvent atteindre un niveau suffisant pour amorcer la fissuration par fatigue diminuer sensiblement la durée de vie de la pièce.

En pratique, on ne peut pas séparer le degré de fini obtenu du procédé de fabrication employé donc des contraintes résiduelles laissées dans le métal par ces divers procédés. On peut cependant dire que la micro-géométrie de la surface est fine, meilleure est l'endurance. Il faut cependant tendre vers le meilleur état de fini tout en ne créant pas des contraintes résiduelles défavorables, par exemple des contraintes de tension qui accompagnent une rectification sévère. Il est nécessaire d'y parvenir avec le moins de contraintes de tension ou avec des contraintes de compression (polissage mécanique).

**II.1.3.4) Conditions de sollicitation :**

**a) nature des efforts :**

pour une même éprouvette, essayée sous même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, la répartition et, par suite, les gradients de contraintes à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts

appliqués .pour des efforts axiaux ,traction ou compression , les contraintes sont uniformes dans la section ,tandis qu'en flexion ou en torsion elles sont maximales en surface et nulle au centre ,sur la fibre neutre.ces différences de gradient qui entraînent des variations importantes dans le volume de métal déformé conduisent à des différences de limites  $\sigma_D$  qui décroît de la flexion (plane ou rotative) à la traction compression puis à la torsion [10].

#### **b) effet de surcharge et de sous-charge :**

Une surcharge temporaire peut conduire à dépasser localement la charge de rupture du matériau et produire un endommagement irréversible sous forme d'une fissure.

Celle-ci pourra se propager ensuite, sous l'effet de la concentration de contrainte qu'elle provoque à son extrémité, même sous une contrainte moyenne qui autrement ne conduit pas à rupture : c'est l'effet de surcharge (*overstressing*), d'autant plus à craindre que le matériau est plus sensible à l'effet d'entaille.

Inversement, si l'on soumet le matériau à des contraintes périodiques inférieures à sa limite d'endurance, on peut avoir localement des micro-déformations plastiques qui relâcheront les concentrations de contrainte et écrouiront le matériau, le rendant apte à supporter des contraintes plus élevées : C'est l'effet de sous -charge (*understressing*) qui, pour les matériaux très adaptables, permet de relever la limite d'endurance de façon sensible (10 à 20%)

#### **c) Contraintes résiduelles :**

Aux contraintes appliquées se superpose l'effet des contraintes résiduelles, qu'elles soient à l'échelle microscopique, par exemple entre grains voisins, ou à l'échelle macroscopique de la pièce, par suite du formage ou de traitements thermiques .localement, c'est la somme algébrique des contraintes qu'il faut considérer et ,si les contraintes résiduelles de tension peuvent aggraver dangereusement les pointes de contraintes , inversement des précontraintes de compression permettent d'augmenter le taux de travail admissible.

#### **d) Influence de la fréquence :**

Par suite de l'existence d'un frottement intérieur, il y a retard de la déformation sur la contrainte .dans le cas de contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la

fréquence des cycles .si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même amplitude diminue et, par suite, l'endurance se trouve augmentée ,tout au moins tant que cette augmentation de fréquence n'entraîne pas un échauffement de l'éprouvette. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même de l'endurance, principalement à cause de l'effet d'environnement

### **II.1.3.5) Influence de l'environnement :**

#### **A) Influence de la température :**

La limite d'élasticité et la résistance à la traction diminuent lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance qui leur est proportionnelle.

#### **B) Influence de l'environnement :**

La durée de vie en fatigue sous vide (ou dans un gaz inerte ) est plus importante que dans l'air,elle-même plus élevée que dans un milieu corrosif (eau salée,milieux à haute teneur en soufre)

## **II.2) LA FATIGUE PLASTQUE OLIGOCYCLIQUE [6], [8], [10]**

### **II .2.1) Introduction**

L'analyse du comportement des matériaux sous ses sollicitations est assez récente En effet, si les premières études sur le rôle de la déformation plastique sur l'endurance en fatigue remontent au début du siècle (Baushinger (1886)-Bairstow (1909),il faut attendre 1948 pour que les premiers essais à déformation contrôlée soient entrepris (Liu,Lynch et Ripling) et les années 1952-1953 pour que des formulations reliant l'endurance à l'amplitude de déformation soient proposées (**Manson** et **Coffin** ).depuis ,les études sur la fatigue se sont développées très rapidement et ont pris une importance croissante.

### **II.2.2) Description phénoménologique de la fatigue oligocyclique**

Pour décrire le comportement des matériaux en fatigue plastique oligocyclique, nous nous placerons dans le cas simplifié d'un essai à déformation imposée alternée.

Nous décrirons successivement l'évolution des contraintes :(écrouissage cyclique), les relations contraintes déformations, la résistance à la rupture. On détaillera surtout les deux effets suivants :

- L'influence de l'écrouissage sur le comportement cyclique.

- L'influence de l'érouissage sur l'évolution de l'endommagement et sur la durée de vie.

### **II.2.2.1) influence de l'érouissage sur le comportement cyclique.**

Pour chaque matériau les effets de l'érouissage peuvent se manifester de différentes façons en fonction du type de chargement appliqué :

- Erouissage monotone dans l'essai de traction
- Erouissage cyclique progressif en traction-compression, aboutissant généralement à un régime stabilisé dans lequel on observe la périodicité des boucles d'hystérésis contrainte-déformation.

Dans de nombreux cas le comportement cyclique observé c'est-à-dire l'ensemble des boucles d'hystérésis stabilisées ne dépend pas des conditions préalables de chargement. Même s'il s'agit de prédéformations monotones ou cycliques importantes, pour certains aciers inoxydables au contraire, en particulier pour le 316L, le comportement cyclique dépend des déformations préalables comme on l'observe dans les essais à déformation contrôlée comportant plusieurs niveaux.

1) après durcissement cyclique et stabilisation sous de faibles amplitudes de déformation, un durcissement supplémentaire se produit pour des amplitudes plus élevées et une nouvelle stabilisation de cet effet n'a lieu qu'au bout de 10 cycles ou plus (figure II.12).

2) après un cyclage à niveau de déformation élevé on observe un effet de mémoire du durcissement par un cyclage plus faible, la boucle d'hystérésis se stabilise pour une amplitude de contrainte nettement plus élevée que dans le cas d'un cyclage normal au même niveau

Un tel effet de mémoire de l'érouissage est corrélé avec l'amplitude maximale de déformation plastique subie antérieurement par l'échantillon.

En d'autres termes quand une éprouvette est soumise à une déformation cyclique imposée on constate que les contraintes minimales et maximales ne restent que rarement constantes. Le plus souvent, après un stade transitoire (période d'accommodation : quelques dizaines de cycles) où les contraintes maximales varient très rapidement, en croissant (consolidation ou durcissement cyclique) ou décroissant (déconsolidation ou adoucissement cyclique), elles se stabilisent jusqu'à l'apparition d'une fissure entraînant une décroissance rapide. La présence d'un stade stabilisé permet d'associer à la déformation imposée une contrainte résultante (fig. II.4 et fig. II.5)

La représentation logarithmique (fig.II.4) donne une importance exagérée aux premiers cycles et ne permet pas de faire apparaître la période de stabilisation comme le fait la représentation cartésienne (fig.II.5).

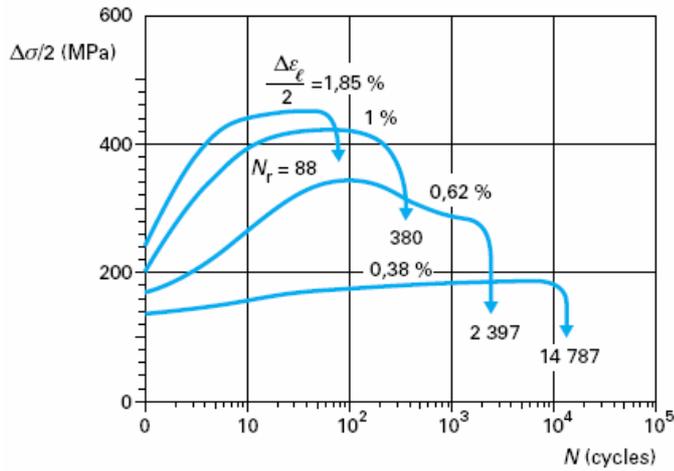
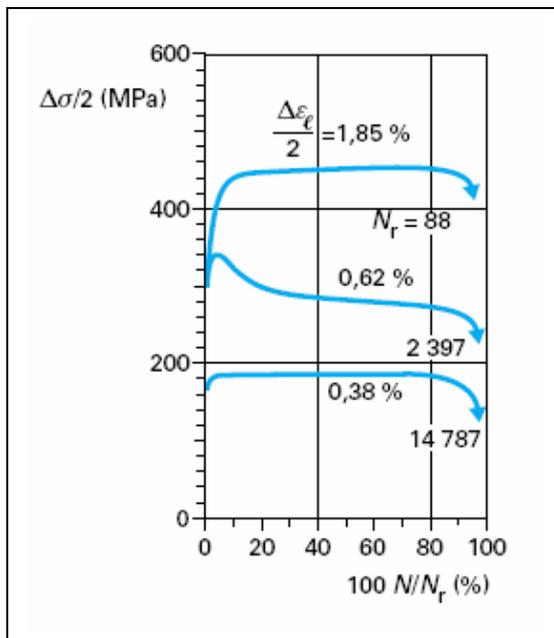


Fig.II.4: Evolution de la contrainte en fonction du nombre de cycles pour un acier 316L (Z 2 CND 17-12) à 450°C (Echelle logarithmique)



$\Delta\varepsilon_\ell$  : Déformation longitudinale  
 $N_r$  : nombre de cycles à rupture  
 $\frac{N}{N_r}$   
 $100 \frac{N}{N_r}$  : pourcentage de la durée de vie

fig.II.5: Evolution de la contrainte en fonction du nombre de cycles pour un acier 316L à 450°C (Echelle linéaire)

Dans le cas de non stabilisation du niveau de contrainte, on peut tracer la courbe cyclique correspondant aux cycles pris à la demi-durée de vie des éprouvettes.

La consolidation cyclique est parfois très spectaculaire. Les contraintes atteintes dépassent souvent largement la résistance à la traction du métal. Ce qui a été dit pour les essais à déformation contrôlée s'applique aussi aux essais alternés à effort contrôlé.

### II.2.2.2) relations contraintes-déformations :

Si l'on enregistre l'effort ou la contrainte en fonction de la déformation on obtient des boucles qui évoluent et se stabilisent dans les cas où le régime stable existe. La figure (II.6) illustre le cas de la consolidation et la figure (II. 7) illustre le cas de l'adoucissement d'un acier 316L

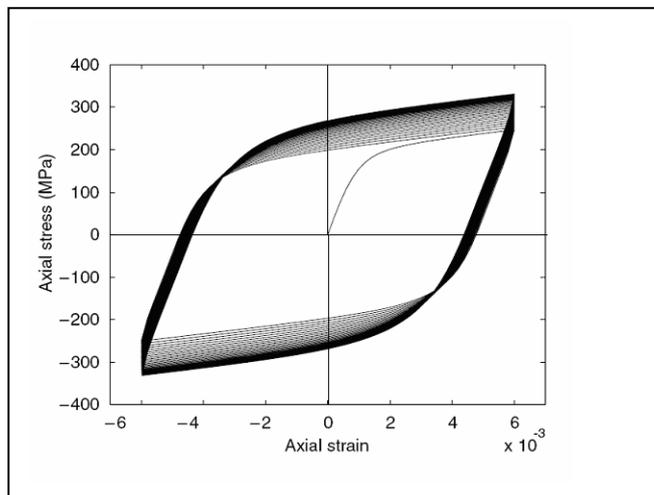
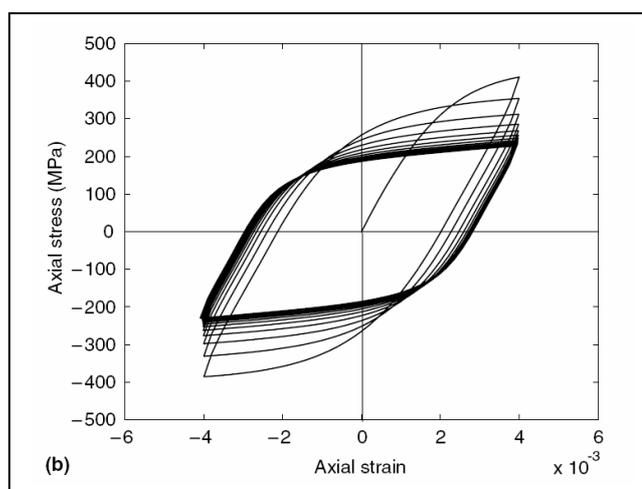


Fig.II.6:Consolidation cyclique : acier AISI 316L à 20°

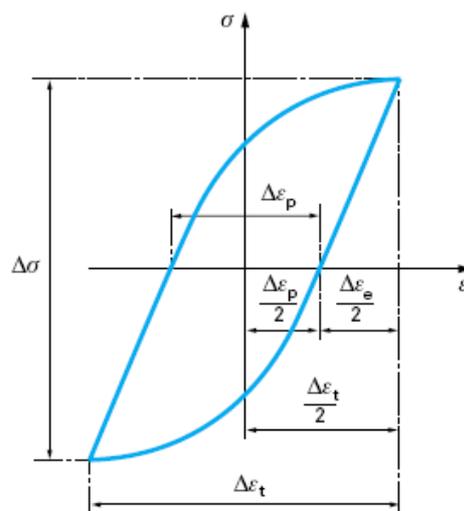


FigII.7 : Adoucissement cyclique : acier AISI 316L à 20°C

La figure II.8 montre comment se schématise la boucle d'hystérésis contrainte-déformation stable ainsi que les notations des différentes grandeurs.

On constate que la variation de déformation totale imposés  $\Delta\varepsilon_t$  se décompose en une partie plastique  $\Delta\varepsilon_p$  et une partie élastique  $\Delta\varepsilon_e$ . Le début de la montée ou de la descente en charge est linéaire et de pente est égale au module de Young E.

La déformation élastique peut être aisément estimée :  $\Delta\varepsilon_e = \frac{\Delta\sigma}{E}$ . Très souvent, on constate que la linéarité de la relation effort-déformation est très réduite. Ceci illustre que la limite d'élasticité en compression après un cycle de traction ou l'inverse est sensiblement réduite : c'est l'effet **Baushinger**.



- $\Delta\varepsilon_e$  amplitude de déformation élastique
- $\Delta\varepsilon_p$  amplitude de déformation plastique
- $\Delta\varepsilon_t$  amplitude de déformation totale
- $\Delta\sigma$  amplitude de variation de la contrainte

Fig.II.8: Définition relatives à la boucle d'hystérésis contrainte-déformation

Quand l'état stabilisé existe on peut tracer la courbe qui représente la contrainte stabilisée en fonction de la déformation stabilisée. Ceci est illustré sur la fig.II.9

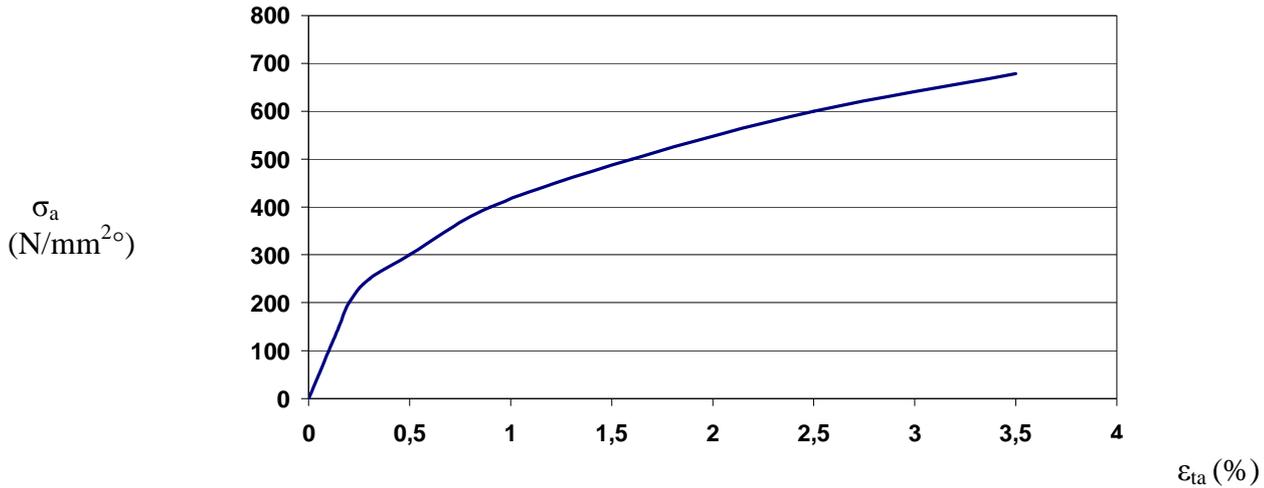


Fig (II.9): courbe de consolidation cyclique : acier 316L à 20°C

La courbe ainsi obtenue, lieu des sommets des cycles stabilisés, est appelée courbe de consolidation cyclique qu'il faut bien distinguer de la relation contrainte-déformation au cours d'un cycle.

Pour obtenir cette courbe de consolidation cyclique, deux importantes techniques sont proposées :

- à partir de plusieurs éprouvettes en essai à déformation constante (fig.II.10)
- à partir d'une éprouvette en commençant par une amplitude de déformation faible, en attendant la stabilisation puis en choisissant un niveau de déformation supérieure, etc. (fig.II.11)

Dans certains cas il y a bon accord entre les 2 méthodes parfois non.

Il semble que la première méthode soit la meilleure. la seconde peut être perturbée pour les grandes déformations en raison du début de la rupture mais elle est plus réaliste.

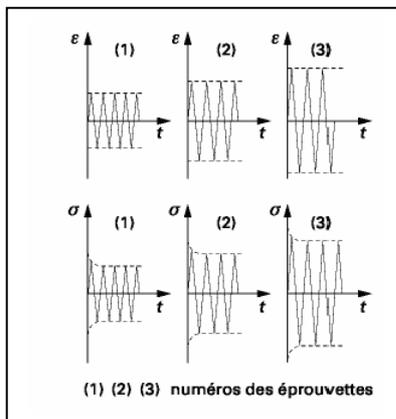
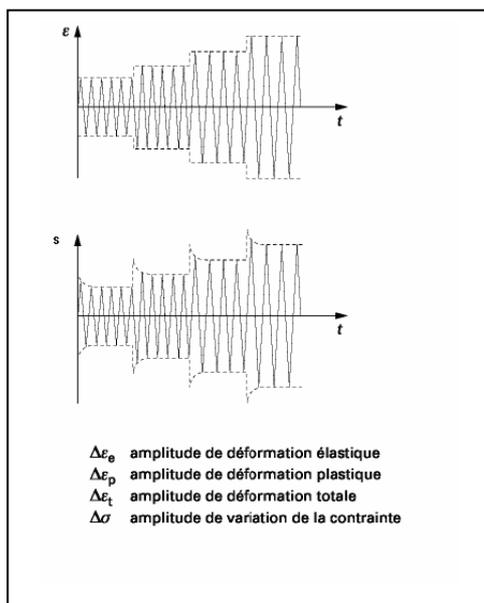


Fig.II.10: Détermination de la courbe de consolidation cyclique par la méthode utilisant une éprouvette par niveau de déformation imposé

Fig.II .11 : Détermination de la courbe de consolidation cyclique par la méthode des paliers successifs avec une même éprouvette



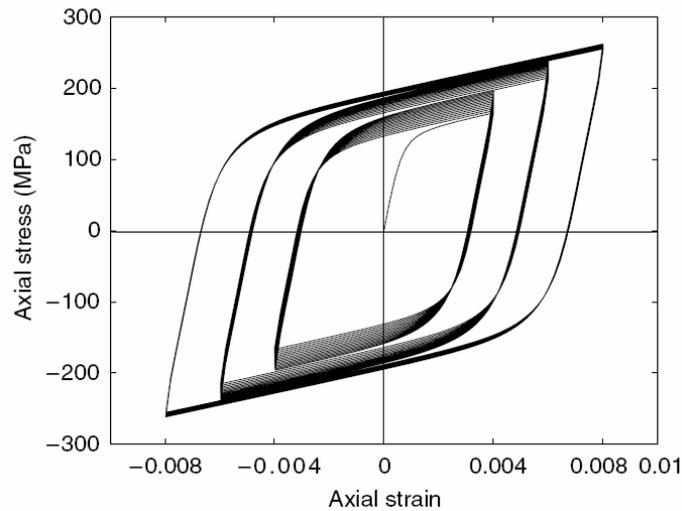


Fig.II.12 : Détermination de la courbe de traction cyclique par la méthode des incréments de déformation

### II.2.2.3) Influence d'un écrouissage préalable [13]

Des essais en contrainte alternée réalisés sur éprouvettes pré écrouies ( prédéformations de 1 à 50 %), mettent en évidence l'influence très prononcée de l'écrouissage sur le comportement cyclique et la durée de vie.

Les contraintes et déformations sont mesurées en tenant compte de la variation de géométrie de l'éprouvette (contrainte vraie et de la déformation vraie).

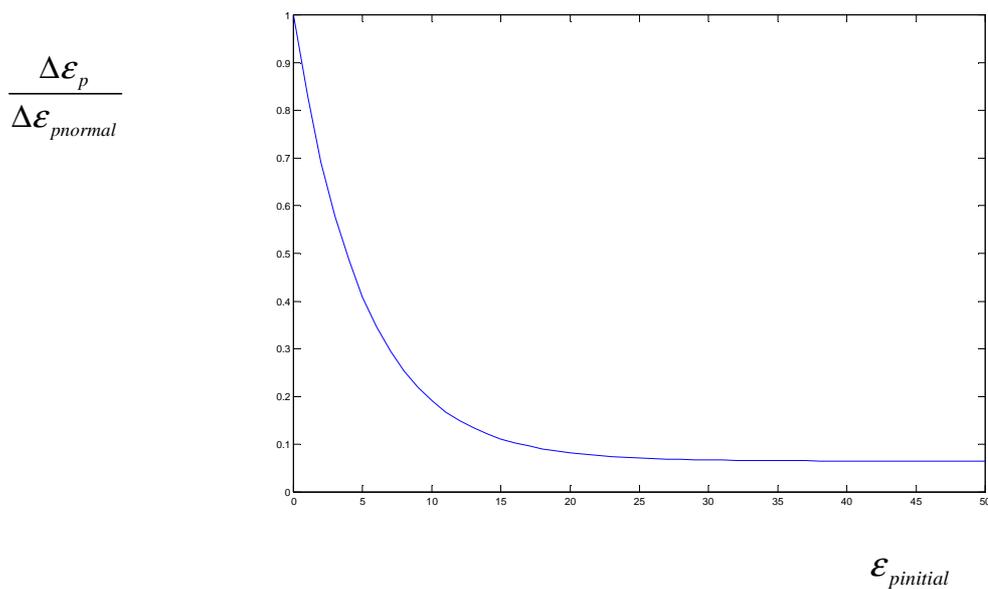


Fig.II.13 : Influence de l'écroissage initial sur l'amplitude de déformation plastique au cycle stabilisé (acier 316L) .

Alors que l'amplitude de déformation plastique au cycle stabilisé est très fortement réduite (fig.II.13).On constate une augmentation très prononcée du nombre de cycles à rupture d'autant que l'écroissage préalable est plus important (fig.II.14).

Il est clair que qu'il s'agit d'une manifestation liée à un effet de mémorisation de l'écroissage ; les boucles d'hystérésis stabilisées montrent en effet un très fort durcissement puisque les amplitudes de déformation plastique au cycle stabilisé sont beaucoup plus faibles que dans le cycle de base (figII.13)

Mais pour un préécrouissage de 30, 40,50%, l'amplitude de déformation plastique stabilisée est approximativement constante alors que la durée de vie continue à augmenter sensiblement

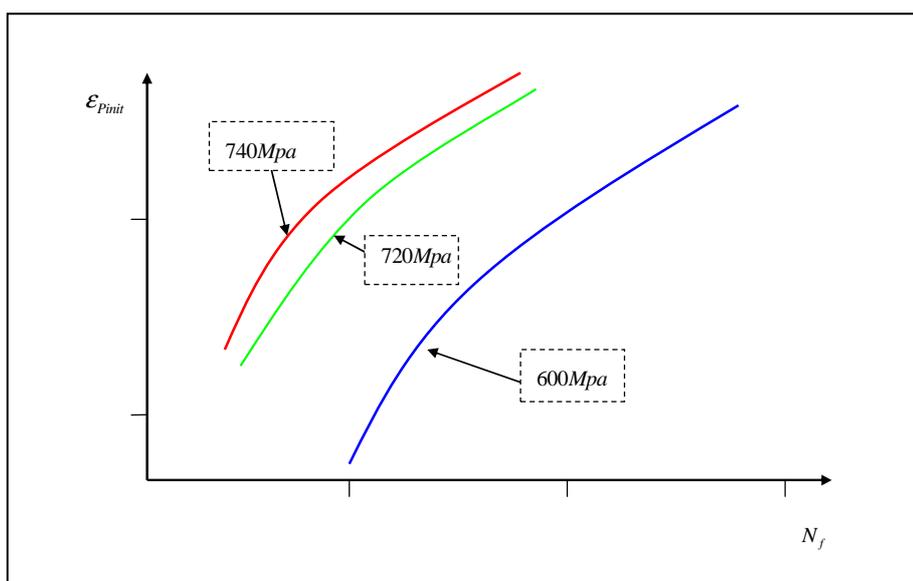


Fig.II.15. Influence de l'écroissage initial sur la durée de vie en fatigue à contrainte imposée (acier 316L) [13]

$\epsilon_{Pinit}$	$N_f$
5	39140
10	61440
20	281200
30	639500
40	828900

Tableau (II.1) : essai de fatigue à contrainte imposée de 600 Mpa sur le 316L à 20°C avec précrouissage [13]

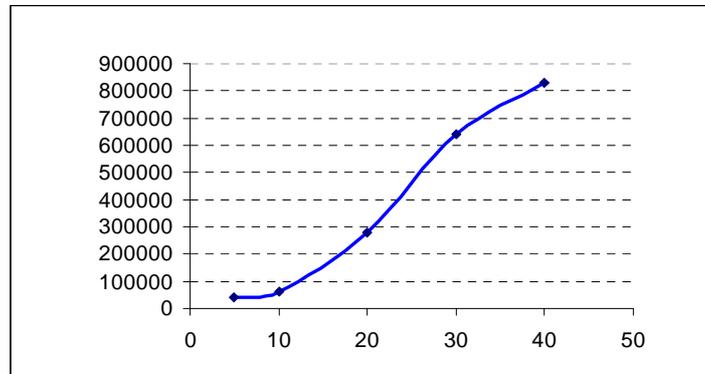


Fig. .II.16. nombre de cycle à rupture en fonction de la déformation initial (316L à 20°C et contrainte imposé à 600Mpa)

### II. 3) Loi d'écoulement et écrouissage :

L'évolution de la limite d'élasticité est un point très important à préciser puisqu'elle permet de définir le modèle d'écrouissage cyclique qui peut être introduit dans des calculs :

On distingue deux grands modèles:

- ❖ **l'écrouissage isotrope** : la limite d'élasticité croit dans les deux directions de traction et compression.
- ❖ **l'écrouissage cinématique**: la limite d'élasticité en traction compression reste constante et égale à celle du matériau vierge.

#### II .3.1) surface de charge:

La surface de charge est définie comme étant l'ensemble des points représentant la limite d'élasticité dans l'espace des contraintes :

#### II.3.2) Loi à écrouissage isotrope [6], [14]:

C'est la loi dans laquelle la surface de charge est gouvernée par une seule variable scalaire : soit le travail plastique dissipé ( $w_p$ ), soit la déformation plastique cumulée ( $P$ ) ou toute variable associée  $R$ .

Pour simplifier l'écriture ces lois sont développées en supposant la température constante. L'hypothèse d'isotropie de l'écrouissage facilite grandement l'écriture des lois d'écoulement : que l'on utilise la déformation plastique cumulée ou le travail plastique cumulé, il est facile d'identifier le modèle d'écrouissage avec toute expression de la courbe de traction monotone.

Les seules différences porteront soit sur le critère choisi pour la fonction de charge, soit sur l'expression de la dissipation.

La fonction de charge s'exprime sous la forme :  $f = f_y(\sigma) - \Gamma(R)$

$f_y(\sigma)$  : Indique la forme du critère de la limite d'élasticité

$\Gamma(R)$  : introduit l'écrouissage.

Dans le cas du matériau isotrope (domaine d'élasticité initialement isotrope) la fonction  $f_y$  fait intervenir des invariants du tenseur des contraintes. L'écrouissage isotrope correspond à une dilatation simple du critère initiale.

La figure II.17 indique schématiquement l'évolution du critère dans l'espace des contraintes et la courbe contrainte-déformation plastique en traction-compression. Elle montre aussi pourquoi la déformation plastique cumulée peut être employée comme variable de l'écrouissage isotrope : les points  $M'$  et  $M$  ont même état et même déformation cumulée :  $OI+IP=OI+IP'$  : la courbe de compression succédant à une traction dans un essai d'écrouissage de déduit de la courbe de traction monotone par une homothétie de rapport -1 et de centre I (point à contrainte nulle)

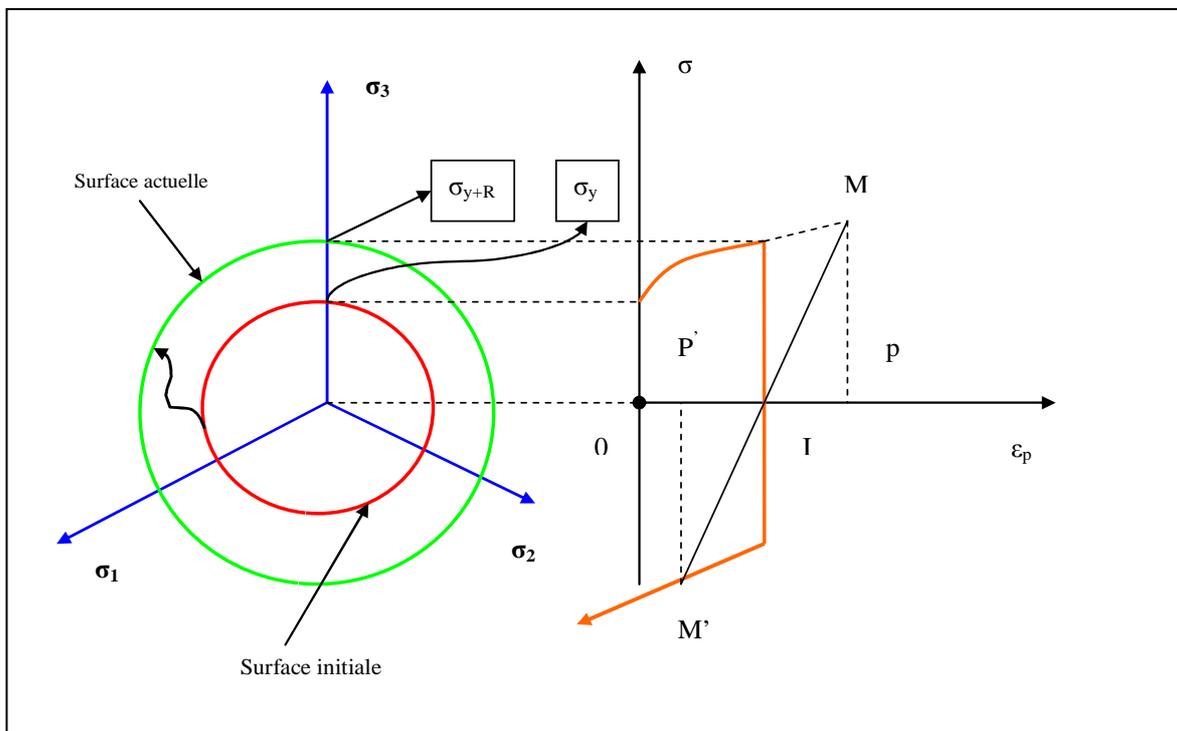


Fig .II.17 : Ecrouissage isotrope : représentation dans l'espace des contraintes et en traction - compression

### II.3.3) Loi à écrouissage cinématique linéaire :

Une schématisation très utile de l'écroutissage anisotrope est l'écroutissage cinématique linéaire pour lequel le domaine d'élasticité garde une amplitude constante mais se déplace par translation dans l'espace des contraintes. La variable d'écroutissage  $\mathbf{X}$  est de nature tensorielle ; elle indique la position actuelle de la surface de charge :  $f = f_y(\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) - k$

La figure.II.18 montre schématiquement le mouvement de cette surface dans l'espace des contraintes et la modélisation correspondante en traction-compression dans le diagramme contrainte-déformation. La valeur de la limite d'élasticité  $k$  est généralement différente de celle de  $\sigma_y$  utilisée précédemment.

On considère généralement l'isotropie autour de l'état neutre représenté par  $\mathbf{X}$ . et on suppose que les déformations plastiques s'effectuent à volume constant. La courbe de compression unidimensionnelle se déduit de la nouvelle courbe de traction par une homothétie de rapport -1 et de centre  $\mathbf{X}$ .

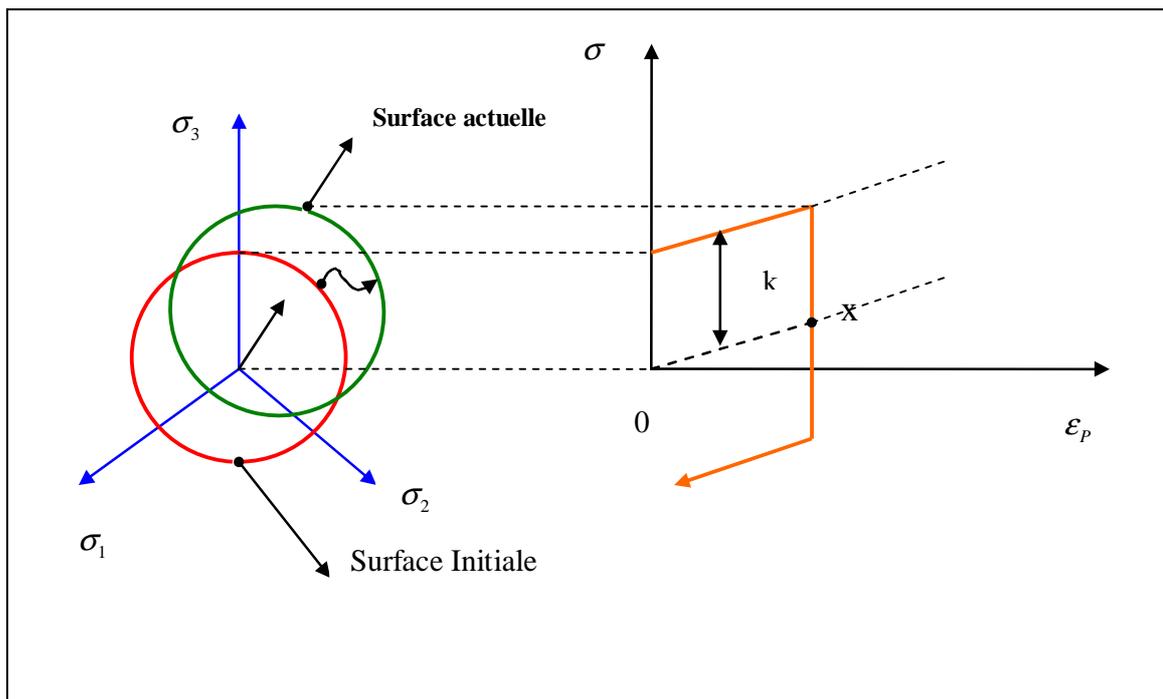


Fig.II.18 : Ecroutissage cinématique : représentation dans l'espace des contraintes et en traction -compression

La réalité pour la plupart des matériaux est intermédiaire entre les deux comportements (écroutissage combiné).

# ***CHAPITRE III***

# **III) AMORÇAGE DES FISSURES EN FATIGUE ET ENDOMAGEMENT :**

## **III .A) L'AMORÇAGE DES FISSURES EN FATIGUE**

### **III.A.1) introduction :**

La prévision précise du comportement en fatigue des pièces mécaniques demande de pouvoir apprécier le nombre de cycles précédent l'amorçage dans une zone de concentration de contraintes, ou un défaut de fabrication .dans de nombreux cas pratiques, le stade d'amorçage peut être très important (jusqu'à 90% de la vie d'une pièce) .

L'expérience montre qu'en générale l'amorçage des fissures résulte de la concentration de déformation plastique qui se produit dans un petit domaine de dimension finie.

Du point de vue pratique, il faut chercher à relier le nombre de cycles nécessaires à un amorçage macroscopique, aux conditions d'emploi (charges appliquées) pour pouvoir calculer le nombre de cycles à rupture.

### **III.A.2) Mécanismes physiques de l'amorçage :**

#### **III .A.2.1) Rappel des trois stades de la ruine par fatigue**

Lorsqu'une éprouvette ou une pièce donne lieu à une rupture par fatigue, sa vie peut être décomposée en trois parties :

Amorçage d'une fissure,

Propagation lente de cette fissure,

Propagation brutale conduisant à la rupture.

#### **a) définition de l'amorçage :**

La définition de l'amorçage peut être différente suivant que l'on s'intéresse à l'évolution microstructurale du matériau ou que l'on s'intéresse à l'apparition d'une microfissure. Pour évaluer le stade d'amorçage dans une structure, on se réfère de préférence à une notion de microfissure. Mais cette notion elle-même dépend directement de la résolution du moyen d'observation utilisé .aussi, en l'absence d'un accord général sur la

définition de l'amorçage, différents auteurs définissent le nombre de cycles d'amorçage  $N_a$  pour une longueur  $a_0$  de l'ordre de 0.1mm. En effet, cette dimension peut être détectée assez facilement .elle correspond par ailleurs à une taille de défaut comparable à taille du grain de nombreux aciers. Enfin, l'expérience enseigne que dans bon nombre de cas, dès qu'une fissure atteint une profondeur voisine de cette dimension, elle se propage régulièrement à travers la section [11].

### **b) Importance relative des stades d'amorçage et de propagation.**

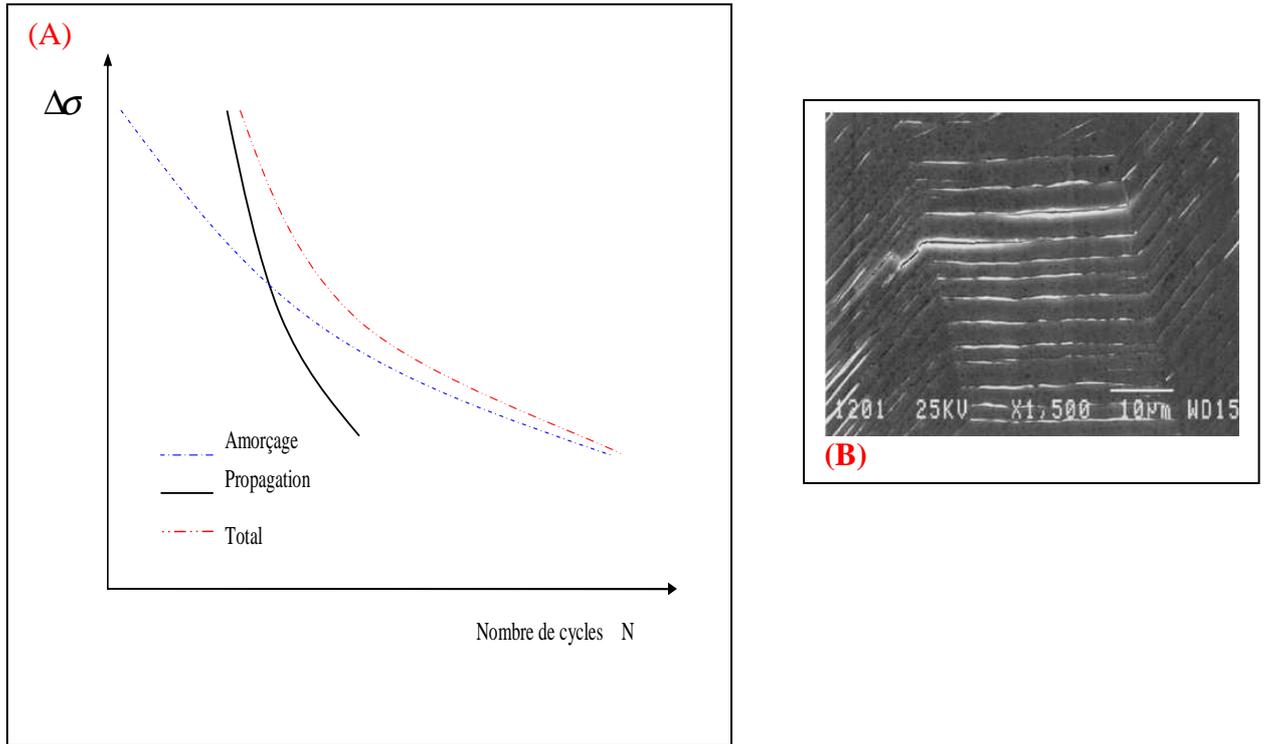
Les essais classiques de fatigue (courbe S-N donnant la contrainte ou la déformation en fonction du nombre de cycles à rupture  $N_r$  ) donnent une information globale sur l'endurance d'un matériau (amorçage+propagation +rupture).

De tels essais permettent de porter des jugements qualitatifs quant au choix des matériaux, Mais s'avèrent parfois d'un usage difficile pour leur application quantitative à une structure.

L'importance relative des stades d'amorçage et de propagation dépend de l'amplitude de la sollicitation, de la géométrie de la pièce, de la nature du matériau, de la température, du chargement antérieur et de l'environnement.

Le rapport  $\frac{N_a}{N_r}$  diminue lorsque la contrainte (ou la déformation) alternée augmente, de sorte que dans le domaine des très faibles nombres de cycles, la phase de propagation occupe la majeure partie de la durée de vie .de plus, le nombre de sites d'amorçage augmente lorsque la contrainte (ou la déformation) augmente.

Lorsque l'on introduit une concentration de contrainte (entaille, par exemple), on réduit le rapport



**Fig.3.1 : (A) Courbe schématique « contrainte-nombre de cycles » donnant les durées d’amorçage et de propagation [6]**

**(B) : microfissures trangranulaires (acier 316L :  $\Delta\varepsilon_p = 4 \times 10^{-3}$ , 5000 cycles)**

En général, les microfissures apparaissent plus rapidement dans les matériaux ductiles. Lorsque l’on fait subir à un matériau un écrouissage superficiel, introduisant des contraintes résiduelles de compression, on augmente la phase d’amorçage

### III.A.2.2) influence du niveau de déformation

L’évolution du phénomène d’endommagement par fatigue est généralement observée par microscopie, sur une éprouvette lisse, sans accident de forme notable.

D’une manière générale, l’amorçage des fissures se produit à la surface de l’éprouvette. Plus rarement, l’amorçage peut se développer à cœur, par exemple dans les soudures (œil de poisson) ou sous la peau lorsque des inclusions importantes modifient la répartition des contraintes.

Forsyth [12] justifie l’amorçage des fissures de fatigue à la surface des pièces par trois raisons principales :

Les dislocations sont plus mobiles à la surface qu’à cœur

La surface est un site préférentiel pour la génération des dislocations

Enfin, la surface est soumise à l'agressivité de l'environnement

#### **a) domaine des très faibles déformations**

Les sollicitations inférieures à la limite d'endurance se caractérisent par le fait que les mouvements des dislocations et les glissements sont parfaitement réversibles : il ne y'a ni blocage, ni réarrangement des dislocations ; la structure n'est pas modifiée de façon irréversible.

#### **b) domaine de l'endurance :**

L'application de contraintes cycliques voisine de la limite d'endurance produit, après un certain nombre de cycles, dans quelques grains, des bandes de glissement qui sont observables sur des surfaces polies. Ces bandes ont été observées dans beaucoup de métaux et d'alliages comportant une phase principale.

Dans certains métaux, les bandes de glissement conduisent à l'apparition de microfissures par les mécanismes des intrusions extrusions. En effet, l'atmosphère réagit avec les surfaces fraîches des plans de glissements qui dépassent la surface et empêche la réversibilité de leur mouvement de va-et-vient, d'où un endommagement du métal.

L'amorçage des fissures dépend de la qualité, de la taille, de la nature et de la répartition des inclusions, ainsi que de leur forme par rapport à la direction des efforts.

#### **c) Domaine des fortes déformations :**

L'amorçage des fissures dans le domaine des déformations fait intervenir à l'échelle des mécanismes comparables à ceux décrits dans le paragraphe précédent .dans ce cas toutefois, la formation des microfissures se produit beaucoup plus rapidement et les sites d'amorçage sont nettement plus nombreux.

### **III.A.3) influence de la dureté sur la durée de vie [6]**

Comme nous l'avons indiqué, les méthodes classiques d'analyse permettent de déterminer la courbe donnant le nombre de cycles à rupture en fonction de la contrainte ou de la

déformation nominale appliquée (pour un type de sollicitation donné) sur laquelle on distingue généralement 3 domaines :

- une zone de fatigue oligocyclique
- une zone de fatigue ou d'endurance limitée
- une zone d'endurance illimitée

Dans le cas de la fatigue à grand nombre de cycles, la limite d'endurance peut être assimilée à la sollicitation minimale qui conduit à l'amorçage d'une fissure.

Cette estimation donne une valeur par excès, car on constate dans certains cas qu'une contrainte inférieure à la limite d'endurance peut amorcer des fissures qui ne propagent pas. néanmoins, cette propriété suffit en elle-même pour caractériser les matériaux, vis-à-vis de l'amorçage aux grands nombres de cycles.

D'après l'évaluation de la limite d'endurance sur de nombreux matériaux, on peut relier directement la résistance à l'amorçage des fissures (aux grands nombres de cycles à la résistance mécanique du matériau, et plus à la résistance à la traction conventionnelle  $R_M$ . bien qu'il existe de nombreux facteurs qui affectent la limite d'endurance d'un matériau, (état de surface, géométrie, spectre de chargement, etc. ), il apparaît que la résistance à l'amorçage des fissures, dans le domaine des grands nombres de cycles, est directement reliée à la résistance mécanique du matériau.

Alors que pour les nombres de cycles élevés ( $N > 10^6$ ), la résistance à la fatigue dépend essentiellement du niveau de dureté du matériau, pour les nombres de cycles intermédiaires et faibles, la ductilité devient un facteur prédominant.

Pour les fortes déformations, l'acier dur présente une mauvaise résistance à la fatigue du fait de sa faible ductilité, tandis que pour les faibles déformations, il a une meilleure résistance. On observe un résultat inverse pour l'acier doux, l'acier mi-dur ayant un comportement intermédiaire.

Ceci est schématisé sur les figures 3.1 qui donnent une comparaison d'un acier doux, mi-dur et dur.

On peut conclure que la résistance à l'amorçage en fatigue oligocyclique dépend à la fois de la ductilité et de la résistance du matériau, cependant, ces données ne fournissent pas une mesure quantitative de l'amorçage car elles ne font pas apparaître les phases d'amorçage et de propagation.

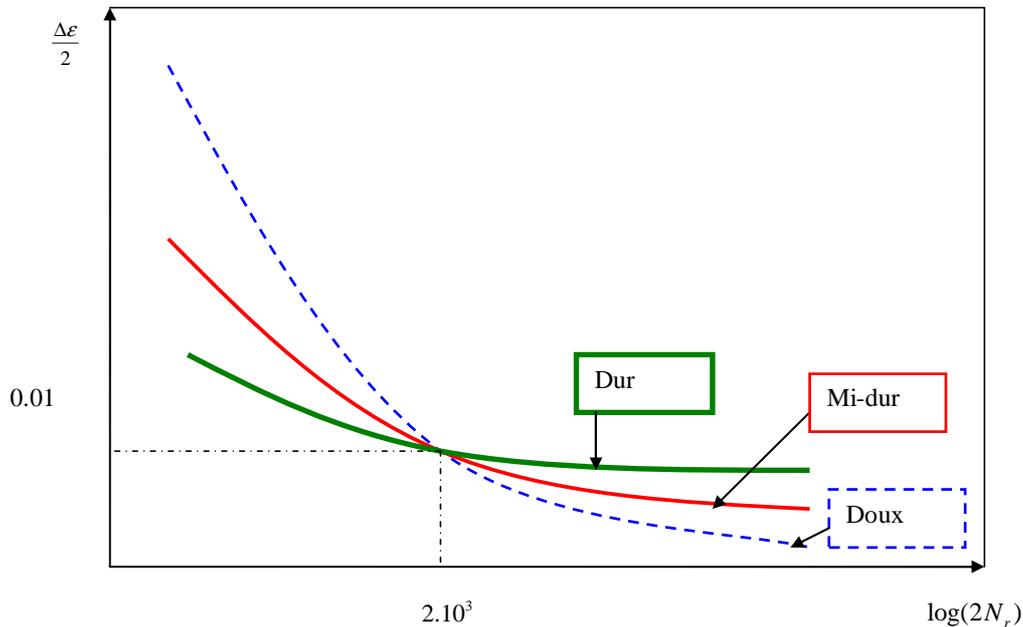


Fig.3.2. Variation de l'amplitude de la déformation en fonction du nombre de cycles à rupture

### III .B) ENDOMMAGEMENT

#### III.B.1) mesure de la variable endommagement [13] :

La mesure des dommages constitue encore un domaine très ouvert et controversé en raison des différentes échelles auxquelles on peut se placer et des usages que l'on veut faire de ce dommage .en se limitant au cas de l'élément de volume isolé (éprouvette de traction compression) on distingue ainsi :

- les mesures à l'échelle de la microstructure (densité de trous ou de microfissures, surfaces des défauts, etc.) qui peuvent être utilisées directement pour une analyse mécanique permettant de proposer des modèles physiques
- les mesures physiques globales (densité, résistivité, vitesse du son, etc.) qui nécessitent encore la définition d'un modèle pour passer à des caractéristiques liées à la résistance mécanique.

- Un autre type de mesure de l'endommagement est lié à la durée de vie restante mais ,de même que la mesure par la variation de la limite de fatigue,cette approche nécessite un grand nombre nombre d'essais jusqu'à rupture .
- *Les mesures mécaniques globales (modules d'élasticité, vitesse de déformation en fluage, amplitudes de déformation plastique en fluage, pour lesquelles la notion de contraintes effectives permet une interprétation aisée en termes d'endommagement.*

### III .B.2) Variable d'endommagement [14]:

Considérons un solide endommagé dans lequel on a isolé un élément de volume fini d'une taille suffisamment grande par rapport aux hétérogénéités du milieu et ,par la pensée grossissons cet élément fig. (5.1)

Soit  $S$  l'aire d'une section de l'élément de volume repérée par sa normale  $\vec{n}$  .dans cette section ,les fissures et cavités qui constituent le dommage laissent des traces de formes diverses .soit  $\tilde{S}$  l'aire résistante effective ( $\tilde{S} < S$ ) tenant compte de l'aire de ces traces ,des concentrations de contraintes au voisinage des discontinuités géométriques et des interactions entre défauts voisins et soit  $S_D = S - \tilde{S}$

$S_D$  est l'aire totale de l'ensemble des traces des défauts .par définition  $D_n = \frac{S_D}{S}$  est la mesure mécanique de l'endommagement local relativement à la direction  $\vec{n}$

D'un point de vue physique la variable endommagement  $D_n$  est donc l'aire relative (corrigée) des discontinuités de la matière dans le plan normal à  $\vec{n}$  .

$D_n = 0$  Correspond à l'état non endommagé ou vierge

$D_n = 1$  Correspond à l'élément de volume rompu en deux parties selon le plan normale à  $\vec{n}$  .

$0 \leq D_n \leq 1$ : caractérise l'état d'endommagement.

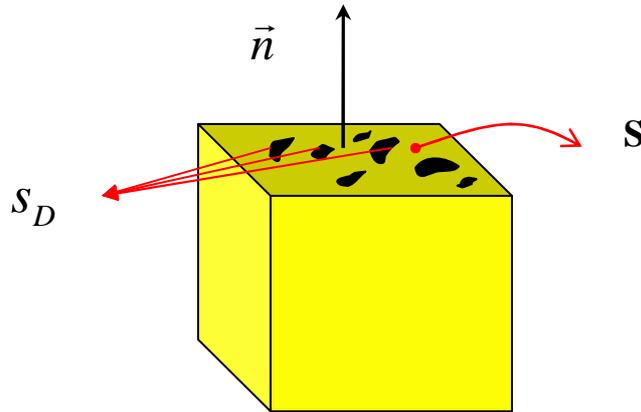


Fig. 3.3.élément endommagé

### III .B.3) Contrainte effective :

#### III.B.3.1) définition [14]

L'introduction d'une variable endommagement représentant une densité surfacique de discontinuités de la matière conduit directement à la notion de contrainte effective, c'est-à-dire la contrainte rapportée à la section qui résiste effectivement aux efforts. Dans le cas unidimensionnel, si  $F$  est la force appliquée sur une section  $S$  de l'élément de volume représentatif,  $\sigma = \frac{F}{S}$  est la contrainte usuelle qui satisfait les équations d'équilibre. En

présence d'un endommagement isotrope de mesure  $D$ , la section résistante effective est :

$\tilde{S} = S - S_D = S(1 - D)$  et la contrainte effective est :

$$\tilde{\sigma} = \sigma \frac{S}{\tilde{S}} = \frac{\sigma}{1 - D} \dots (III .1)$$

On a évidemment  $\tilde{\sigma} \geq \sigma$

$\tilde{\sigma} = \sigma$  : Pour un matériau vierge

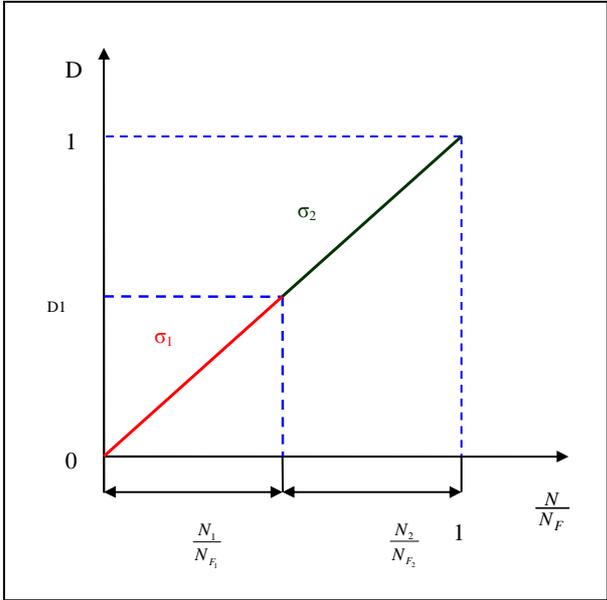
$\tilde{\sigma} \rightarrow \infty$  : Au moment de la rupture

#### III.B.3.2) Cumul linéaire et non linéaire :

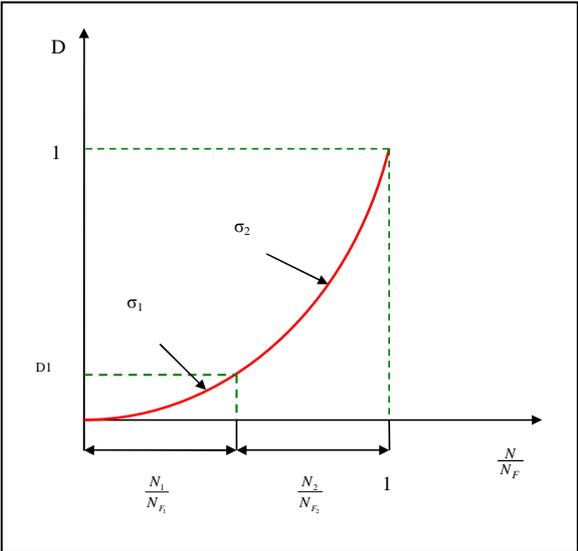
Les effets de cumulation linéaire ou non linéaire sont d'une grande importance en fatigue. la règle linéaire de Palmgreen-Miner suppose que les dommages se cumulent de façon additive lorsqu'on les définit par le facteur d'usage associé  $\frac{N_i}{N_{Fi}}$  où  $N_i$  est

le nombre de cycles effectués avec un chargement périodique donné pour lequel le nombre de cycles à rupture serait  $N_{Fi}$ , la condition de rupture s'écrit:

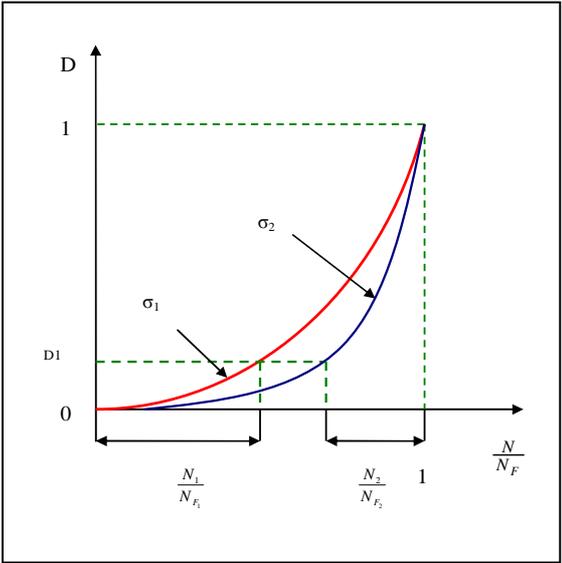
$$\sum_i D_i = \sum_i \frac{N_i}{N_{Fi}} = 1 \dots (III.2)$$



(a)



(b)



(c)

Fig.III.3 : évolution de dommage

La règle de cumulation linéaire s'applique aussi pour une évolution de dommage non linéaire

(fig. .III.3.b), dans ce cas on a la relation: 
$$\delta D = \left( \frac{(1-D)^{-k}}{k+1} \right) \left( \frac{\delta N}{N_F(\dots)} \right) \dots \text{ (III .3)}$$

L'effet de cumul non linéaire existe si les courbes d'évolution du dommage en fonction du facteur d'usage  $\frac{N}{N_F}$  dépendent du chargement imposé comme le montre la fig.III .3.3

.D<sub>1</sub> représente l'état interne d'endommagement à la fin du 1<sup>er</sup> niveau  $\sigma_1$ .l'évolution se poursuit au 2<sup>ème</sup> niveau à partir du même état, la somme des fractions de vie est <1.dans ce cas les variables décrivant le chargement et la variable D sont pas séparable.

### III.B.3.3) principe d'équivalence en déformation [13]:

On suppose que le comportement à la déformation de la matière n'est affecté par l'endommagement que sous la seule forme de la contrainte effective :

Tout comportement à la déformation, unidimensionnel ou tridimensionnel, d'un matériau endommagé est traduit par les lois de comportement du matériau vierge dans lesquelles dans les quelles on remplace la contrainte usuelle par la contrainte effective.

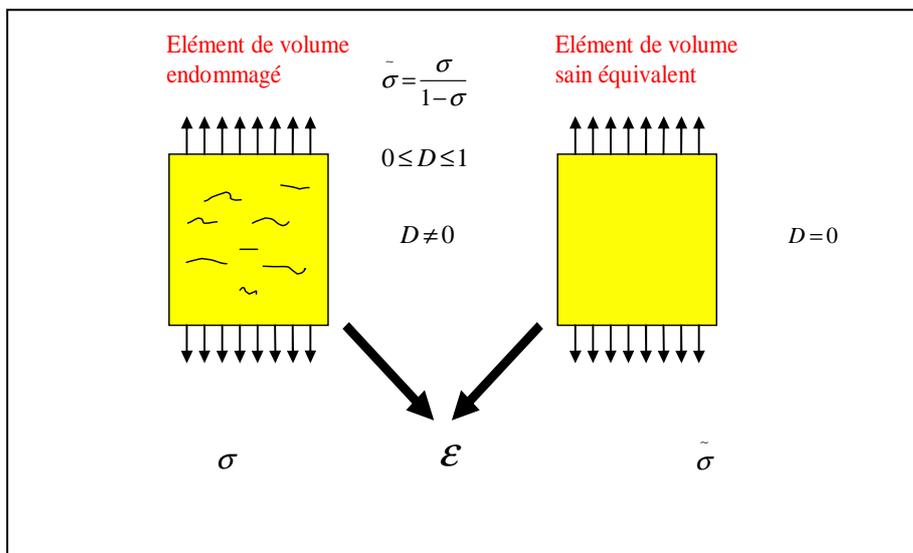


Fig.3.4

Cette définition du dommage en termes de contrainte effective (ou de section efficace dans le cas de l'éprouvette de traction) a permis de développer des modèles d'évolution du dommage en fluage, en fatigue pure ou en fatigue -fluage combiné

Dans notre étude on a affaire à la fatigue pure, la loi d'évolution à une forme différentielle en cycles qui dans le cas de la traction-compression s'écrit :  $dD = f(\sigma_M, \bar{\sigma}, D)dN \dots$  (III .4)

Où  $\sigma_M$  et  $\bar{\sigma}$  sont la contrainte maximale et la contrainte moyenne au cours du cycle. Cette équation est à variables non séparables pour permettre la modélisation des effets de la **cumulation non linéaire** des dommages.

### III.B.3.4) la loi d'endommagement en tenant compte de l'écrouissage [13] :

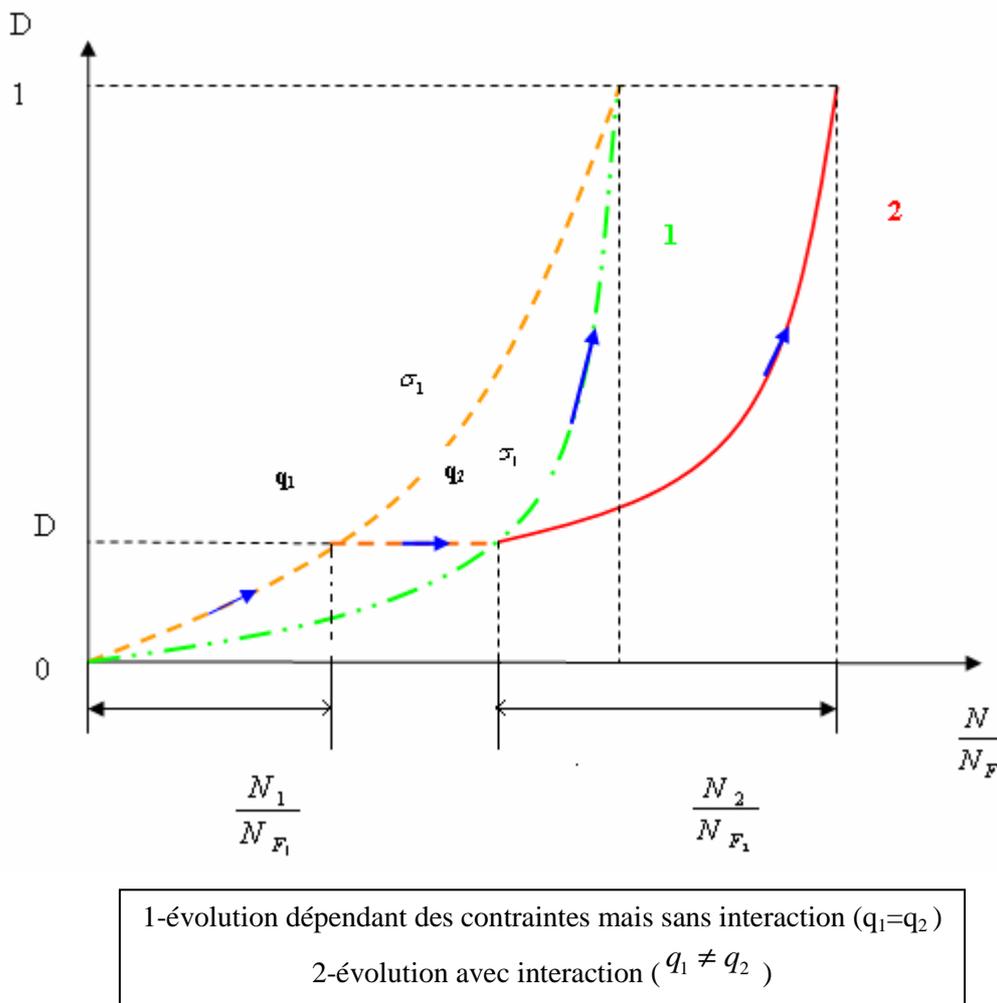


Fig.3.5

Pour tenir compte des effets bénéfiques de l'érouissage **Chaboche** [13] a ajouté la variable  $q$  gardant mémoire de l'amplitude maximale de déformation plastique :

$$dD = g(\sigma, D, q)dN \quad \dots \text{(III .5)}$$

Si les fonctions  $f$  et  $g$  ne sont pas à variables séparables (en  $\sigma$  et  $D$ ), les courbes d'évolution du dommage dans les essais en chargement périodique dépendent de la contrainte appliquée (ou de la déformation)

Avec la variable supplémentaire  $q$ , un même état de dommage pour une même contrainte pourra conduire à une vitesse différente lorsque l'état de dommage actuel résulte de deux histoires de chargements différents ; la figure 3.5 indique schématiquement un tel phénomène, qui correspond à ce qui est souvent appelé une loi avec interaction.

La loi d'endommagement de l'acier 316L [13]:

Une corrélation correcte a été obtenue, Dans le cas sans influence de l'érouissage le modèle est donné par une équation différentielle en cycles:

$$dD = [1 - (1 - D)^{\beta+1}]^{\alpha(\sigma_M, \bar{\sigma})} \left[ \frac{\sigma_M - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})} \right]^{\beta} dN \quad \dots \text{(III .6)}$$

Avec :

$D$  : la variable dommage qui varie entre 0 (condition de matériau vierge) et 1 (valeur limite lors de l'amorçage d'une fissure macroscopique)

$\sigma_M$  : La contrainte maximale au cours d'un cycle

$\bar{\sigma}$  : La contrainte moyenne au cours d'un cycle

En intégrant la relation (5.1) on aura le nombre de cycles correspondant à l'apparition d'une fissure macroscopique :

.... (III .7)

$$N_f = \frac{1}{(\beta+1)(\alpha(\sigma_M, \bar{\sigma}))} \left[ \frac{\sigma_M - \bar{\sigma}}{M(\bar{\sigma})} \right]^{-\beta}$$

$$\alpha(\sigma_M, \bar{\sigma}) = a \left\langle \frac{\sigma - \sigma_l(\bar{\sigma})}{\sigma_u - \sigma_M} \right\rangle, \text{ avec : } \begin{cases} \langle u \rangle = u & \text{si } u > 0 \\ \langle u \rangle = 0 & \text{si } u \leq 0 \end{cases} \dots \text{ (III .8)}$$

$$\sigma_l(\bar{\sigma}) = \bar{\sigma} + \sigma_l \left(1 - b \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_u}\right) \dots \dots \text{ (III .9)}$$

$$M(\bar{\sigma}) = M_0 \left(1 - b \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_u}\right) \dots \text{ (III .10)}$$

$\sigma_u$  : La contrainte de rupture statique ( $R_m$ )

$\sigma_l$  : La limite de fatigue en contrainte à contrainte moyenne nulle.

$\sigma_l(\bar{\sigma})$  : La limite de fatigue exprimée en fonction de la contrainte moyenne (la dépendance linéaire en  $\bar{\sigma}$  est justifiée par de nombreux essais)

**a** et **b** : coefficients dépendant de matériau

**Après étude de diverses hypothèses**, l'influence de l'érouissage initial a été introduite par **Chaboche** sur les coefficients :  $\sigma_u, \sigma_l, M$  les relations ci –dessus deviennent :

$$\alpha(\sigma_M, \bar{\sigma}, q) = a \left\langle \frac{\sigma - \sigma_l(\bar{\sigma}, q)}{\sigma_u(q) - \sigma_M} \right\rangle \dots \text{ (III .11)}$$

$$\sigma_l(\bar{\sigma}, q) = \bar{\sigma} + \sigma_{l0} \left(1 - k_1 \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_u}\right) \left(1 - b \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_{u0}}\right) \dots \text{ (III .12)}$$

$$\sigma_u(q) = \sigma_{u0} (1 + k_2 z(q)) \dots \text{ (III .13)}$$

$$M(q) = M_{u0} (1 + k_3 Z(q)) \dots \text{ (III .14)}$$

$$z(q) = \sqrt{q} \dots \text{ (III .15)}$$

$k_1, k_2, k_3$  : Coefficients

Les valeurs de  $\sigma_{u0}, \sigma_{l0}$  ont été fixées a priori compte tenu de la courbe de Wohler expérimentale.

Le choix de la valeur de  $q$  est effectué de façon différente pour chaque type d'essai en utilisant des fonctions puissance de la contrainte maximale, déterminées à partir des valeurs mesurées de la déformation plastique maximale.

$$q = \Delta \varepsilon_{p1} = \left( \frac{\sigma_M}{813} \right)^{5.5} : \text{Pour les essais en contrainte ou en déformation alternée}$$

Avec  $\Delta \varepsilon_{p1}$  est l'amplitude de déformation plastique au premier cycle.

$$q = \varepsilon_{PM} \left( \frac{N_f}{2} \right) = : \text{Pour les essais en contrainte ou en déformation ondulée}$$

avec  $\varepsilon_{PM}$  est l'amplitude de déformation plastique au premier cycle

$$q = \left( \frac{\sigma_M}{832} \right)^{3.8} : \text{Pour } R_\sigma = -0.485$$

$$q = \left( \frac{\sigma_M}{978} \right)^{3.8} : \text{Pour } R_\sigma = 0 \text{ et } R_\varepsilon = 0$$

**Remarque :**

*Pour les essais avec précrouissage imposé  $q$  est égale à la déformation plastique initiale*

L'acier **316L** a les valeurs suivantes des coefficients :

$$\sigma_{\mu_0} = 580 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{\ell_0} = 222 \text{ Mpa}$$

$$k_1 = 0.4$$

$$k_2 = 2.2$$

$$k_3 = 1.6$$

$$\beta = 5$$

$$M_0 = 1650 \text{ Mpa}$$

$$a = 0.9$$

$$b = 0.25$$

### III.B.3.5) Mise en œuvre numérique :

Dans notre cas on calcule la durée de vie pour chaque nœud : la durée de vie de tube est le MINIMUM de toutes les durées de vie, la contrainte  $\sigma$  utilisé dans les calculs de la durée de

vie est la somme algébrique de la contrainte résiduelle  $\sigma_r$  et de la contrainte appliquée dû au chargement cyclique  $\sigma_{cyclique}$  (voir figure 3.6)

On peut définir la **contrainte résiduelle** comme une tension ou une compression qui existe dans le volume d'un matériau sans application d'un chargement extérieur (force appliquée, gradient de température) elle est due à des **déformation plastique non homogène**.

Différents types de contraintes résiduelles sont définis en fonction de l'échelle utilisée :

- 1) contraintes de premier ordre (macros contraintes) : en prenant quelques grains
- 2) contraintes de deuxième ordre (micros contraintes) : en prenant un seul grain particulier.
- 3) contraintes de troisième ordre (micros contraintes) : en prenant des zones surfaces sub-microscopique c.à.d plusieurs distances inter-atomique dans un grain [15], [16].

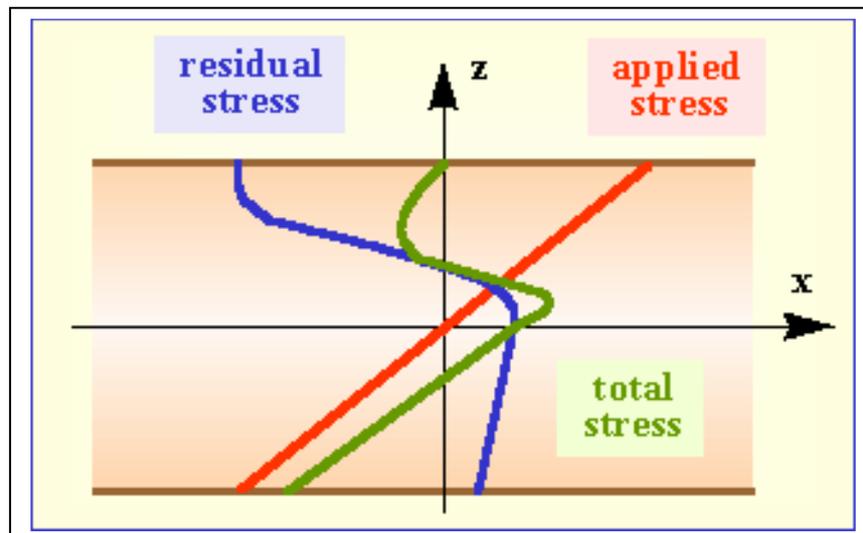
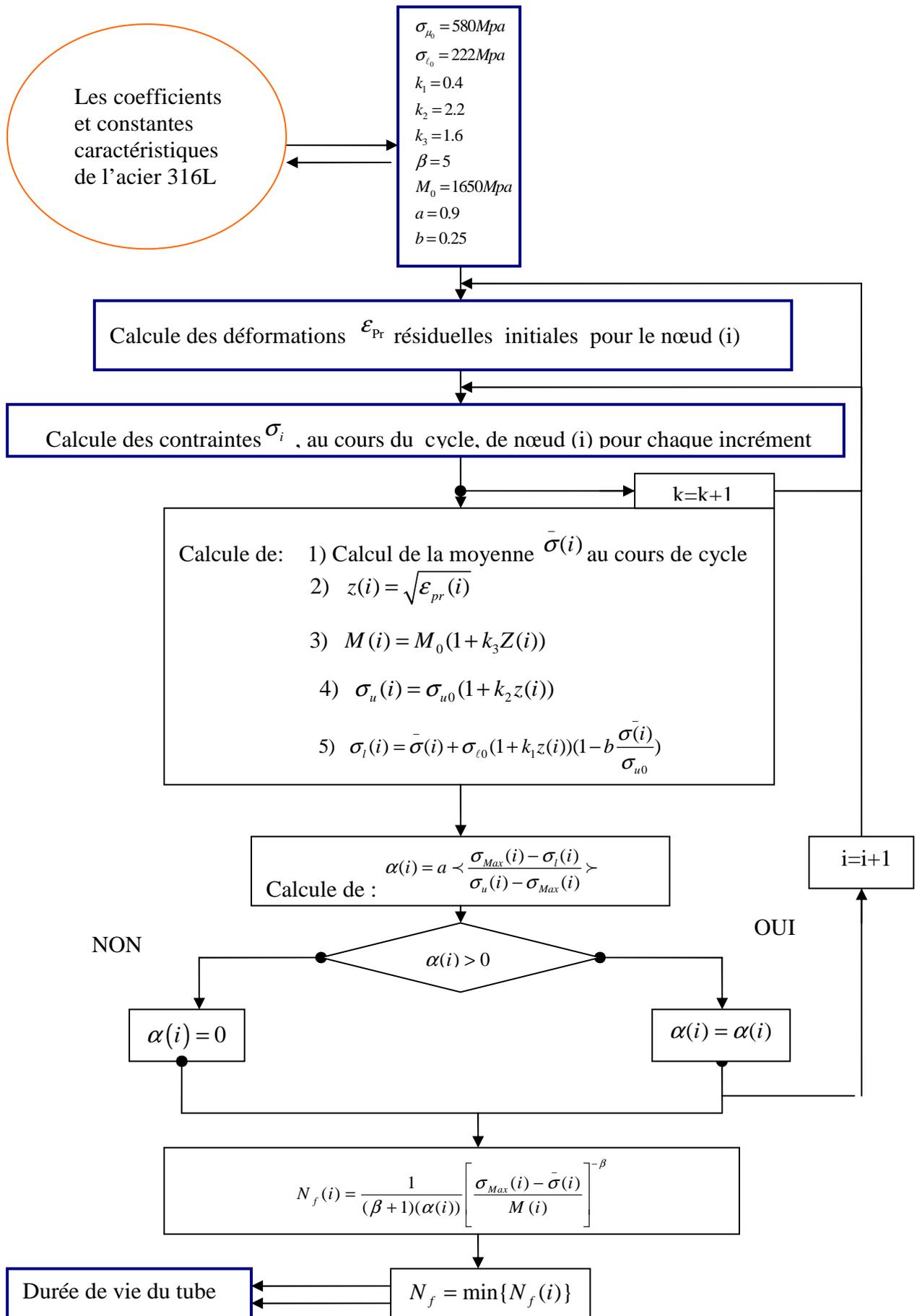


Fig.3.6 :l'influence de la contrainte résiduelle

On peut résumer l'algorithme dans l'organigramme suivant :



# CHAPITRE IV

## IV) PRESENTATION DE LOGICIEL ABAQUS [17]:

### **IV.1) définition:**

ABAQUS est un logiciel complexe de simulation en ingénierie créé en 1978 aux USA, il est basé sur la méthode des éléments finis et peut résoudre les problèmes linéaires les plus simples aux problèmes non linéaires les plus complexes (ABAQUS=Boulter).

ABAQUS renferme une bibliothèque considérable d'éléments qui peuvent moduler pratiquement toutes les géométries, il a également une liste étendue de modèles matériels qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux d'ingénierie (métaux, béton, caoutchouc, composites, polymères) matériaux de la géotechnique (sols, rochers).

Conçu comme un outil de simulation à usage général, ABAQUS peut être utilisé, en plus des problèmes de structures (contrainte/déplacement), à simuler les problèmes de transfert thermique, de diffusion de masse, de mécanique de sol, d'acoustique et les problèmes piézoélectriques.

On a deux types de résolutions (solveurs) :

ABAQUS/Standard : il peut résoudre une grande variété de problèmes comportant la réponse statique, dynamique, thermique et électrique, il résout un système d'équation implicitement à chaque incrément.

ABAQUS/Explicite : il est destiné à des analyses spéciales, il est utilisé pour résoudre des problèmes dynamiques transitoires comme l'explosion et le choc, il utilise une formulation par éléments finis explicite.

### **IV.2) la structure et fonctionnement d'ABAQUS**

Une analyse complète par ABAQUS se fait en 3 étapes :

Prétraitement, simulation, post-traitement (fig.4.1):

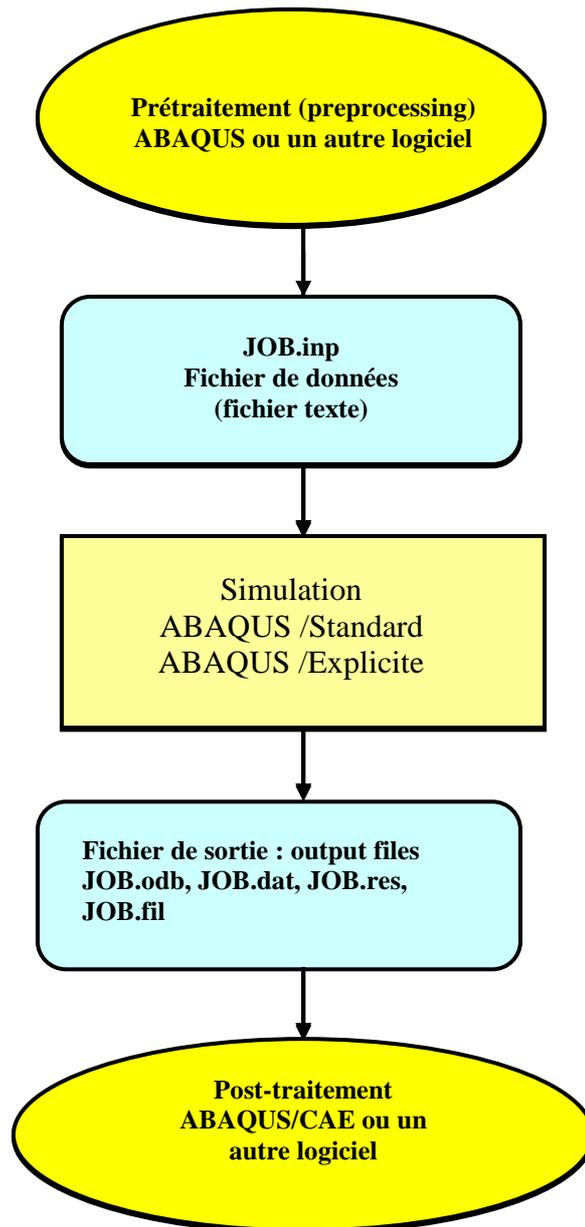


Figure (4.1) : Le fonctionnement d'ABAQUS

#### IV.2.1) Le pré traitement :

Dans ce stade on définit le modèle de problème physique et créer le fichier inp. Le modèle est généralement créé graphiquement en utilisant ABAQUS/CAE ou un autre préprocesseur mais pour un problème simple on peut utiliser un éditeur de texte.

#### IV.2.2) la simulation :

La simulation est le stage où ABAQUS résout le problème numérique défini dans le modèle, les résultats de calculs sont stockés dans des fichiers en code binaire prêts au post-traitement. En fonction de la complexité de problème et la puissance de l'ordinateur utilisé, le temps d'analyse varie de secondes aux jours.

**IV.2.3) Post traitement** : on peut examiner les résultats une fois la simulation complétée, les déplacements (déformations), contraintes ou d'autres variables de calculs. Le module de visualisation qui lit le fichier de sortie de donnée a une variété d'option pour visualiser les résultats (couleurs, animations, la déformée, courbe (x,y)).

### IV.3) Les composantes d'un modèle d'analyse en ABAQUS :

Un modèle en ABAQUS est composé par plusieurs composants qui ensemble décrivent le problème physique à être analysé et les résultats à obtenir.

Le modèle d'analyse doit avoir au minimum les informations suivantes :

- \*) la géométrie discrétisée
- \*) les données de matériau
- \*) le chargement et les conditions aux limites
- \*) types d'analyse
- \*) sortie souhaitée

#### IV.3.1) Discrétisation de la géométrie :

Les éléments finis et les nœuds définissent la géométrie basique de la structure physique modélisée en ABAQUS. Chaque élément dans le modèle représente une portion discrète de la structure physique qui est représentée par beaucoup d'éléments interconnectés par des nœuds communs.

La collection de tous les éléments et des nœuds dans un modèle est appelée le maillage, le type d'élément, la forme et la direction, ainsi que le nombre totale d'élément ont une influence sur la précision des résultats obtenus. Les résultats sont plus exacts autant que la densité de maillage est grande mais le temps de calcul augmente.

La solution obtenue par des modèles numériques n'est généralement qu'une approximation de la solution réelle du problème simulé. La précision de l'approximation faite dans le modèle géométrique, le comportement de matériau, les conditions aux limites et le chargement déterminent combien la solution approche le problème physique.

#### IV.3.2) Les données sur le matériau :

Les propriétés matérielles pour tous les éléments doivent être spécifiées, puisque les données matérielles de grande précision sont souvent difficiles à obtenir. Particulièrement pour les modèles matériels complexes. La validité des résultats d'ABAQUS est limitée par l'exactitude des données matérielles.

#### IV.3.3) Le chargement et les conditions aux limites :

Les chargements déforment la structure physique et créent des contraintes dans cette structure. Parmi les chargements les plus courants on cite : le chargement ponctuel, le chargement de pression, la traction, le moment, la force de volume, le chargement thermique...etc. les

conditions aux limites sont utilisées pour contraindre une portion de modèle à rester fixe ou à être déplacée.

#### **IV.3.4) Types d'analyse :**

Parmi les plus importants types des simulations on trouve : l'analyse de contraintes statique et l'analyse de contraintes dynamique. Dans la première on obtient une réponse à long terme de la structure à un chargement appliqué, dans la seconde on obtient une réponse instantané comme l'effet d'un chargement instantané sur une structure ou la réponse d'un immeuble à un tremblement de terre.

#### **IV.3.5) Les sorties de donnée souhaitées :**

Une simulation d'ABAQUS peut générer une quantité importantes de données de sorties .Afin d'éviter l'utilisation d'un espace mémoire important on peut limiter les sorties aux seules sorties souhaitées.

#### **IV.4) les éléments dans ABAQUS :**

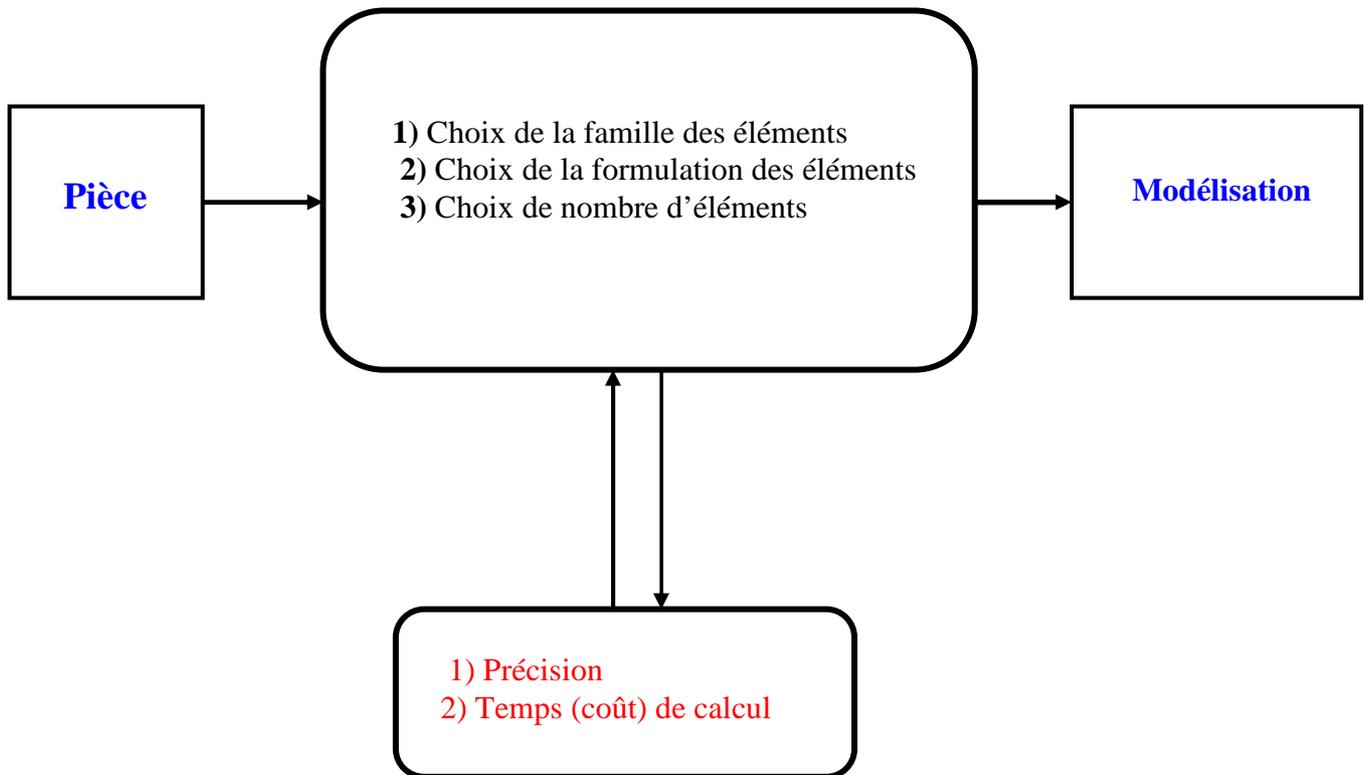
La grande variété d'éléments dans la librairie d'élément d'ABAQUS (495 éléments pour la version 6.3) permet une grande flexibilité de modélisation géométrique.

Le choix, de l'élément à utiliser, sa formulation et le nombre d'élément à utiliser, dépend :

- i) de problème physique lui-même
- ii) de la précision souhaitée
- iii) du temps de calcul souhaité



**Le schéma suivant illustre La modélisation par la méthode des éléments finis :**



# ***CHAPITRE V***

## **V) DEFINITION DU MODELE DE L'ONDULEUX :**

### **INTRODUCTION :**

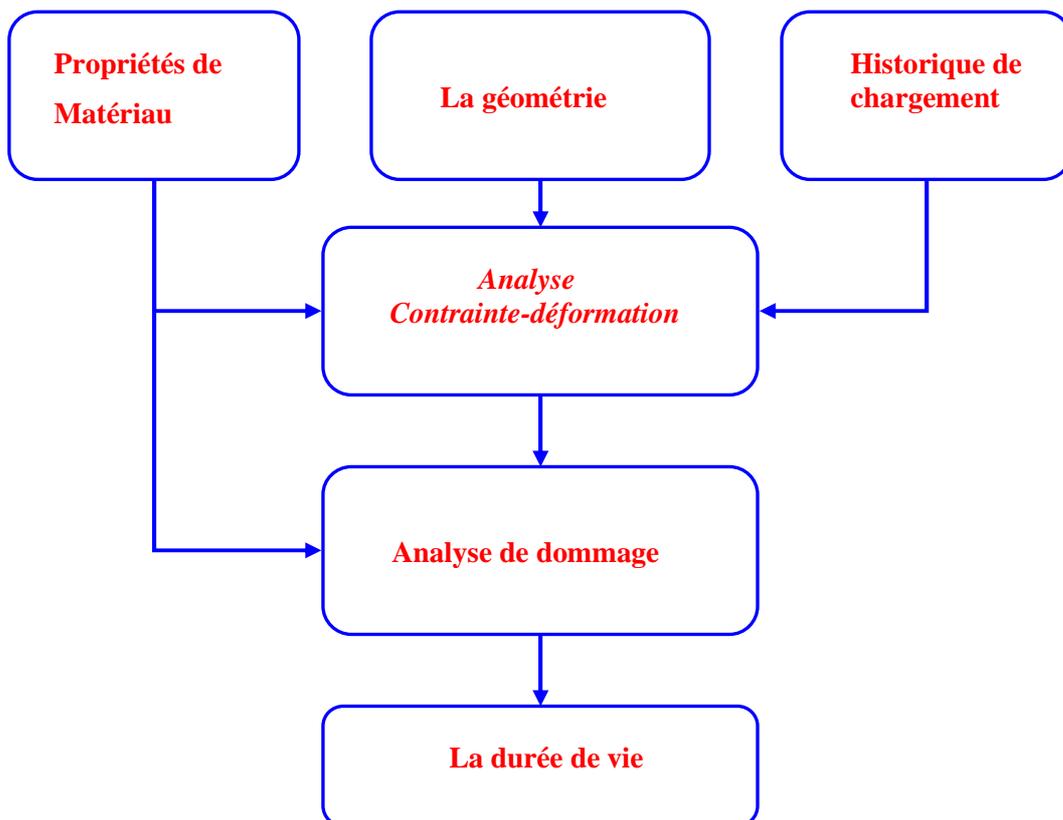
Toute procédure de prédiction de la durée de vie en fatigue suit trois étapes pour analyser et injecter les données requises dans cette procédure de calcul :

*-les propriétés du matériau*

*-l'histoire du chargement et des contraintes*

*-l'analyse des déformations et des contraintes cycliques et l'évolution du dommage.*

Les données relatives à l'histoire du chargement et au matériau sont similaires dans la plupart des méthodes ; cependant, l'analyse des contraintes et des déformations inélastiques locales et les méthodes de calcul de l'endommagement par fatigue peuvent différer selon la philosophie générale de l'analyse. La méthodologie suivie pour prédire les durées de vie en fatigue est représentée par la figure ( 5.1).

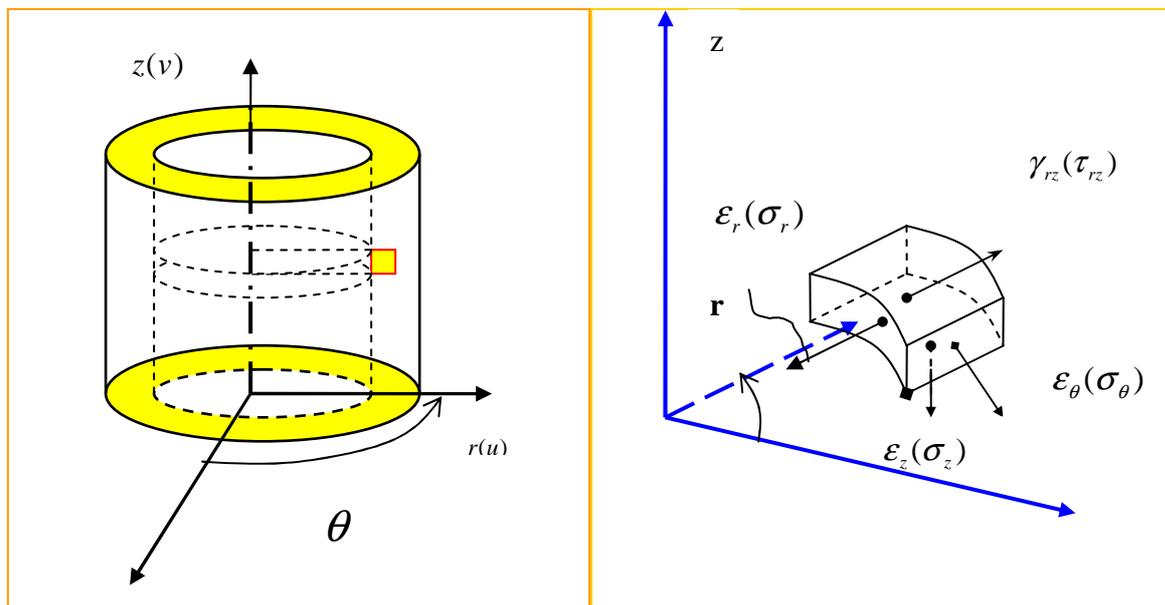


**Figure 5.1 : Procédure générale d'analyse de la fatigue.**

## V.1) LA GEOMETRIE :

Puisque le chargement et les propriétés du matériau sont indépendants de  $\theta$  (chargement et conditions aux limites axisymétriques), la résolution de problème dans le plan  $(r, z)$  définit complètement la solution dans le corps déformable, par conséquent les éléments axisymétriques peuvent être utilisés pour analyser le problème en discrétisant la section transversale de référence à  $\theta=0$ , un déplacement radial quelconque dans un élément axisymétrique induit une déformation dans la direction circonférentielle

La figure (5.1.a) montre un élément d'un solide axisymétrique, le volume associé à l'élément est un corps de révolution.



(a)

(b)

Fig.5.1 : (a) élément d'un tube possédant une symétrie de révolution (corps axisymétrique)

(b) déformations et contraintes axisymétriques

Le modèle axisymétrique comprend plusieurs éléments :

- ✓ le tube : volume déformable axisymétrique
- ✓ les flasques : des corps rigides axisymétriques
- ✓ des éléments de contact : tube-flasques

### V.1.1) LE VOLUME DEFORMABLE AXISYMETRIQUE :

Dans le problème étudié on a affaire à des grandes déformations (la non linéarité géométrique et matérielle) et à des problèmes de contacts. Pour cela on utilise les éléments axisymétriques à **8 NOEUDS** et à **9 POINTS** d'intégrations dans un plan axial et avec des

fonctions d'interpolations cubiques (**CAX8 :an 8-node biquadratic axisymétrique quadrilateral**) (fig.5 .1). On aurait pu utiliser des éléments coques (**SAX1, SAX2**) mais ils ne permettent pas de traiter avec performance les problèmes de contacts.

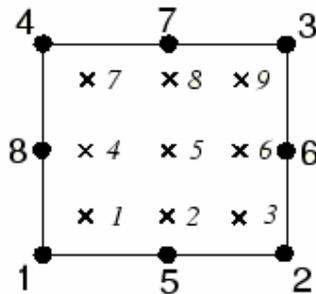


Fig.5.2 : élément CAX8

### V.1.2) LES FLASQUES, SURFACES RIGIDES :

Les déformations que subit les flasques au cours de l'hydroformage sont négligeables donc on suppose qu'ils ont une très grande rigidité par rapport à celle de tube et on les modélise par des surfaces rigides discrètes axisymétriques pour cela on utilise les éléments **RAX2 (2-node linear axisymmetric quadrilateral)**. Les points (nœuds) de référence associés permettent de faire déplacer les flasques.

### V.1.3) ELEMENTS DE CONTACT :

Pour traiter les problèmes d'interférences et de contacte entre, d'une part, le tube et le flasque, on doit disposer des éléments de contact sur la surface déformable extérieure du tube .Le coefficient de frottement entre les surfaces est de 0.1, ces éléments permettent aussi de connaître les pressions de contact entre les deux surfaces.

## V .2) CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE L'ACIER INOX 316L :

### V .2.1) LA PLASTICITE DE L'ACIER INOX 316L :

Dans toute l'étude on suppose que le matériaux est isotrope : les caractéristiques sont indépendantes du choix des axes (un changement de base quelconque ne change pas les propriétés).

- (a) Le comportement de l'acier inox316L avant la limite d'élasticité est élastique linéaire Et retrouve son état initial après déchargement (comportement élastique linéaire)

- (b) Lorsque le matériau excède la limite élastique des déformations permanentes commence à apparaître
- (c) Les déformations élastiques et plastiques s'accumulent tant que l'acier se déforme après la limite élastique mais sa rigidité se décroît dramatiquement au fur et à mesure que le matériau se déforme et ne retrouve sa rigidité initiale (E) qu'après déchargement (comportement plastique non linéaire)
- (d) La déformation plastique augmente la limite élastique du matériau : ce comportement est appelé écrouissage.

### V.2.2) DEFINITIONS :

- ❖ **La déformation vraie (logarithmique)** : elle est définie par la relation suivante :

$$d\varepsilon = \frac{d\ell}{\ell} \Rightarrow \varepsilon = \int_{\ell_0}^{\ell} \frac{d\ell}{\ell} = \ln\left(\frac{\ell}{\ell_0}\right) \dots\dots (V.1)$$

$\ell$  : La longueur actuelle

$\ell_0$  : La longueur initiale

- ❖ **La contrainte vraie** : elle est la contrainte conjuguée de la déformation vraie, elle est définie par la relation suivante

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots (V.2)$$

**F** : La force appliquée

**A** : la surface actuelle

### V.2.3) LA DEFINITION DE LA PLASTICITE DANS LE CODE ABAQUS :

Pour définir la plasticité dans **ABAQUS**, on doit utiliser les contraintes vraies et les déformations vraies. **ABAQUS** recommande ces valeurs pour interpréter correctement les données. Mais souvent les testes réalisés sont effectués en utilisant les contraintes nominales et les déformations nominales : on doit alors utiliser des expressions suivantes pour convertir les contraintes (déformations) nominales aux contraintes (déformations) vraies.

- LA RELATION DEFORMATION VRAIE- DEFORMATION NOMINALE :

$$\varepsilon_{nom} = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} = \frac{\ell}{\ell_0} - 1 \Rightarrow \frac{\ell}{\ell_0} = 1 + \varepsilon_{nom} \dots (V.3)$$

$$\text{D'où : } \ln\left(\frac{\ell}{\ell_0}\right) = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \dots (V.4)$$

$$\text{Et : } \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \dots (V.5)$$

Avec :

$\varepsilon_{nom}$  : Déformation nominale

$\varepsilon$  : Déformation vraie

- LA RELATION CONTRAINTE VRAIE-DEFORMATION NOMINALE :

Elle est obtenue en considérant la nature incompressible de la déformation plastique et élastique, avec cette hypothèse on peut écrire :

$$V_0 = V \quad \Rightarrow \quad \ell_0 A_0 = \ell A \dots (V.6)$$

La surface actuelle est liée à la surface originale par la relation :

$$A = \frac{\ell_0 A_0}{\ell} \dots (V.7)$$

Et en substituant A dans la relation donnant la contrainte vraie :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{\ell}{\ell_0} = \sigma_{nom} \left( \frac{\ell}{\ell_0} \right) \dots (V.8)$$

En utilisant la relation :

$$\frac{\ell}{\ell_0} = 1 + \varepsilon_{nom} \dots\dots (V.9)$$

On trouve :

$$\sigma = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \dots\dots (V.10)$$

Le matériau de tube est l'acier inoxydable 316L.

La loi de comportement de cet acier est définie ainsi [18] :

$$\sigma = f(\varepsilon_t) \dots\dots (V.11)$$

Avec:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_e = \varepsilon_t - \frac{\sigma}{E} \dots\dots (V.12)$$

$\varepsilon_{pl}$  : Déformation plastique vraie

$\varepsilon_t$  : Déformation totale vraie

$\varepsilon_e$  : Déformation élastique vraie.

$\sigma$  : Contrainte vraie.

$E$  : module de Young (**193000 MPa**)

$\sigma_e$  : Limite d'élasticité (**250 MPa**)

$\sigma_r$  : Limite de rupture (**1170 MPa**)

La relation (V.12) se décompose en deux parties :

$$\frac{\sigma}{\sigma_e} = \left( \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_e} \right)^{0.093} \quad \text{Pour : } 0 < \varepsilon_p \leq 0.036 \quad (\text{pour } \varepsilon_{pl} = 0 \text{ on a : } \sigma = \sigma_e = 250 \text{ Mpa})$$

$$\text{Avec : } \varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} = \frac{250}{193000} = 1.295 \times 10^{-3} \dots\dots (V.13)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_{3.6\%}} = \left( \frac{\varepsilon_{pl}}{0.036} \right)^{0.484} \dots\dots (V.14) \quad \text{Pour : } 0.036 \leq \varepsilon_{pl} \leq \varepsilon_{rupture}$$

$$\sigma_{3.6\%} = 340.58 \text{ Mpa} \quad \text{Contrainte correspondant à } \varepsilon_{pl} = 0.036$$

$\sigma$ (Mpa)	$\varepsilon_{pl}$ (%)	$\varepsilon_t$ (%)
250.0	0.00	0.13
276.9	0.40	0.54
295.3	1.00	1.00
309.7	1.80	1.15
338.6	3.40	3.58
425.5	6.00	6.22
487.2	8.00	8.25
541.5	10.00	10.25
590.5	12.00	12.31
635.5	14.00	14.33
716.6	18.00	18.37
789.0	22.00	22.41
854.8	26.00	26.44
915.7	30.00	30.47
986.2	35.00	35.51
1051.7	40.50	40.54
1113.1	45.00	45.54
1171.0	50.00	50.61

**Tableau.5.1 : comportement de l'acier INOX 316L**  
**Contrainte vraie –déformation vraie –déformation totale**

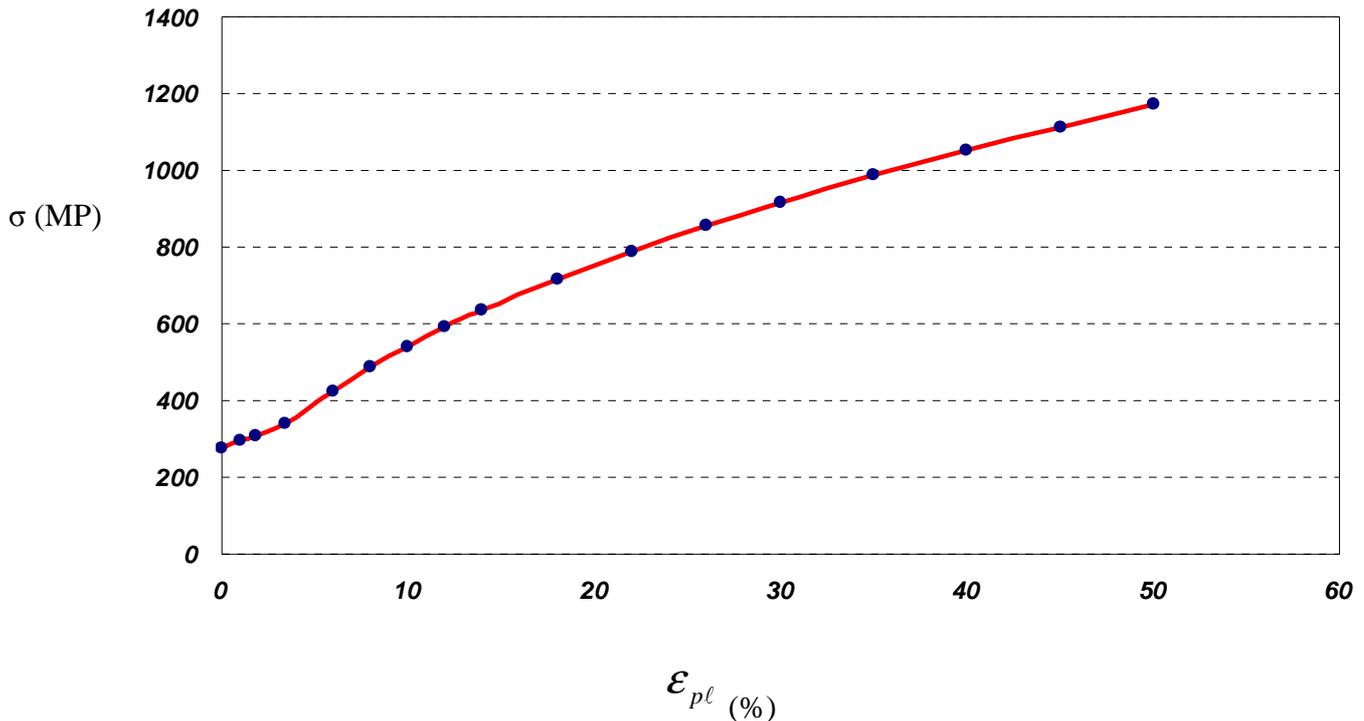


Fig.5.3 : courbe de comportement de l'acier INOX 316L.

### V.3) SIMULATION DE L'HYDROFORMAGE EN MODELISANT UNE SEULE ONDE :

Premièrement on modélise une seule onde seulement. Elle comprend 3 couches, chaque couche comprend 80 éléments. Pour le **PARNOR 1 in** (diamètre extérieure de tube est de **2.54 cm** et l'épaisseur de feuillard est de **0.25 mm**) l'épaisseur de chaque élément est de **0.0625 mm** et sa longueur est de **0.091875 mm**. La longueur d'une onde avant hydroformage est de **14.70 mm**.

#### V. 3.1) LES CONDITIONS AUX LIMITES ET DE LIAISONS:

Les conditions aux limites du modèle sont les suivantes :

- les section **S1** ET **S2** de l'onde restent droites
- l'axe **D** est un axe de symétrie du modèle

Les conditions de chargement sont les suivantes

- le préformage (application d'une pression de 15MPa sur la surface intérieure de tube):

- les sections **S1** et **S2** sont fixes axialement,
- les flasques sont fixes.

- le flambage (flambement) :

- la section **S1** et le flasque **F1** sont liés cinématiquement dans le sens axial.
- la section **S2** et le flasque **F2** sont fixes.

➤ **relâchement de la pression :**

Les flasques et les sections sont fixes,

➤ **relâchement de la force axiale et retrait de flasque :**

- les flasques reviennent à leurs positions initiales
- la section **S1** est libre axialement

Dans ce paragraphe on va comparer les caractéristiques des onduleux calculées avec celles des profils réels. La comparaison est faite pour PARNOR 1 POUCE et PARRAP 1 POUCE.

**V.3.2) PARNOR 1 POUCE :**

L'hydroformage des tubes PARNOR se fait en quatre étapes successives :

- mise en pression à 150 Bars ou le préformage (fig.5.4 et fig.5.5)
- rapprochement d'un flasque avec un déplacement imposé d'une extrémité de 8.2mm (fig.5.6) en gardant la pression de 150Bars
- relâchement de la pression ( $P=0$ ) (fig.5.7)
- retrait des flasques (fig.5.8)

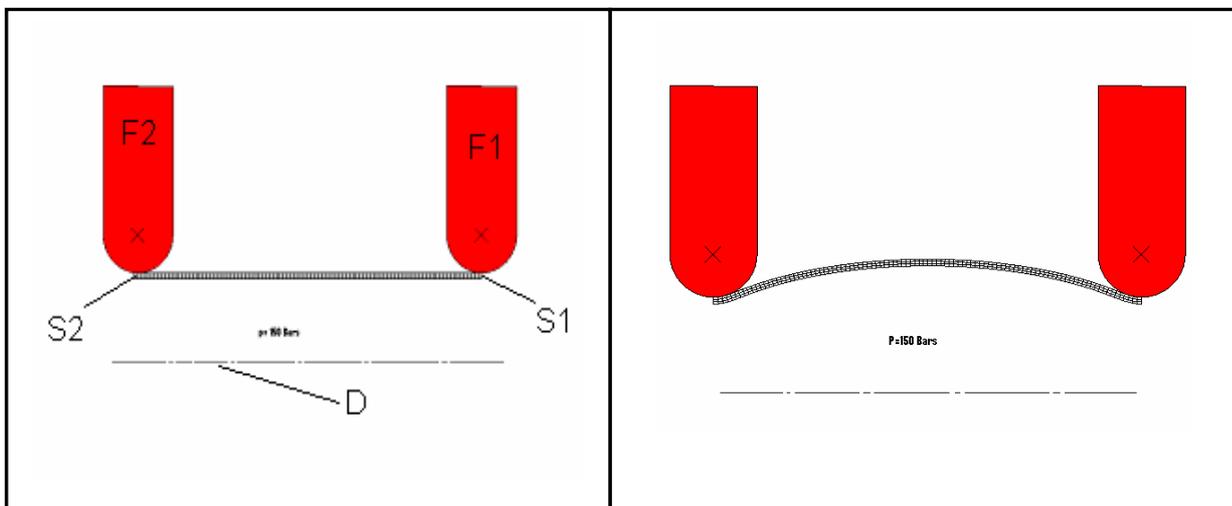


Fig.5.4

Fig.5.5

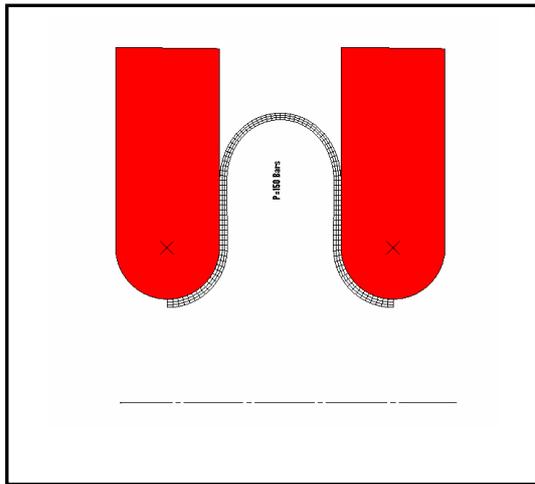


Fig.5.6

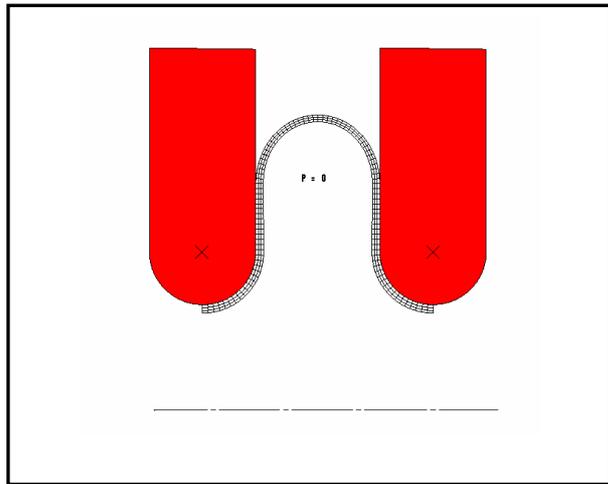


Fig.5.7

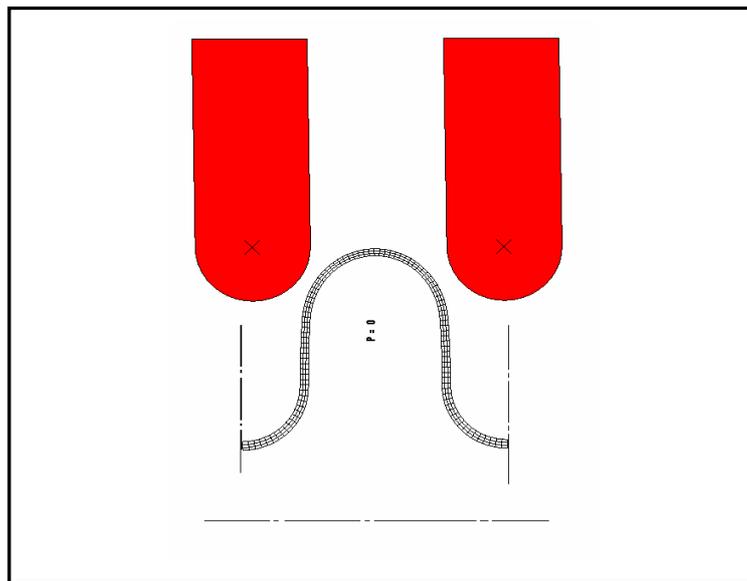


Fig.5.8

POUR UN ECROUISSAGE ISOTROPIQUE ET CINEMATIQUE:

	D1 (mm)	D2 (mm)	e (mm)		P (mm)	H (mm)
STANDARD	[24.7, 25.3]	[35.6, 36.4]	0.25		[6.9, 7.5]	5.55
CALCUL (ISOTROPE)	24.90	35.98	CREUX 0.24	SOMMET 0.19	7.039	5.55
CALCUL (CINEMATIQUE)	24.92	36.32	0.23	0.18	5.72	5.11

On voit bien que les résultats sont en concordance avec celles de standard et elles sont très bonnes pour un écrouissage isotrope.

Avec :

**D1** : diamètre intérieur du tube

**D2** : diamètre extérieur du tube

**E** : épaisseur du feuillard au creux d'onde et au sommet d'onde

**P** : pas de l'onde (longueur d'onde)

**H** : hauteur de l'onde

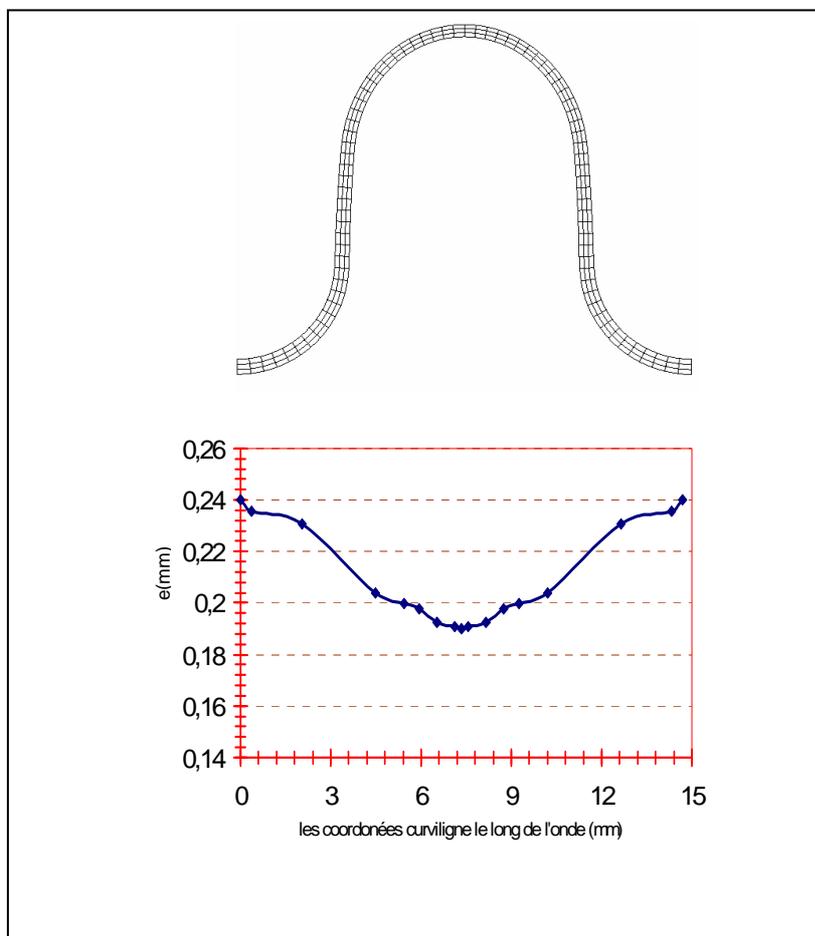


Fig.5.9:Variation de l'épaisseur le long d'une onde (écrouissage isotrope)

### V.3.3) PARRAR 1 POUCE :

On forme le PARRAP (1 pouce) à partir de PARNOR (1 pouce) en suivant les trois étapes suivantes :

- 1) compression de l'onde (Fig.5.10.a et Fig.5.10.b) de 3.90 mm
- 2) étirement de l'onde (fig.5.10.c) de 2.27 mm
- 3) relâchement de la force axiale (Fig.5.10.d)

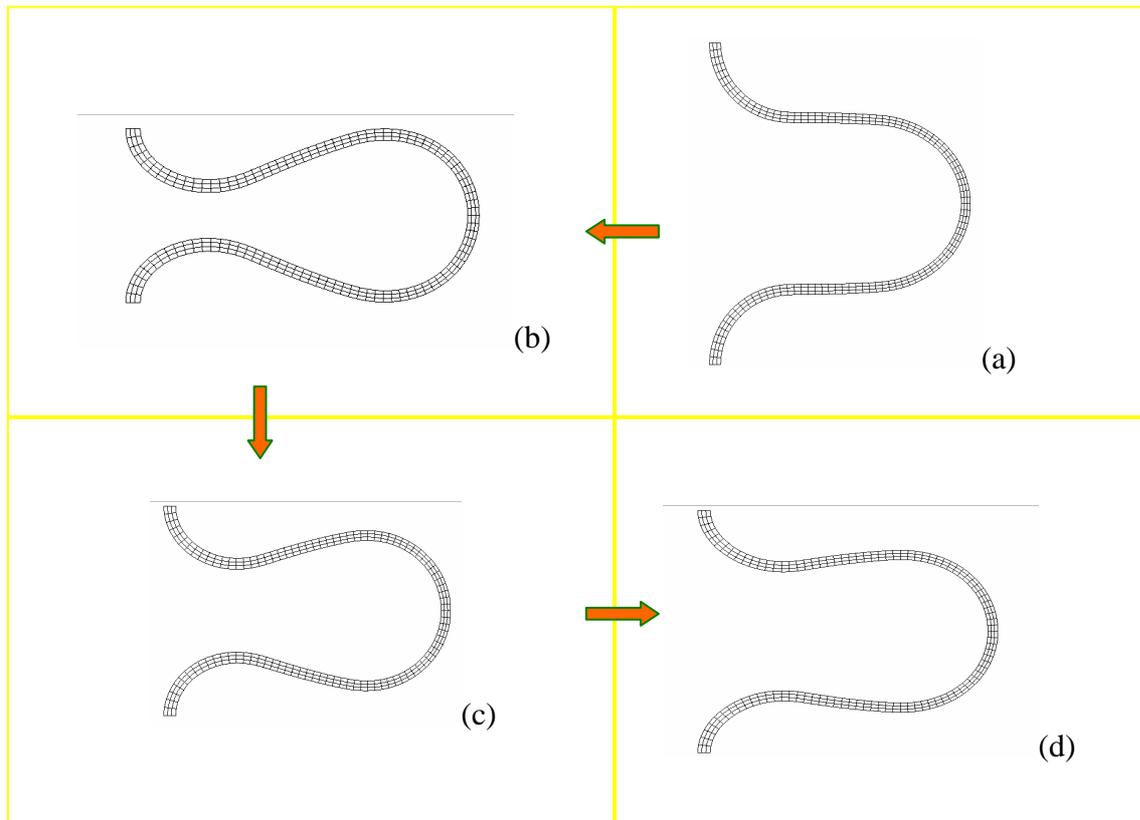


Fig .5.10

	D1 (mm)	D2 (mm)	e (mm)		P (mm)	H (mm)
STANDARD	[24.2, 24.9]	[32.00, 40.00]	0.25		[4.55. ,5.25]	5.75
CALCUL (ISOTROPIC)	24.36	36.02	CREUX 0.24	SOMMET 0.19	5.24	5.58
CALCUL (KINEMATIC)	25.3	36.40	0.24	0.19	5.409	5.99

On voit bien que les résultats sont en concordance avec celles de standard et elles sont très bonnes pour un écouissage isotope.

## V.4) SIMULATION DE L'HYDROFORMAGE EN PRENANT TOUT LE PROCÉDE:

### V.4.1) HYDROFORMAGE D'UN TUBE DE DIAMÈTRE NOMINALE 2.54mm

#### V.4.1.1) PARNOR 1 POUCE :

Dans ce paragraphe on modélise tout le processus de l'hydroformage (3 ondes) .La modélisation comprend 2 couches, chaque couche comprend 240 éléments. Pour le **PARNOR 1 in** (diamètre extérieure de tube est de **2.54 cm** et l'épaisseur de feuillard est de **0.25 mm**), La longueur d'une onde avant hydroformage est de **14.70 mm** ce qui correspond à une longueur de **44.1 mm** pour les 3 ondes.

#### ❖ ) Les conditions aux limites :

##### ➤ le préformage (fig5.11.a)

Les flasques :

$$u_r = u_z = w_\theta = 0$$

Le tube déformable :

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = 0$

La surface intérieure : on applique une pression de 15Mpa

##### ➤ le flambement (hydroformage)(fig5.11 .b) :

Les flasques :

On impose les déplacements suivants pour chaque flasque :

1<sup>er</sup> flasque :  $u_r = u_z = w_\theta = 0$

2<sup>ème</sup> flasque :  $u_r = 0, u_z = 8.2\text{mm}, w_\theta = 0$

3<sup>ème</sup> flasque :  $u_r = 0, u_z = 16.4\text{mm}, w_\theta = 0$

4<sup>ème</sup> flasque :  $u_r = 0, u_z = 24.6\text{mm}, w_\theta = 0$

Le tube déformable :

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = 24.6\text{mm}$

La surface intérieure : on maintient la pression de 15Mpa

##### ➤ Relâchement de la pression (fig5.12.a)

Les flasques :

$$u_r = u_z = w_\theta = 0$$

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = 0$

La surface intérieure : on annule la pression de 15Mpa,  $p = 0$

➤ **retrait des flasques (fig5.12.b) :**

Les flasques :

$$u_z = w_\theta = 0, u_r = X$$

X : le déplacement pour atteindre la position initiale des flasques

Le tube déformable :

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = ?$ , On doit la laisser libre

La surface intérieure : on maintient la pression égale à Zéro.

**V.4.1.2) PARRAPIPOUCE** : à partir de PARNOR 1POUCE (3ondes) on forme le PARRAP

I) compression des 3ondes de 11.7 mm

II) étirement des 3 ondes de 6.81 mm

III) relâchement de la force axiale

**Conclusion** : on constate une différence dans les valeurs des contraintes résiduelles : en modélisant tout le processus, *qu'est plus réaliste*, on constate une diminution de maximum la contrainte maximale principale de 7 % par rapport à celle d'une seule onde.

**V.4.2) HYDROFORMAGE D'UN TUBE DE DIAMETRE NOMINALE 15.24mm**

**V.4.2.1) PARNOR6POUCES :**

Dans ce paragraphe on modélise les tout le processus de l'hydroformage (3 ondes). Elle comprend 2 couches, chaque couche comprend 240 éléments. Pour le **PARNOR 1 in** (diamètre extérieure de tube est de **2.54 cm** et l'épaisseur de feuillard est de **0.25 mm**). La longueur d'une onde avant hydroformage est de **30.083mm** ce qui correspond à une longueur de **90.25 mm** pour les 3ondes

❖ ) **Les conditions au limites :**

➤ **le préformage (fig5.11.a)**

Les flasques :

$$u_r = u_z = w_\theta = 0$$

Le tube déformable :

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = 0$

La surface intérieure : on applique une pression de 15Mpa

➤ **le flambement (hydroformage)(fig5.11 .b) :**

Les flasques :

On impose les déplacements suivants pour chaque flasque.

1<sup>er</sup> flasque :  $u_r = u_z = w_\theta = 0$

2<sup>ème</sup> flasque :  $u_r = 0, u_z = 16.083\text{mm}, w_\theta = 0$

3<sup>ème</sup> flasque :  $u_r = 0, u_z = 32.166\text{mm}, w_\theta = 0$

4<sup>ème</sup> flasque :  $u_r = 0, u_z = 48.250\text{mm}, w_\theta = 0$

Le tube déformable :

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = 48.25\text{mm}$

La surface intérieure : on maintient pression de 15Mpa

➤ **Relâchement de la pression (fig.5.12.a)**

Les flasques :

$$u_r = u_z = w_\theta = 0$$

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = 0$

La surface intérieure : on annule la pression,  $p = 0$

➤ **retrait des flasques (fig.5.12.b) :**

Les flasques:

$$u_z = w_\theta = 0, u_r = X$$

X : le déplacement pour atteindre la position initiale des flasques

Le tube déformable :

L'extrémité haute de tube :  $u_z = 0$

L'extrémité basse du tube :  $u_z = ?$  , On doit la laisser libre

La surface intérieure : on maintient la pression égale à Zéro.

On obtient les caractéristiques géométriques suivante pour le PARNOR6P :

	D1 (mm)	D2 (mm)	e (mm)		P (mm)	H (mm)
CALCUL (ISOTROPE)	149.94	174.92	Creux 0.42	Sommet 0.45	15.36	12.49
STANDARD	[148.6, 149.6]	[173,175]	0.5		[15,16.6]	12.50

**V.4.2.2) PARRAP6POUCE** : à partir de PARNOR 6POUCE (3ondes) on forme le PARRAP

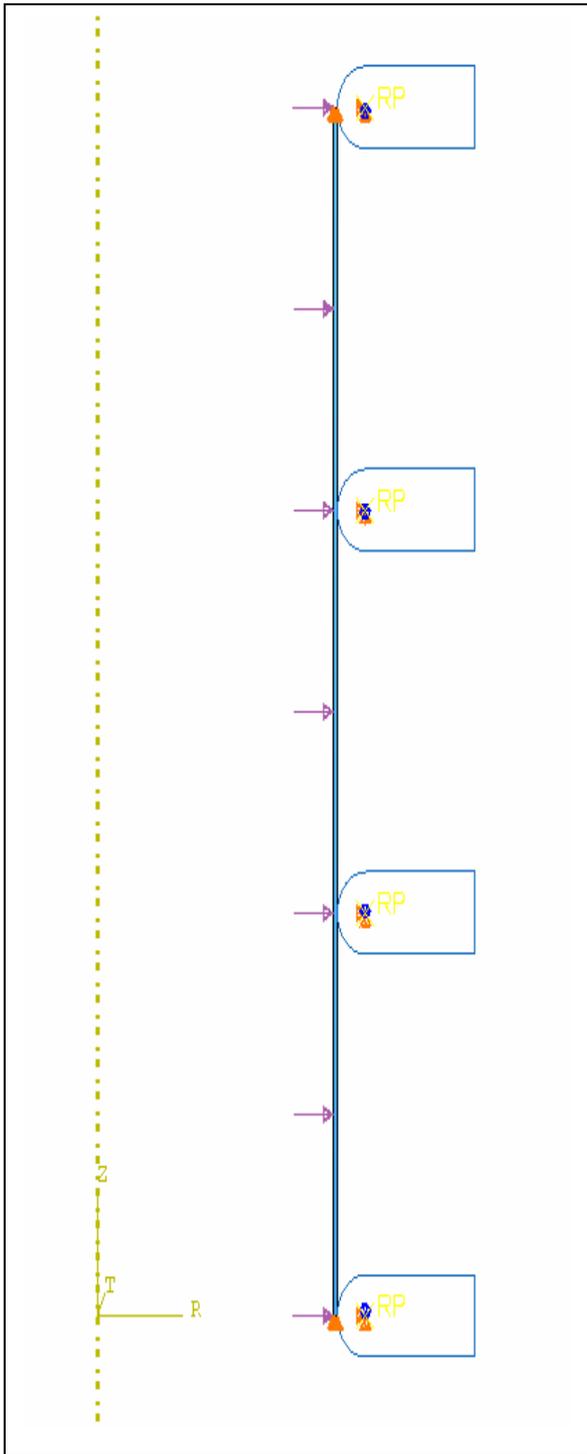
I) compression des 3ondes de 28.98mm (jusqu'à un pas de 5.7mm) (**fig.5.13.a**)

II) étirement des 3 ondes de 22.2mm (jusqu'à un pas de 13.1mm) (**fig.5.13 .b**)

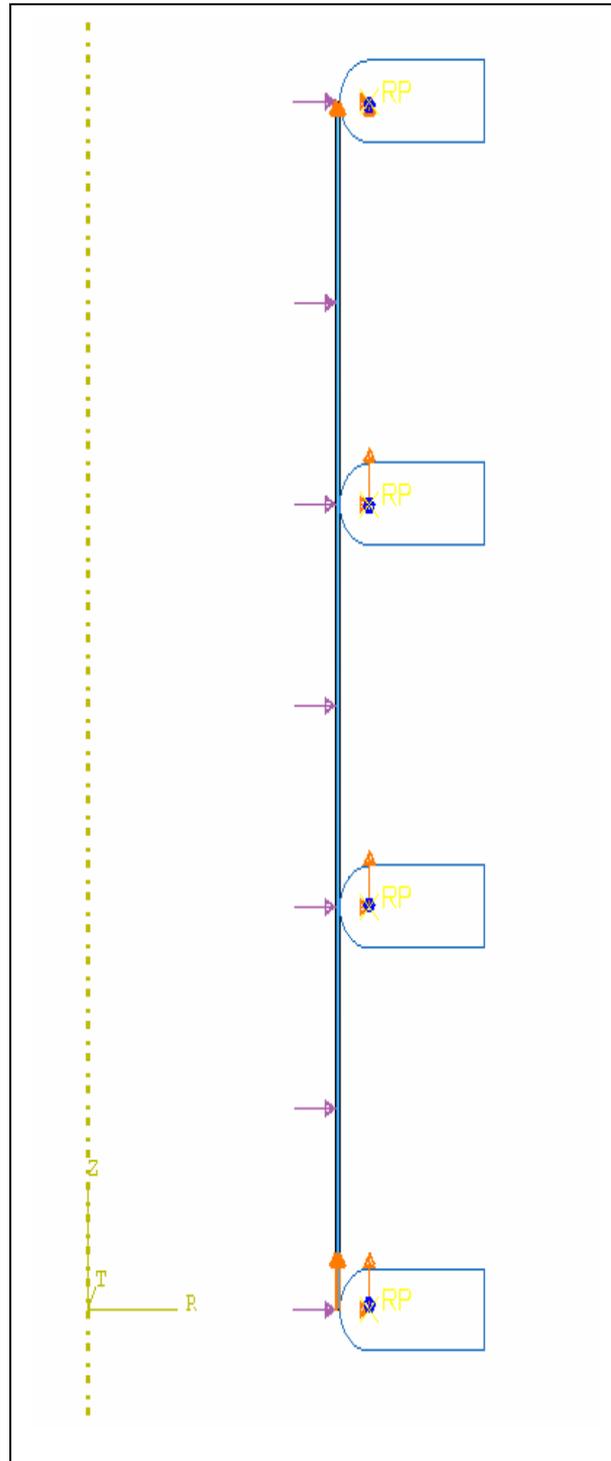
III) relâchement de la force axiale

On obtient les caractéristiques géométriques suivantes pour le PARRAP6 :

	D1 (mm)	D2 (mm)	e (mm)		P (mm)	H (mm)
CALCUL (ISOTROPE)	150	174.91	Creux 0.42	Sommet 0.45	11.90	12.70
STANDARD	[147.5, 148.9]	[173,175]	0.5		[11,12.2]	12.90

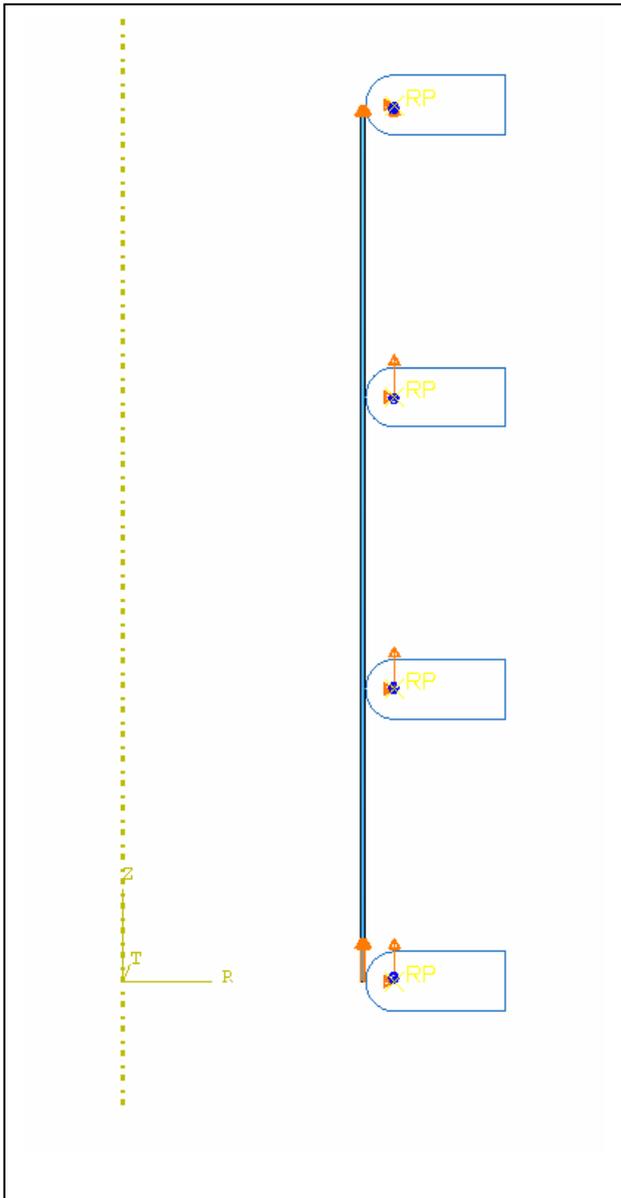


**Fig.(a)**

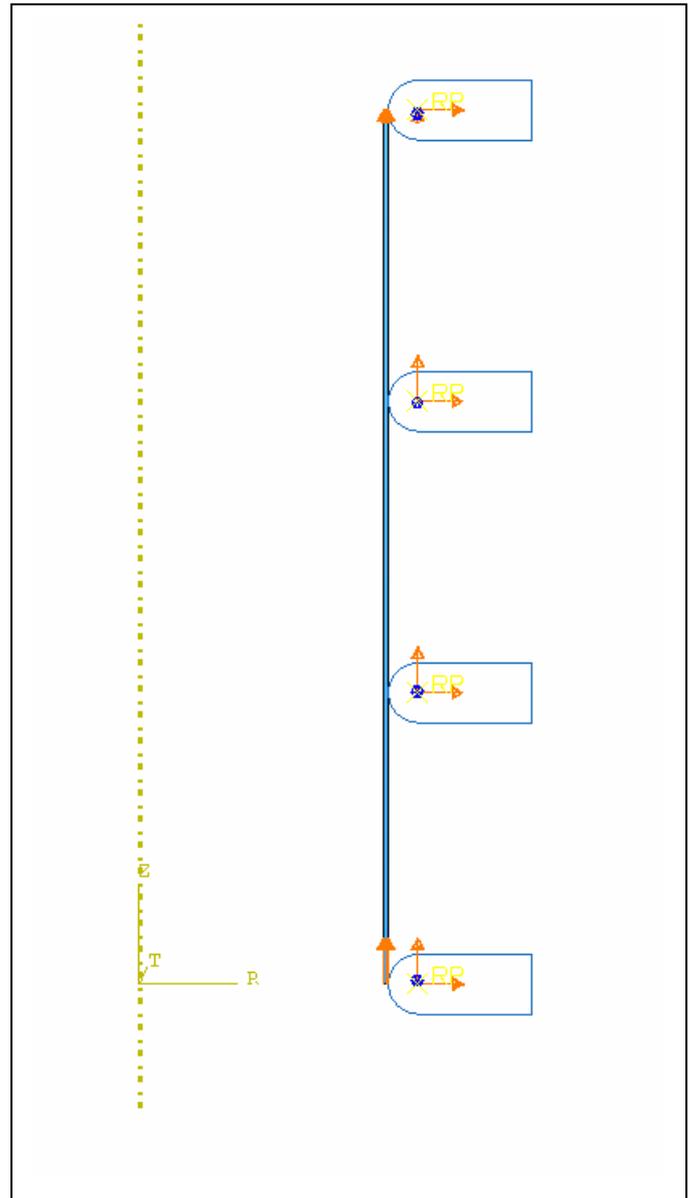


**fig.(b)**

**Fig .5.11**

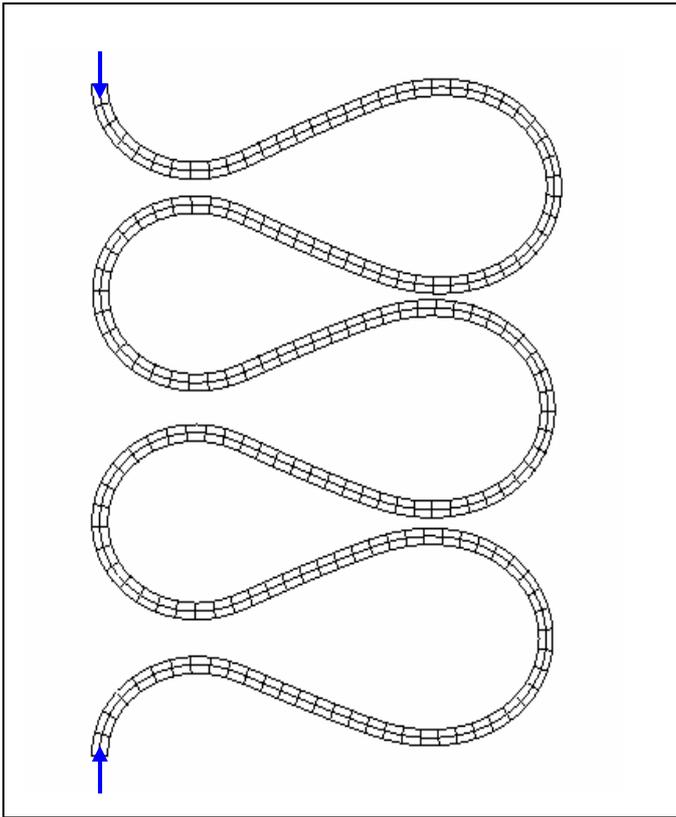


**Fig.(a)**

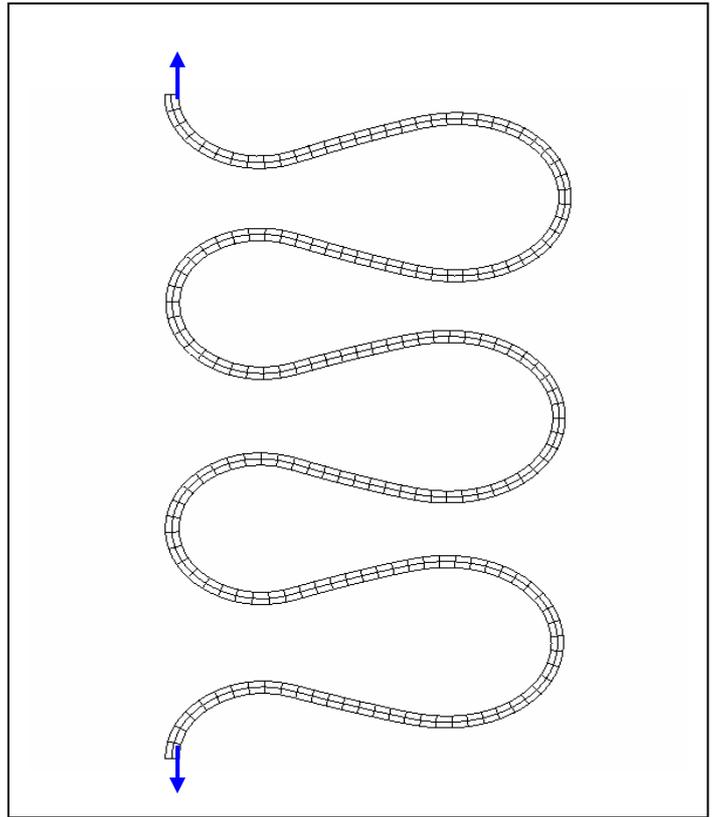


**fig.(b)**

**Fig .5.12**



**Fig.(a)**



**Fig.(b)**

**Fig.5.13**

# CHAPITRE VI

## VI) CALCULES DES ONDULEUX EN FATIGUE

### VI .1) Introduction

La figure (6.2) présente différentes méthodes de calcul utilisées pour prévoir la durée de vie en fatigue [6].

- calcul à la fatigue dans le domaine élastique à l'aide de la loi de Miner
- *approche locale contrainte déformation utilisée pour les éléments de machine*
- méthode de la contrainte équivalente ou de chargement équivalent .appliqué sur des composants mécaniques ,elle nécessite l'estimation du chargement d'amplitude constant qui reproduit sur un bon d'essai le même endommagement que celui apparu sur le même composant sollicité en service)
- l'approche de la tolérance au dommage dans laquelle la durée de vie en fatigue du composant est gouvernée par la durée de vie en propagation .dans cette approche une modélisation de la loi de propagation sous amplitude variable est utilisée.

Afin de vérifier la validité de modèle de calcul de résistance des onduleux en chargement cyclique, il est nécessaire de comparer les résultats théoriques avec l'expérience.

La norme impose, pour déterminer la durée de vie des onduleux, un mode de fatigue en flexion. Or le modèle axisymétrique de l'onduleux ne permet pas d'imposer un tel chargement. La sollicitation en flexion sera remplacée par un test de traction-compression alterné sans pression interne, de débattement équivalent à la sollicitation de flexion.

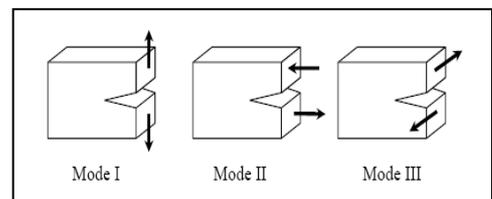
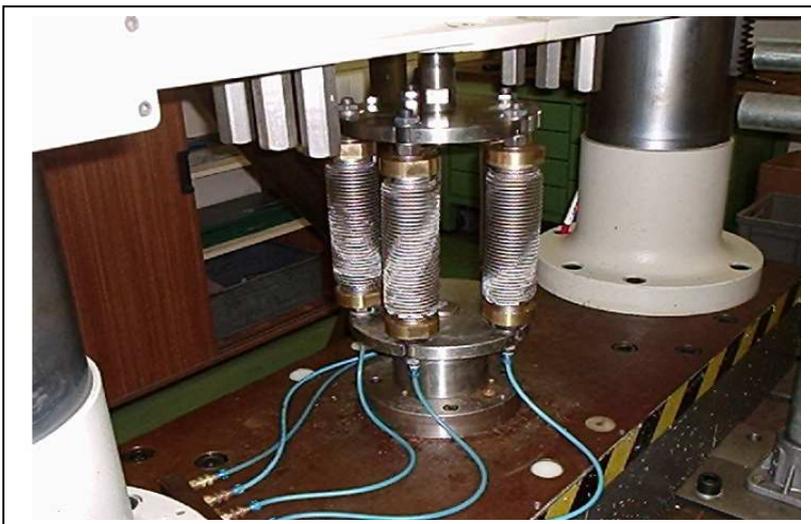


Fig (6.1) : à gauche : essai de fatigue, à droite : mode de rupture

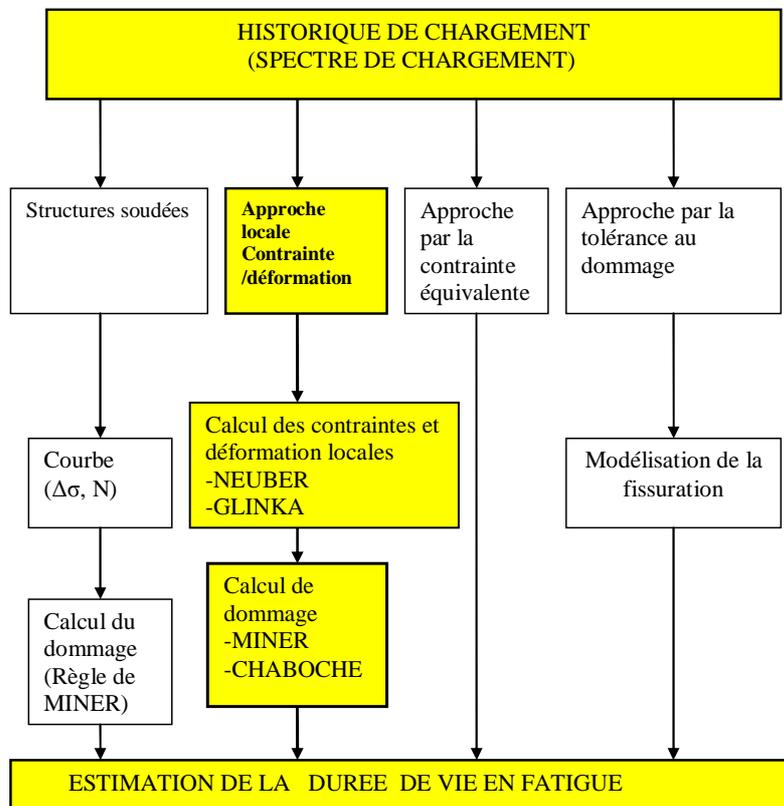


Fig (6.2) : Différentes méthodes pour prévoir, par calcul, la durée de vie en fatigue [6]

La rupture est caractérisée au moins localement, par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties de part et d'autre d'une surface géométrique. C'est une surface de discontinuité pour les champs de déplacements et de contraintes.

Irwin [20] a constaté qu'il existe 3 mouvements indépendants qui séparent les surfaces libres fissurées et les a classés selon des modes (figure 6.1).

- Le **mode I** (ou mode d'ouverture) : est caractérisé par un chargement et un déplacement des surfaces de la fissure perpendiculaire au plan de fissuration, il est considéré comme étant le plus fréquent en mécanique de la rupture pour beaucoup de matériaux.
- Le **mode II** (mode par glissement droit) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de la fissure.

- Le **mode III** (mode par déchirement): les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

Les essais de fatigue effectués, sur le PARNOR **1 POUCE**, ont révélé que chaque échantillon atteignait la ruine par une fissure circonférentielle en creux d'onde. La fissure s'effectue en **mode I** c'est pourquoi il convient de considérer la contrainte maximale principale.

Schématiquement les microfissures ont tendance à s'orienter perpendiculairement à la direction de la contrainte principale maximale [14]

## **VI.2) résultats expérimentaux :**

**Les essais sont effectués sur deux produits différents :**

❖ **PARNOR 1 POUCE**

❖ **PARNOR 6 POUCE**

🚦 **Essais sur PARNOR 1 POUCE (tableau 5.1):**

**Les essais sont réalisés sur une machine de traction-compression MTS (laboratoire de structures ENSAM) :**

- **cellule 1000 daN**
- **essai sur onduleux de diamètre 1 POUCE de 10 ondes**
- **Débattements pour 10 ONDES :  $\pm 2.6\text{mm} \pm 3\text{mm} \pm 3.6\text{mm} \pm 4\text{mm} \pm 4.6\text{mm} \pm 5\text{mm} \pm 6\text{mm}$**
- **6 échantillons ont été essayés pour chaque débattement.**

**Les nombres de cycles indiqués correspondent à la ruine de l'onduleux par fissuration (Fissures circonférentielles en creux d'onde).**

**On voit bien que les résultats sont dispersés, la dispersion des résultats des essais de fatigue est acceptée aujourd'hui, à la fois comme un fait d'expérience et comme un fait physique. Attribuée autrefois aux seules imperfections des conditions d'essais, on la considère maintenant comme un des aspects physiques du phénomène, dont les origines sont liées :**

- **au matériau (inclusions, hétérogénéité de structure, etc.) ;**
- **aux tubes (différence d'état de surface, tolérances dimensionnelles)**
- **aux conditions d'essais (centrages des éprouvettes sur la machine, réglage de la charge, fréquence des cycles, échauffement de l'éprouvette, effet d'environnement, etc.).**

🚧 Essai sur PARNOR 6 POUCE (tableau5.2):

On réalise les mêmes types d'essais sur 15 échantillons de PARNOR 6 POUCE :

- cellule 1000daN
- Essai sur onduleux de diamètre nominal 6 POUCE, 13 ondes.
- débattement pour 13 ondes :  $\pm 8\text{mm}$ ,  $\pm 10\text{mm}$ ,  $\pm 12\text{mm}$ ,  $\pm 14\text{mm}$ ,  $\pm 16\text{mm}$
- 3 échantillons sont essayés pour chaque débattement.

$X_f(\%)$	$X_f(\%)$	Eprouvette	Nombre de cycle	Moyenne
$\pm 1.23$	$\pm 7.89\%$	1	5700	5600
		2	5730	
		3	5370	
$\pm 1.08$	$\pm 6.90\%$	4	8370	8260
		5	9220	
		6	7200	
$\pm 0.923$	$\pm 5.92\%$	7	11450	12560
		8	10140	
		9	16090	
$\pm 0.769$	$\pm 4.93\%$	10	25410	38280
		11	40670	
		12	48750	
$\pm 615$	$\pm 3.94\%$	13	146500	150300
		14	183400	
		15	121100	

Tableau (6.1) : Essai de fatigue du PARNOR 6 POUCE

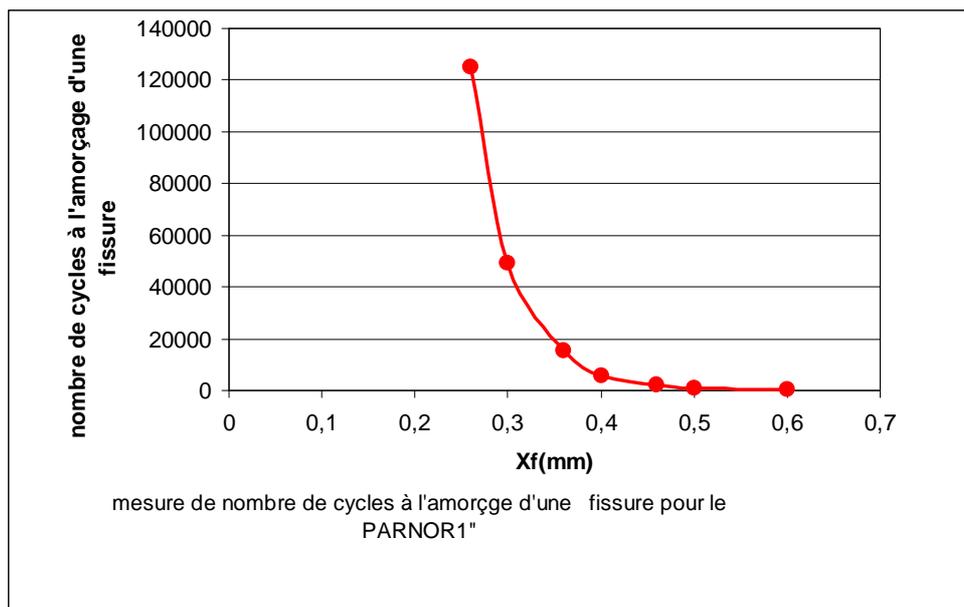


Fig. (6.3)

$X_f$ (mm)	$X_f$ (%)	Eprouvette n°	Nombre de cycle	Moyenne
±0.6	±8.39	1	500	520
		2	528	
		3	560	
		4	510	
		5	480	
		6	535	
±0.5	±6.99	7	857	980
		8	850	
		9	1023	
		10	1150	
		11	1010	
		12	998	
±0.46	±6.43	13	1310	2290
		14	2750	
		15	2650	
		16	2150	
		17	2510	
		18	2370	
±0.4	±5.59	19	4350	5570
		20	5900	
		21	4300	
		22	4100	
		23	8570	
		24	6200	
±0.36	±5.03	25	19000	15500
		26	16500	
		27	14000	
		28	13680	
		29	13560	
		30	16330	
±0.30	±4.20	31	58200	49400
		32	61400	
		33	41300	
		34	64900	
		35	33100	
		36	37500	
±0.26	±3.64	37	119700	125000
		38	167700	
		39	124800	
		40	132500	
		45	80200	
		46	123552	

**Tableau (6 .2) : Essai de fatigue du PARNOR 1 POUCE**

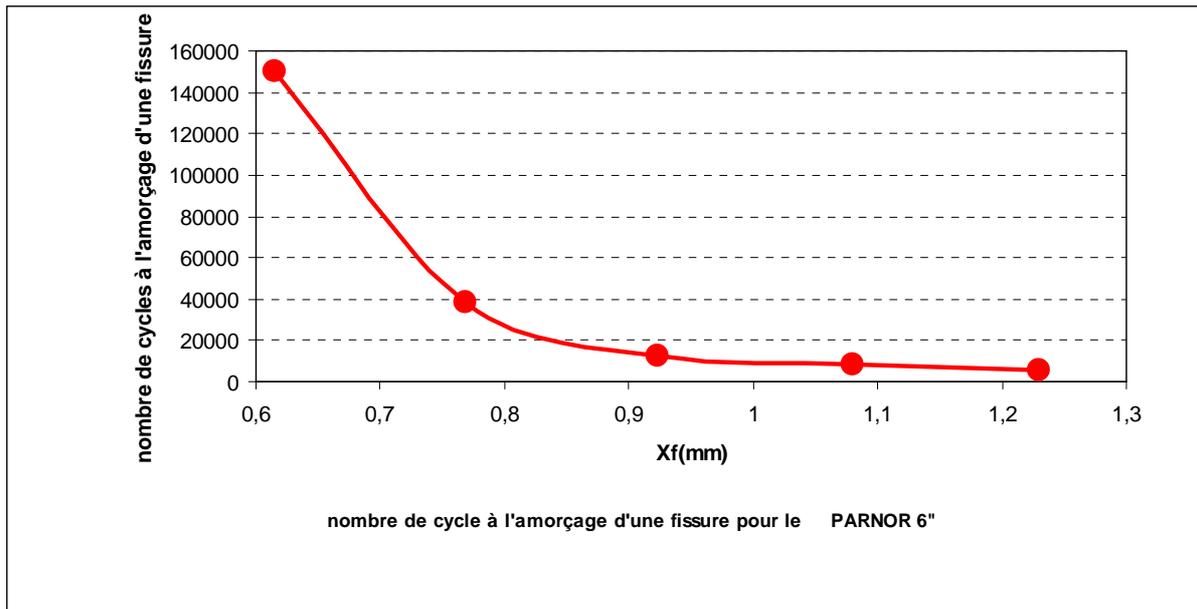


Fig.(6.4)

### VI.3) résultats de calculs

L'écroutissage est isotrope

On obtient les résultats suivants avec Xf est le déplacement axial pour une onde.

**PARNOR 6 POUCE :**

Débattement	Durée de vie (Nbre de cycles)	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\text{moy}}$	$\varepsilon_{\text{initial}}$
±0.615	12869	266.00	-24,899	0.00537
±0.769	6220	361.00	13.950	0.00537
±0.923	3249	404.30	109.250	0.00537
±1.08	1152	467.90	78.800	0.00537
±1.23	789	490.90	119.500	0.00537

Tableau (6.3)

Débattement	Durée de vie (Nbre de cycles)	SERAM (Nbre de cycles)
±0.615	12869	647
±0.769	6220	707
±0.923	3249	909
±1.08	1152	327
±1.23	789	171

Tableau (6.4)

**PARNOR 1 POUCE :**

Débattement	Durée de vie (Nbre de cycles)	SERAM (Nbre de cycles)
±0.60	47	21
±0.50	123	63
±0.46	433	117
±0.40	874	344
±0.36	2313	813
±0.30	10043	3060
±0.26	31201	10930
±0.20	476861	245900

**Tableau (6.5)**

Débattement	Durée de vie (Nbre de cycles)	$\sigma_{\max}$	$\sigma_{my}$	$\varepsilon_{initial}$
±0.60	47	809.30	402.579	0.0568
±0.50	123	873.60	433.974	0.0568
±0.46	433	831.00	421.800	0.0568
±0.40	874	765.70	380.413	0.0568
±0.36	2313	708.50	351.967	0.0568
±0.30	10043	620.10	307.997	0.0568
±0.26	31201	559.00	277.759	0.0568
±0.20	476861	495.40	206.367	0.0568

**Tableau (6.6)**

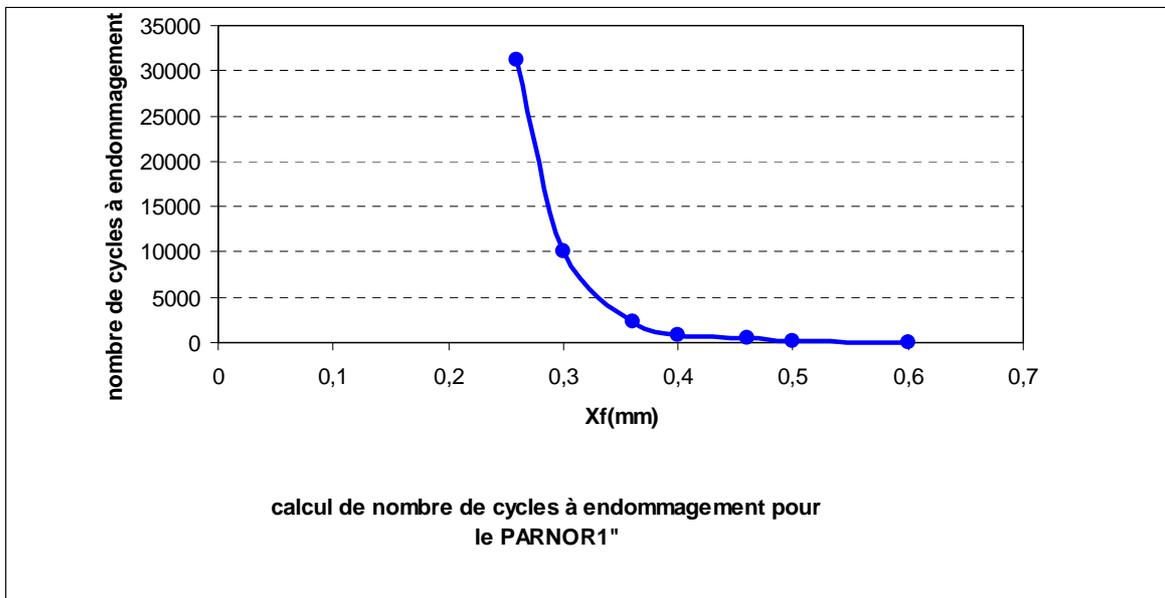


Fig (6.5)

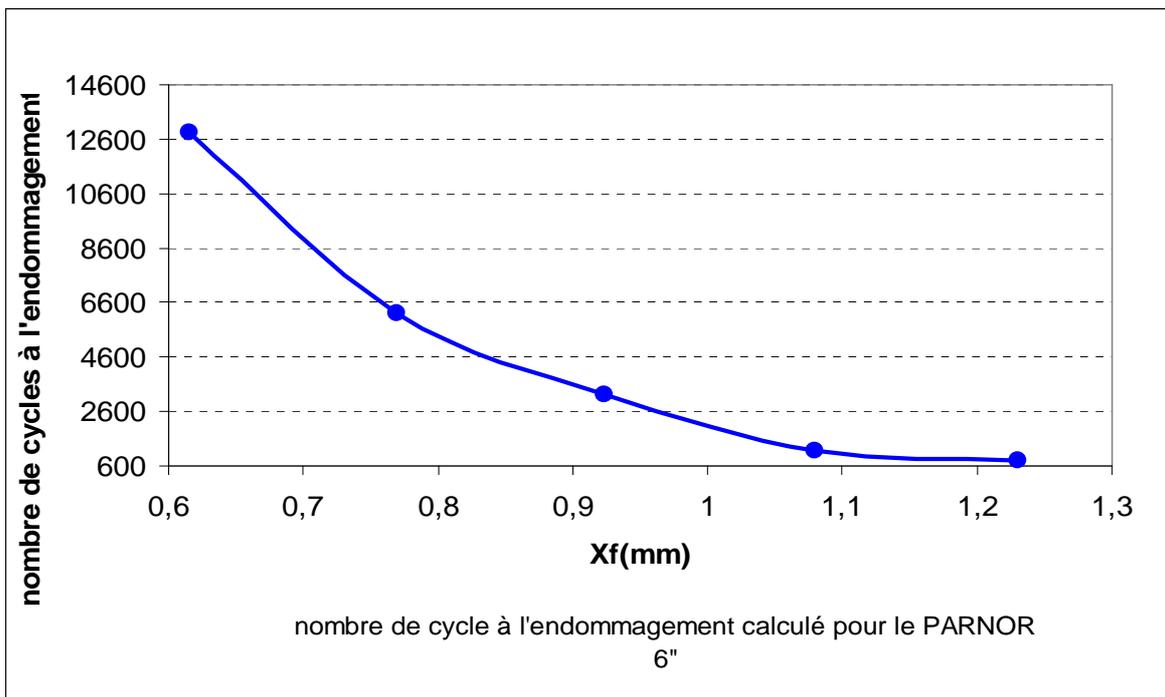


Fig (6.6)

#### VI.4) Comparaison des résultats et discussion:

On voit bien que les résultats de calculs peuvent être utilisés pour prédire la durée de vie des tubes 1" et 6" pouce dans un chargement correspondant donné.

L'écart entre les résultats de calcul et de mesure est dû à plusieurs paramètres :

- les imperfections dans les essais de mesure que se soit sur les conditions de fixations (les conditions aux limites) et la précision de mesure et la longueur de la fissure prise.
- enfin pour des résultats plus correctes on doit prendre en compte tous les procédés de fabrication du tube dans la simulation (roulage, soudage....etc.)
- L'écart entre les résultats de calculs et de l'expérience est dû surtout au modèle d'endommagement utilisé dans les calculs, en effet les propriétés matérielles du modèle ne correspondent pas aux propriétés matérielles des tubes (limite élastique  $\sigma_e$  et limite de rupture  $\sigma_m$ ) malgré que c'est le même matériau (acier 316L) et ça est dû à l'effet d'échelle (Variation des propriétés matérielle en fonction des dimensions des pièces) :

Augmentation des dimensions → augmentation des inclusions → diminution de la résistance mécanique et vice versa.

On a en effet les différences suivantes pour le 316L [14], [18], [22] :

	Echelle de l'ordre de 0,1mm à 0.5mm	Echelle d'éprouvettes d'essai	
$\sigma_e$ (Mpa)	250	300	261
$\sigma_m$ (Mpa)	1170	580	583

Tableau (6.7)

Le modèle de calcul utilise les constantes de la 2ème colonne. En faisant les calculs avec un écrouissage cinématique et combiné sur le PARNOR6 " on constate une diminution spectaculaire de maximum de la contrainte maximale principale au cours d'un cycle mais les durées de vies ne sont pas incluses dans le domaine oligocyclique.

Les calculs de la résistance à la pression sont en bon accord avec les valeurs expérimentales en utilisant un écrouissage isotrope ce qui justifie l'utilisation de l'écrouissage isotrope dans le calcul de la durée de vie, autrement dit si l'écrouissage

isotrope donne de bons résultats pour les tests de pression il en sera de même pour les champs de contraintes et déformations en test de fatigue.

Pour résoudre convenablement le problème une nouvelle approche devra être faite dans l'avenir ou en améliorant le modèle de *Chaboche* en prenant en compte l'influence d'échelle.

X (mm)	$\sigma_1$ (cinématique)	$\sigma_1$ (isotrope)	$\sigma_1$ (combiné)
0.615	290.2	996.6	400.1
0.769	393.5	1025	520.3
0.923	427.4	1053	595.4
1.080	479.3	1080	630.6
1.230	519.1	1103	690.9

Tableau (6.8)

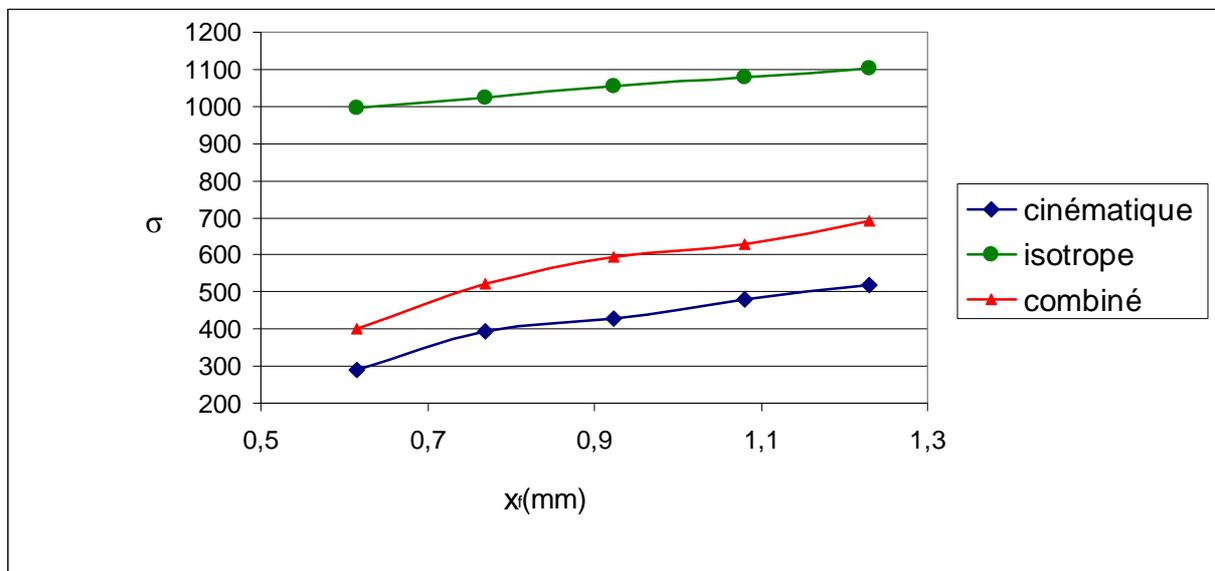
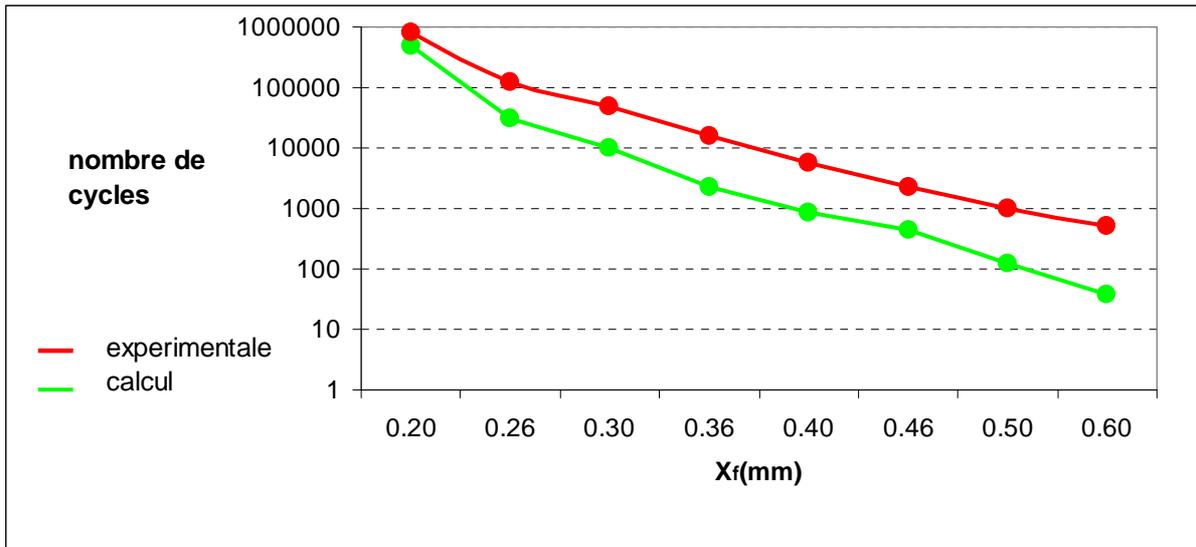


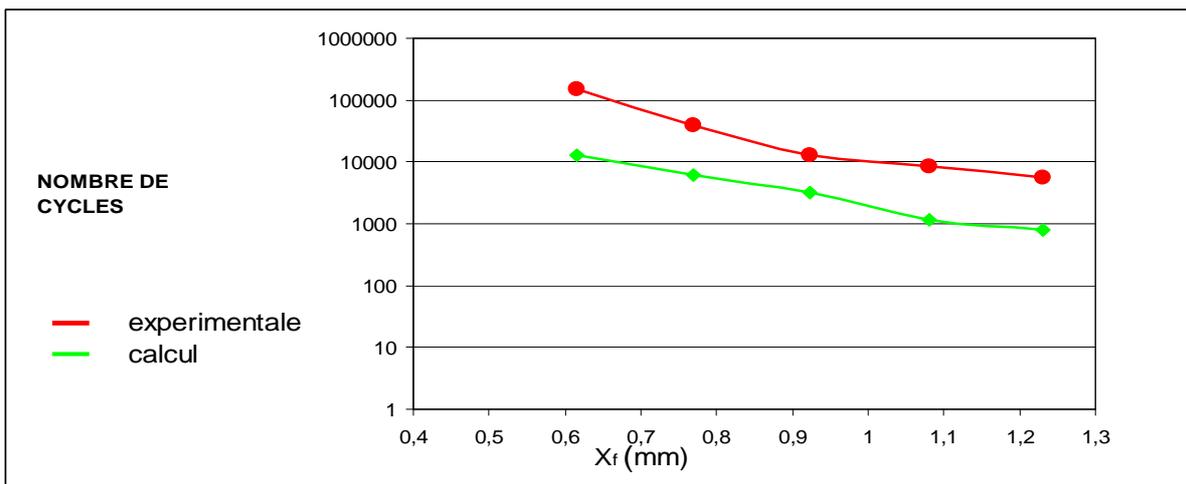
Fig (6.7) : le Maximum de la contrainte principale maximale au cours d'un cycle pour les trois modèle d'écrouissage pour différents débattements.

Toutefois, la zone la plus fragile donnée par les calculs correspond bien à l'expérience mais il n'est pas la même suivant le type de produit testé (VOIR figure VI-8):

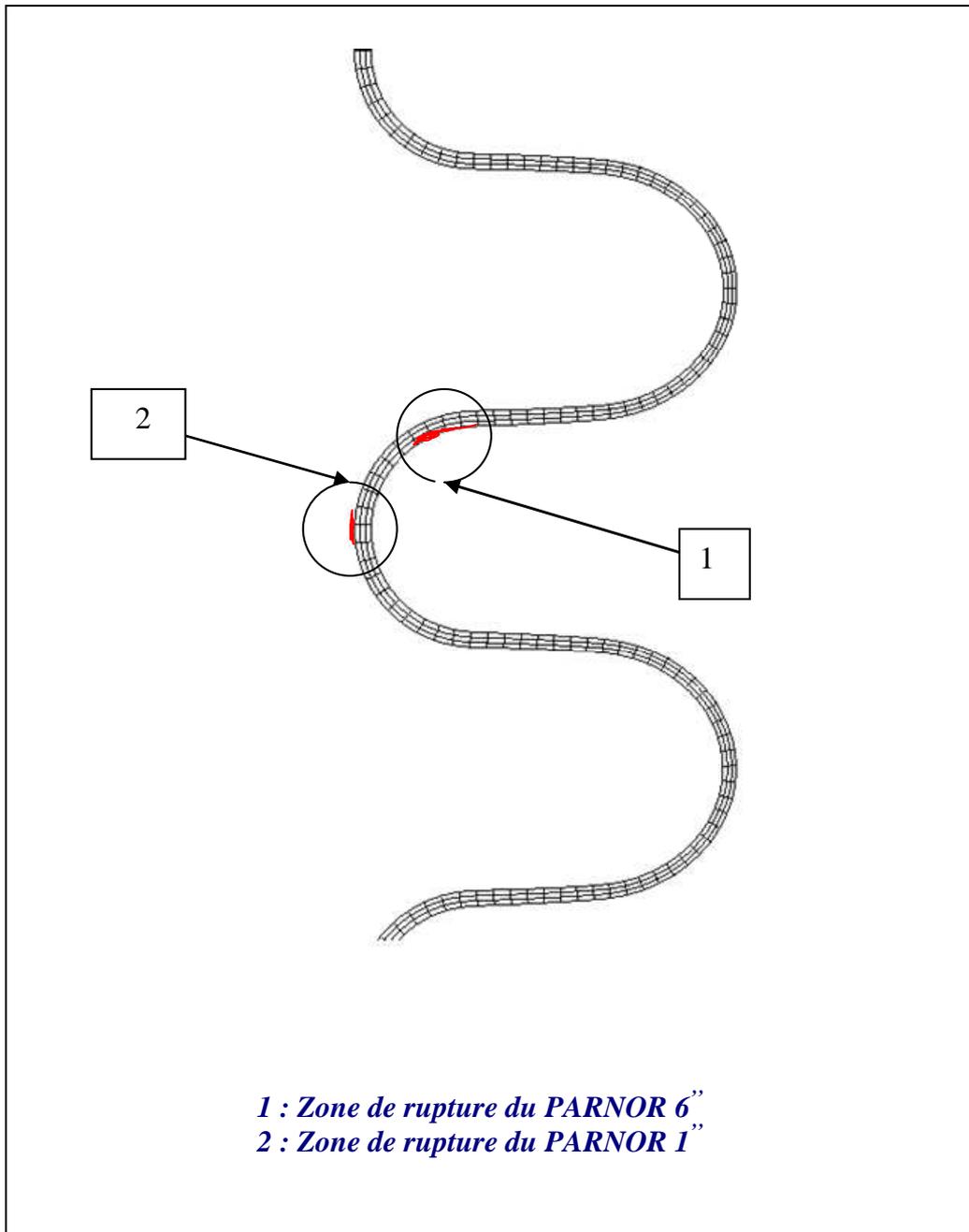
- ✓ elle se situe en creux d'onde, près de flan, sur la surface extérieure de l'onduleux pour le PARNOR 1"
- ✓ elle se situe en creux d'onde, sur la surface intérieure pour le PARNOR 6"



**Fig (6.8) :** Comparaison des essais avec les valeurs calculées par le critère d'endommagement (PARNOR 1 ")



**Fig (6.9) :** Comparaison des essais avec les valeurs calculées par le critère d'endommagement (PARNOR6 ")



**Fig (6.10):** zone des ruptures des PARNOR 1'' et PARNOR 6''

## Conclusion générale :

Cette étude concernant la fatigue des tubes onduleux est faite sur deux produits d'onduleux flexibles (diamètres 1" et 6") qui sont produits par TUBEST.

En utilisant l'érouissage isotrope on obtient des durées de vies incluses dans le domaine oligocyclique pour les deux produits (diamètres 1" et 6"), pour un érouissage cinématique ou combiné on trouve des résultats hors zone oligocyclique.

Les résultats sont meilleures que ceux de SERAM (de 3 à 20 fois) mais ils restent relativement loin de ceux trouvés par l'expérimentale, toutefois les zones les plus fragiles donnée par les calculs correspondent bien à celles de l'expérimentale (bonne localisation de la zone de fissuration).

Les caractéristiques géométriques des tubes calculées par un érouissage isotrope sont plus proches aux valeurs mesurées que celles calculées avec un érouissage cinématique ou combiné.

Les calculs de résistance à la pression effectués par **SERAM** avec un érouissage isotrope concordent bien avec l'expérience, ainsi l'érouissage isotrope décrit bien le comportement de notre matériau, donc on peut conclure que le décalage entre les calculs en fatigue et les valeurs expérimentales est dû aux caractéristiques matérielles de modèle (qui sont bien différentes, pour un même matériau, de celles de matériau en calcul : effet d'échelle).

Concernant les perspectives possibles à partir de ce travail, on propose l'amélioration de modèle de **Chaboche** en tenant compte des caractéristiques mécaniques réelles à l'échelle de notre étude (0,2 mm à 0,5 mm) en faisant l'expérimentation nécessaire.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: S.H.Zhang “*developments in hydroforming*” journal of materials processing technology, ELSEVIER, 1999
- [2]:G.Murphy “*pressure-sequence and high-pressure hydroforming*” tube and Pipe journal , 1998
- [3]: H-U.Lucke, Ch.Hartl, T.Abbey “*Hydroforming*” journal of materials processing technology, ELSEVIER, 2001
- [4]:F.U.Leitloff “*hydroforming–from feasibility analysis to series production*”, Columbus, september1997
- [5]:M.Ahmetoglu, T.Altan “*tube hydroforming: state-of-the –art and future trends*” journal of materials processing technology, ELSEVIER, 2000
- [6] : CLAUDE BATHIAS et JEAN-PAUL BAILON « *la fatigue des matériaux et des structures* » 2éme édition, HERMES, PARIS 1997
- [7]: S .S.MANSON « *Fatigue : a complex subject. Some simple approximation*” Report NASA TM-X-52084, National Aeronautics and Space Administration 1965
- [8]: R .SMITH, M .HIESCHBERT, S.S.MANSON, “*Fatigue Behavior of Materials under Strain Cyclique in low and Intermediate Life Range*” Report NASA-TD.1574.National Aeronautics and Space Administration”, (April 1963)
- [9]:L.F.COFFIN Jr “*Internal stresses and fatigue in metals*” Elsevier, New York1959
- [10]:R.CAZAUD, G.POMEY, P.RABBE et Ch.JANSSEN « *la fatigue des métaux* »5éme édition, Dunod, Paris 1969
- [11] : A .PINEAU « *Colloque GAMI* » mars1976
- [12] :P.J.E.FORSYTH « *fatigue Behaviour and its dependance on microstructure* » 15eme colloque de métallurgie de Saclay, juin 1972
- [13] : J- L CHABOCHE « *sur les effets d’interaction de l’écrouissage et de l’endommagement dans l’acier 316L* », Rech.Aérosp, Mai-juin 1980
- [14] : Jean LEMAITRE, Jean-Louis CHABOCHE « *mécanique des matériaux solides* »3éme édition, 2001
- [15]: Lu J, “*Handbook of Measurement of Residual Stresses*” Bethel, Society for Experimental Mechanics. 1996
- [16] Noyan IC, Cohen JB “*Residual stresses*”. Stuttgart: Springer-Verlag. 1987
- [17] : HIBBITT, KARLSON &SORENSEN « *ABAQUS version 6.5 documentation* »2004

- [18] :J.M.SPRAUEL « *détermination des constantes élastiques radiocristallographiques d'un acier inoxydable austénitique* » thèse 3ème cycle, université PARIS-SUD 1980
- [19]: C.GAIER, K. KOSE, H.HEBISCH, G. PRAMHAS “*coupling forming simulation and fatigue life prediction of vehicle components*” IWKA, Germany
- [20]:G.R.Irwin, H.Tada, P.C.Paris “*the stress analysis of cracks*” handbook.Del Research, 2nd (Paris production inc., st.louis, 1985)
- [21]:J.SCHIVE-INT.J.Series I, Japan Soc. Mech. Eng., vol36, N°3, 1991
- [22]:M.MINEUR, P.Villechaise, J.Mendez “*Influence of the crystalline texture on the fatigue behaviour of a 316L austenitic stainless steel*” materials science and engineering, ELSEVIER , 2000
- [23] technique d'ingénieur "essai de fatigue " M4 170

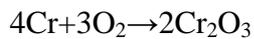
# ANNEXES

ACIERS INOXYDABLES : ce sont des alliages de fer et de carbone auquel on vient d'ajouter du chrome et d'autres éléments notamment le nickel.

En plus de la résistance à la corrosion qui caractérise les aciers inoxydables, ils possèdent une qualité déterminante qui est la résistance mécanique.

L'élément d'alliage auquel les aciers inoxydables doivent leur principale caractéristique est le chrome qui est en particulier très oxydable mais son oxyde forme une véritable peau à la fois transparente et protectrice. allié au fer et au nickel il forme un composé de surface :

Le chrome et le nickel s'oxyde comme suit :



Il existe de très nombreuses nuances d'acier inoxydables et le choix est parfois difficile car ils n'ont pas tous le même comportement dans un milieu donné.

Rôle des éléments d'addition :

Chrome : résistance des aciers inoxydables aux agents oxydants

Nickel : résistance à la corrosion (à éviter dans le domaine des frottements)

Le molybdène et le cuivre : résistance à la corrosion

Tungstène : améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables

La composition chimique de l'acier inox austénitique 316l (% de masse) est comme suit :

L'élément	F	Cr	Ni	C	N	Mn	Si	S	P	Mo	Cu	B	Co	As
% masse	65.971	17.45	11.90	0.022	0.069	1.69	0.31	0.002	0.023	2.25	0.11	0.009	0.19	0.004

**PROGRAMME CALCULANT LA DUREE DE VIE**

Program *safelife*

```
real S (4445, 4)
real NOEUD (4445)
real pe(4445)
real l(4445),z(4445)
real C(4445),m(4445),x(4445),w(4445),p(4445),q(4445)
real n(4445),v(4445),mi(4445),B(4445)
real a,b0,k2,cu0,k1,p0,k3,m0,t,node,ll,hh,cc,mm
open(unit=12,file='stress.dat',status='old')
open(unit=11,file='strain.txt',status='old')
open(unit=9,file='max.txt',status='unknown')
open(unit=8,file='moy.txt',status='unknown')
open(unit=7,file='DUREEDEVIE.TXT',status='unknown')
open(unit=6,file='VIES.TXT',status='unknown')
open(unit=5,file='min.TXT',status='unknown')
```

**C \*\*\*\*\* LES COEFFICIENTS DE L'ACIER316L \*\*\*\*\***

```
b0=0.25
a=0.9
K2=2.2
cu0=580
k1=0.4
p0=222
k3=1.6
M0=1650
t=5
```

**C \*\*\*\*\* LECTURE DE FICHIER RESULTAT \*\*\*\*\***  
**CONTRAINTES\*\*\*\*\***

```
Do 1 j=1, 4
Do 1 i=1, 1767
READ (12,*) NOEUD (i), S (i, j)
1 continue
```

Close (12)

**C\*\*\*\*\*LECTURE DE FICHIER RESULTAT  
DEFORMATIONS\*\*\*\*\***

Do 50 i=1, 1767

READ (11,\*) NOEUD (i), PE (i)

50 continue

Close (11)

**C \*\*\*\*\* RECHERCHE DE LA CONTRAINTE MAXIMALE A  
\*\*\*\*\***

**C \*\*\*\*\* CHAQUE NOEUD AU COURS DE CYCLE DE FATIGUE  
\*\*\*\*\***

DO 2 i=1, 1767

l(i)=s(i,1)

do 3 j=1,4

if (s(i,j).GT.l(i)) l(i)=s(i,j)

3 CONTINUE

2 CONTINUE

**C\*\*\*\*\* ECRITURE DE TABLEAU DES CONTRAINTES MAXIMALES \*\*\*\*\***

**C\*\*\*\*\* POUR CHAQUE NOUED AU COURS D'UN CYCLE \*\*\*\*\***

DO 6 I=1, 1767

WRITE (9,\*) l (i)

6 CONTINUE

CLOSE (9)

**C\*\*\*\*\* RECHERCHE DE LA CONTRAINTE MINIMALE à CHAQUE \*\*\*\*\***

**C\*\*\*\*\* NOEUD AU COURS D'UN CYCLE \*\*\*\*\***

DO 34 i=1,1767

mi(i)=S(i,1)

do 33 J=1,4

if(s(i,j).lt.mi(i)) mi(i)= s(i,j)

33 CONTINUE

34 CONTINUE

**C\*\*\*\*\* ECRITURE DE LA CONTRAINTE MINMALE \*\*\*\*\***

**C\*\*\*\*\* à CHAQUE NŒUD AU COURS DE CYCLE \*\*\*\*\***

DO 55 i=1,1767

WRITE(5,\*) mi(i)

55 continue

close(5)

**C\*\*\*\*\* CALCUL DE LA MOYENNE DE LA CONTRINTE \*\*\*\*\***

**C\*\*\*\*\* AU COURS D'UN CYCLE POUR CHAQUE NOUED\*\*\*\*\***

c(i)=0

do 70 i= 1,1767

do71 j=1,4

c (i)=l(i)+mi(i)

c(i)=c(i)/2

71 CONTINUE

70 CONTINUE

**C\*\*\*\*\* ECRITURE DE LA CONTRAINTE MOYENNE AU COUR DE CYCLE\*\*\*\*\***

DO 16 I=1,1767

WRITE(8,\*) C(i)

16 CONTINUE

CLOSE(8)

**C \*\*\*\*\* CALCUL DE LA DUREE DE VIE POUR CHAQUE NŒUD\*\*\*\*\***

DO 90 i=1,1767

z(i)=SQRT(PE(i))

m(i)=m0\*(1+K3\*z(i))

p(i)=c(i)+P0\*(1+k1\*z(i))\*(1-b0\*(c(i)/cu0))

q(i)=cu0\*(1+K2\*Z(i))

x(i)=(l(i)-p(i))/(q(i)-l(i))

if (x(i)) 87,87,88

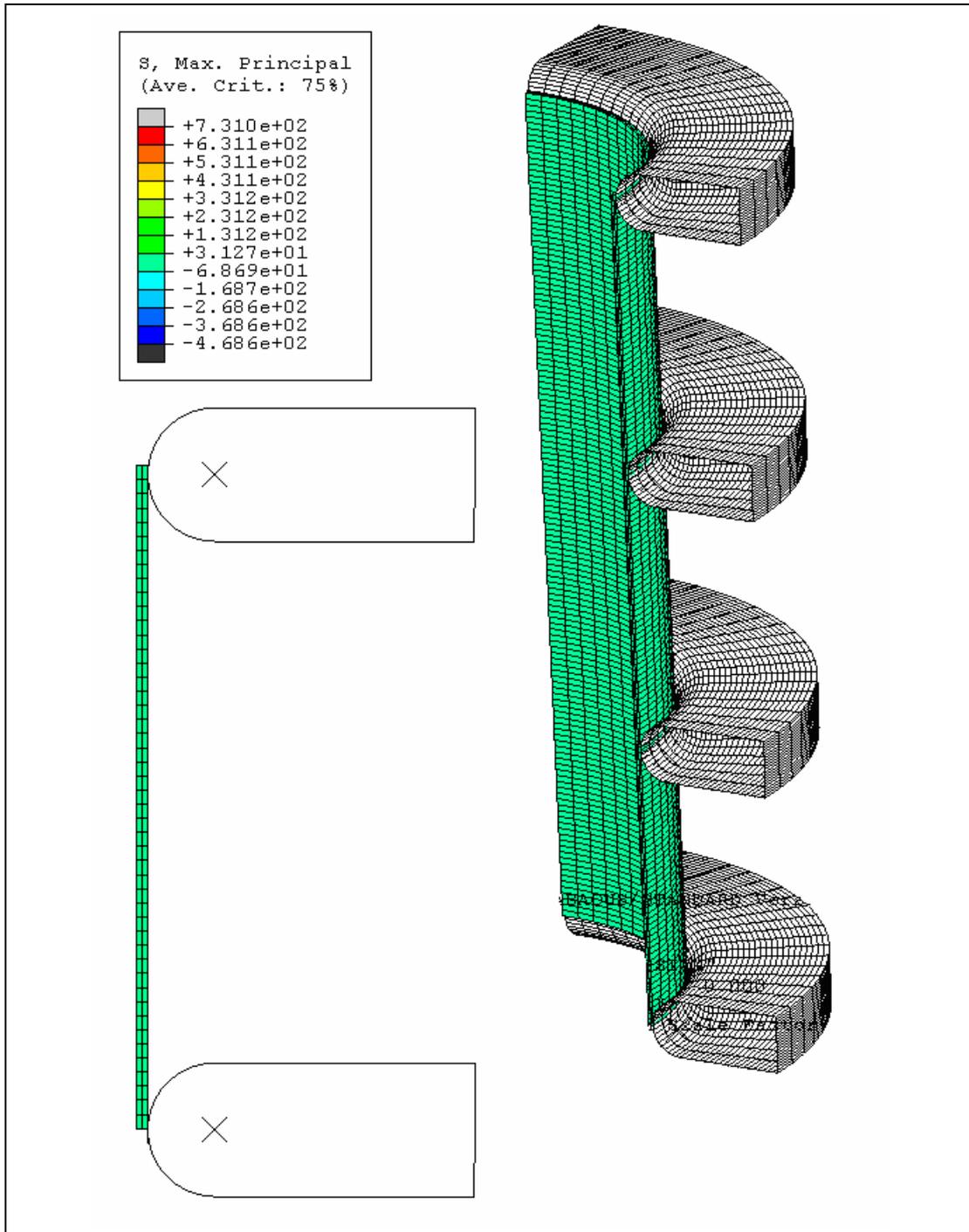
87 x(i)=0

```

88  x(i)=x(i)
B (i)=a*x(i)
56  v (i) = (l (i)-c (i))
w(i)=(m(i)/v(i)**t
if(b(i).GT.10**(-8)) THEN
n(i)= w(i)/((t+1)*b(i))
ELSE
n(i)=20000000
ENDIF
90  Continue
DO 96 i=1,1767
WRITE(6,*) N(i)
96  CONTINUE
CLOSE(6)
C*****RECHERCHE DE LA DUREE DE VIE MINIMALE*****
min=1000000000
noeud=1
DO 99 i=1,1767
if (min.GE.n(i))then
min=n(i)
node=i
hh=pe(i)
ll=l(i)
cc=c(i)
mm=mi(i)
else
goto 99
ENDIF
99  CONTINUE
WRITE(7,*)min,node,ll,cc,hh
51  FORMAT(2X,'la durée de vie est',F10.4,'au point',i6,2X,'maximum
* stress',F10.4,2X,'MOY STRESS',F10.4,2X,'initial strain',F10.4)
stop
end

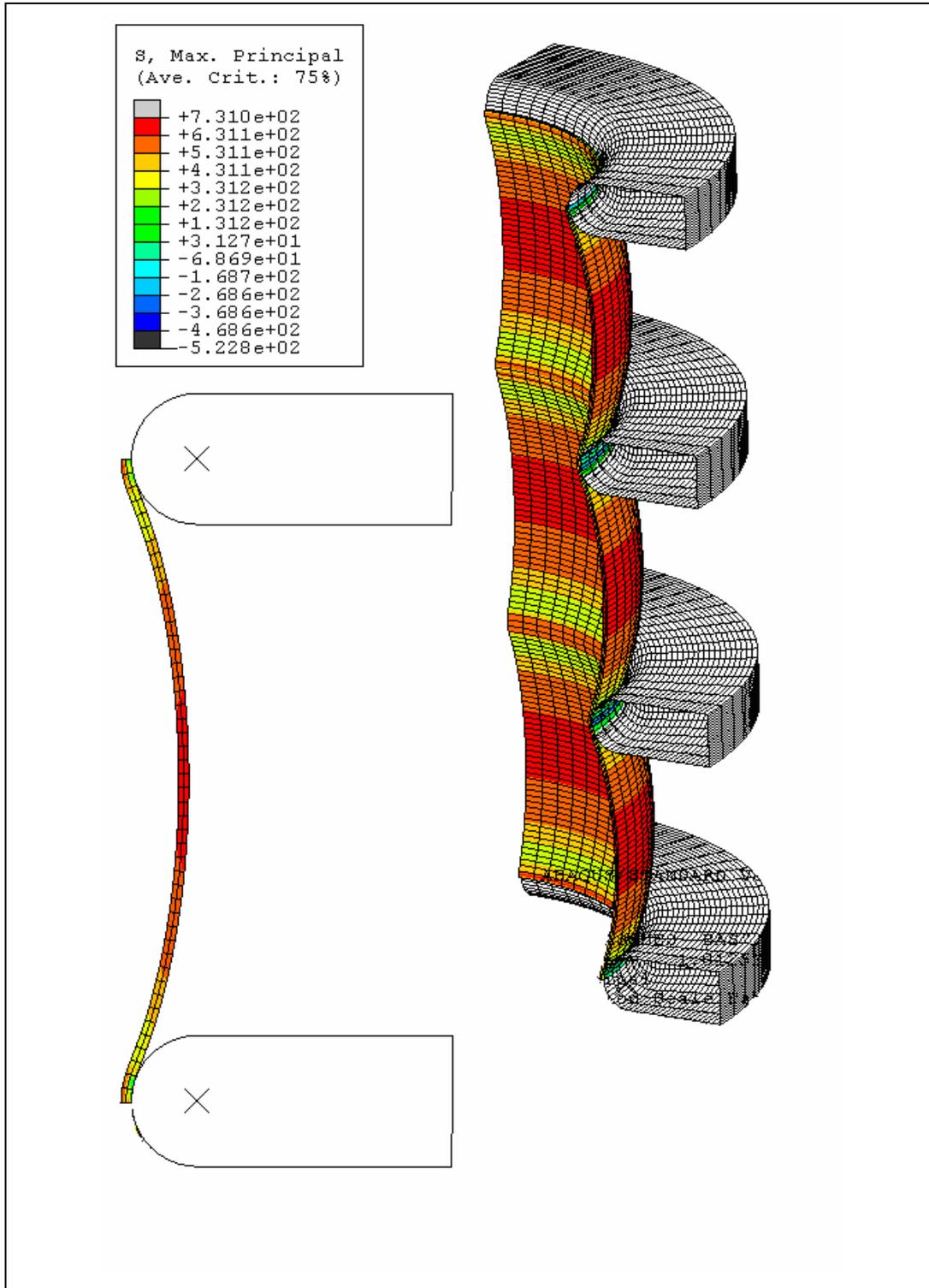
```

**LES ETAPES DE MISE EN FORME , PARNOR 1POUCE , Ecouissage isotope**



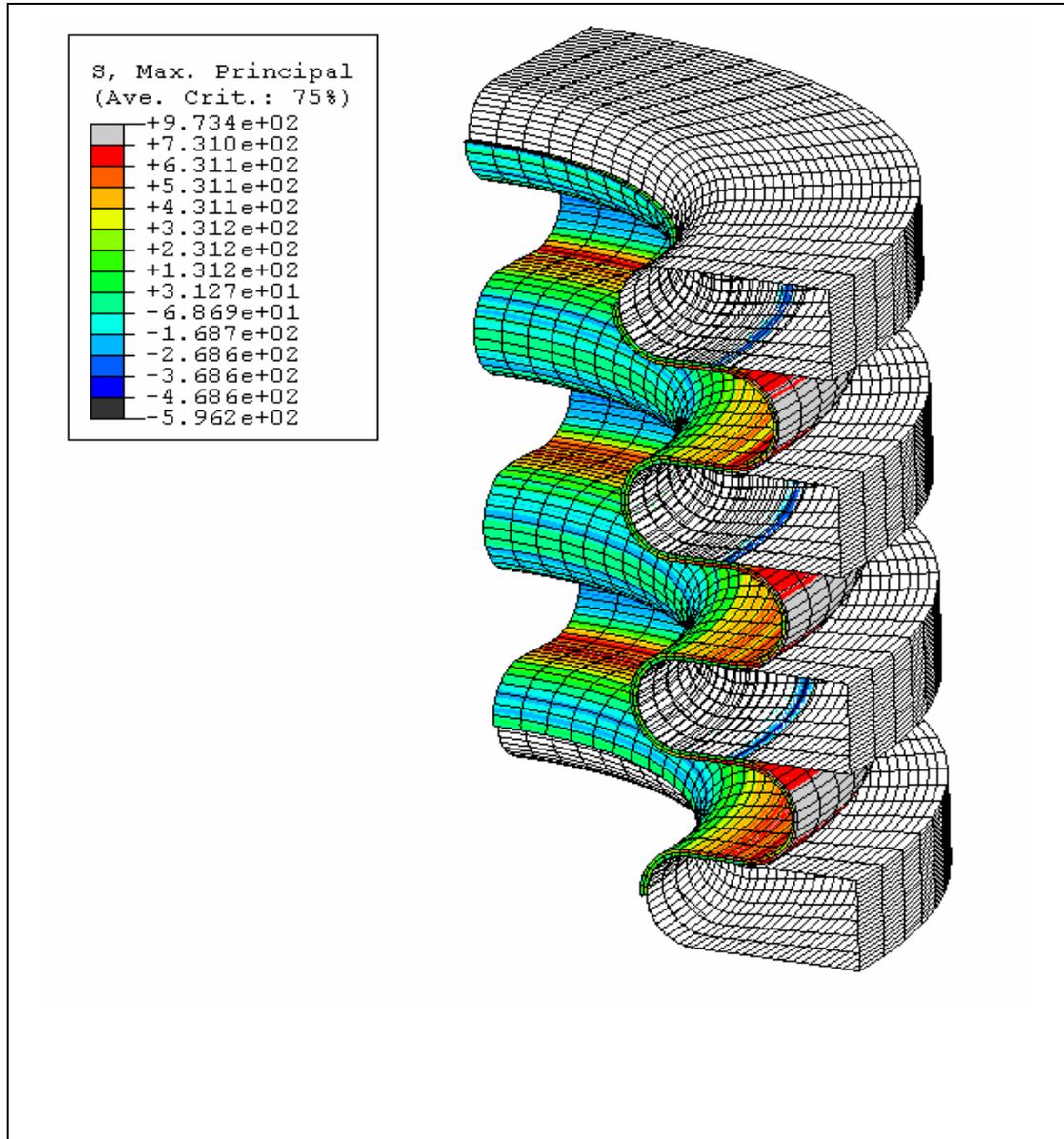
Mise en contact des flasque : pas de pression interne

*LES ETAPES DE MISE EN FORME , PARNOR 1POUCE , Ecrouissage isotope*



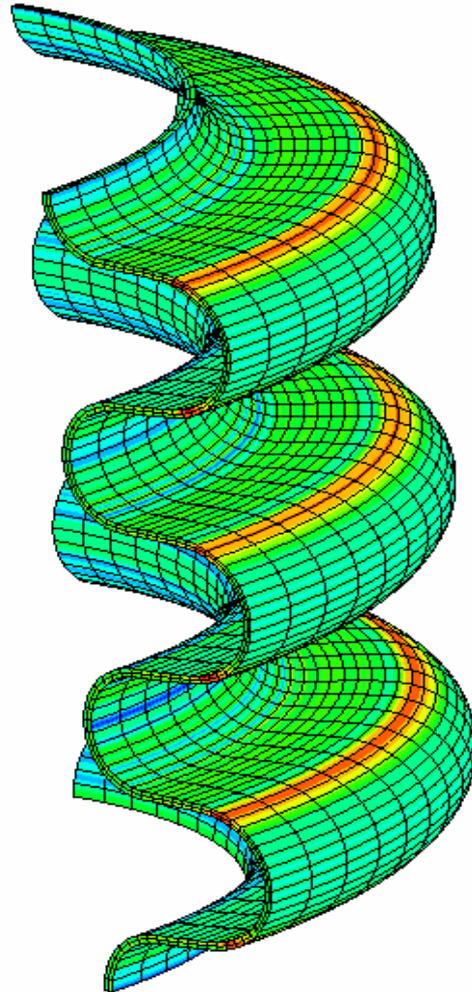
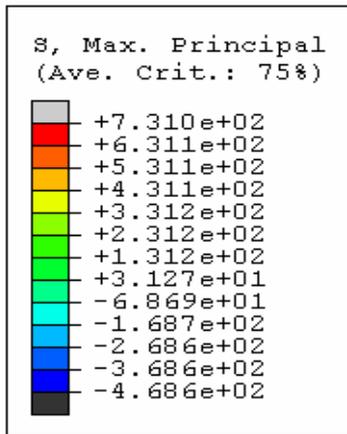
A la fin de préformage

*LES ETAPES DE MISE EN FORME, PARNOR IPOUCE, Ecrouissage isotope*



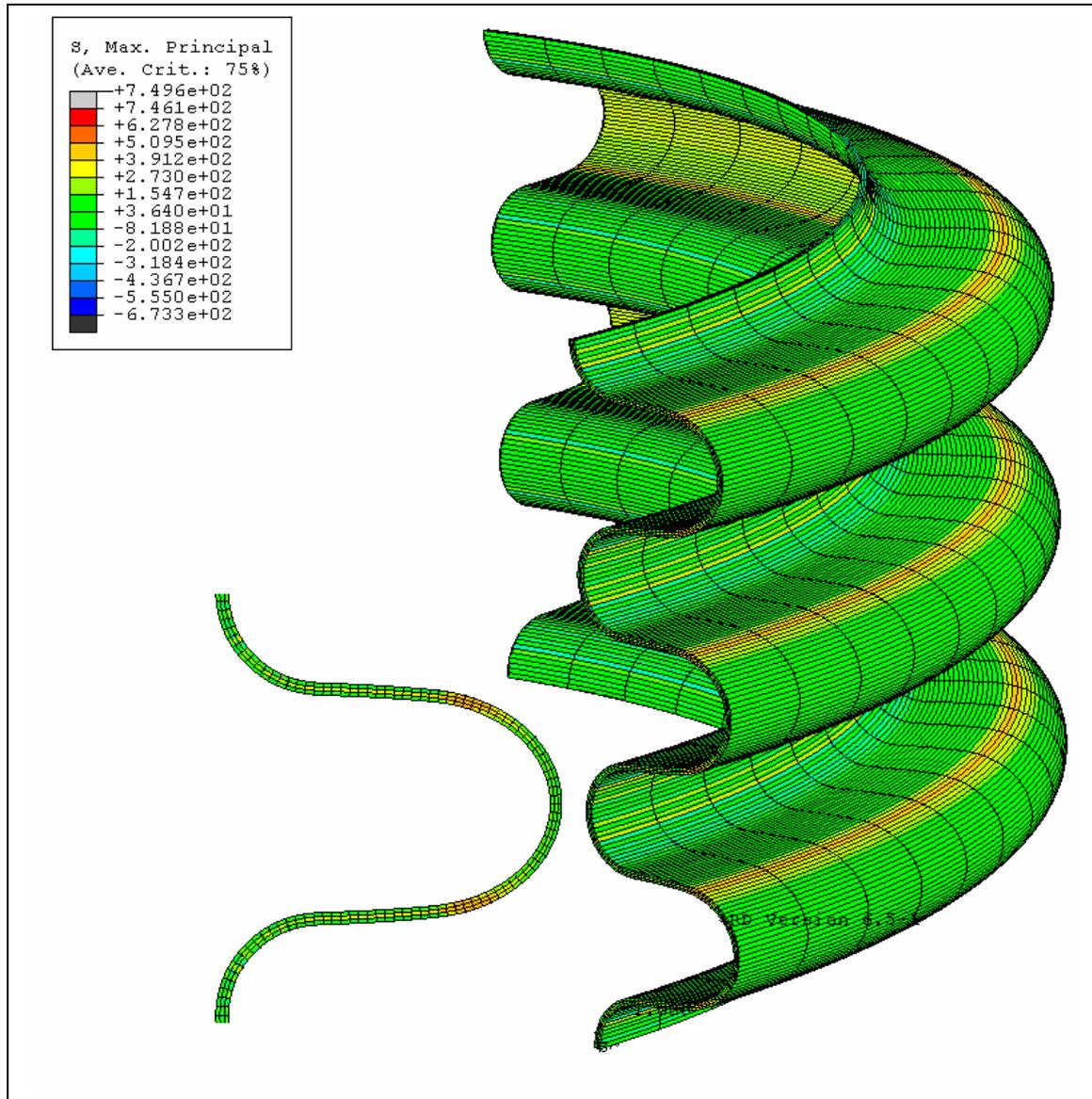
Après le relâchement de la pression

*LES ETAPES DE MISE EN FORME, PARNOR 1POUCE, Ecroissage isotope*



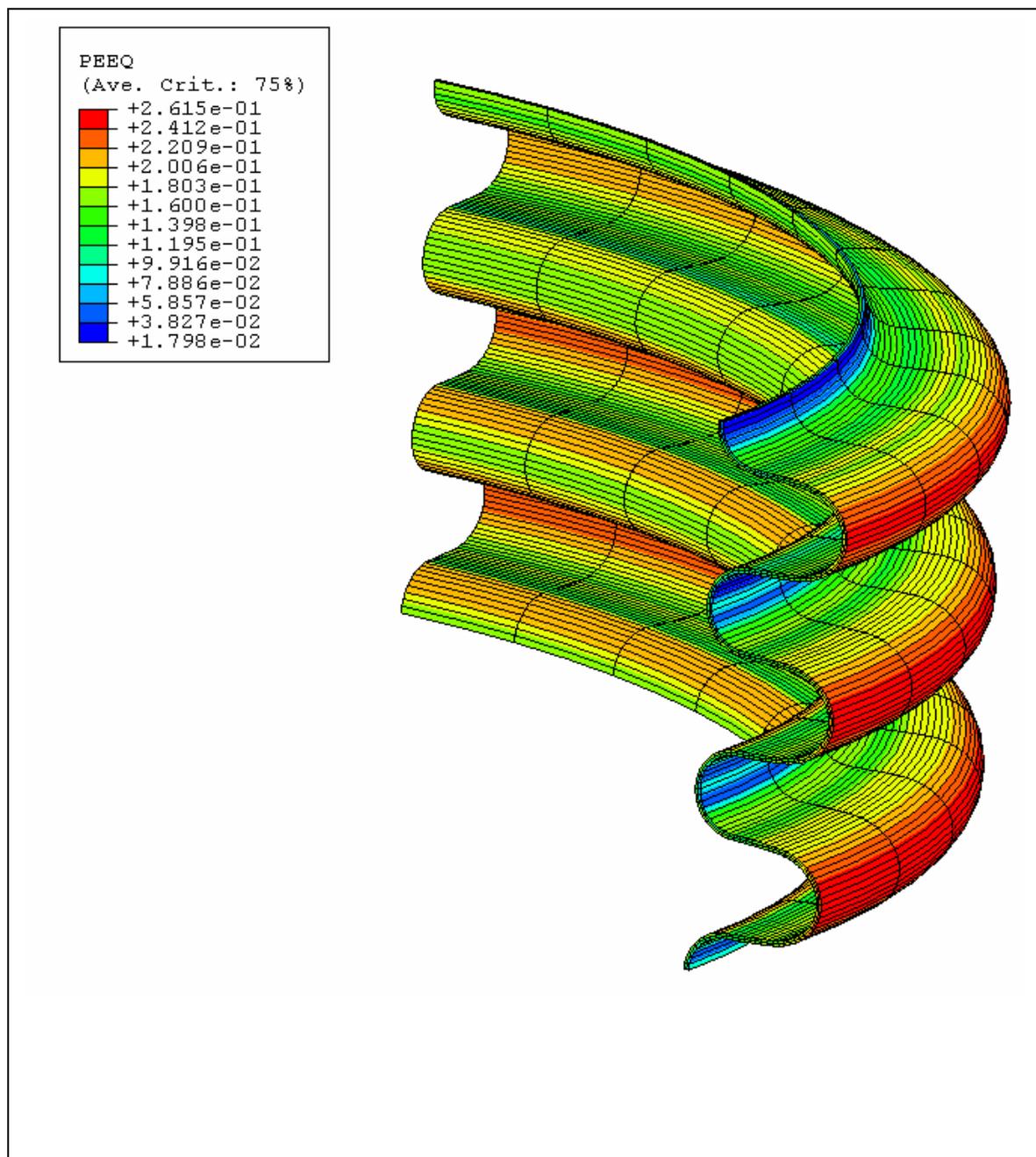
A la fin de l'hydroformage : *contraintes résiduelles*

**MISE EN FORME , PARNOR 6POUCE , Ecouissage isotope**



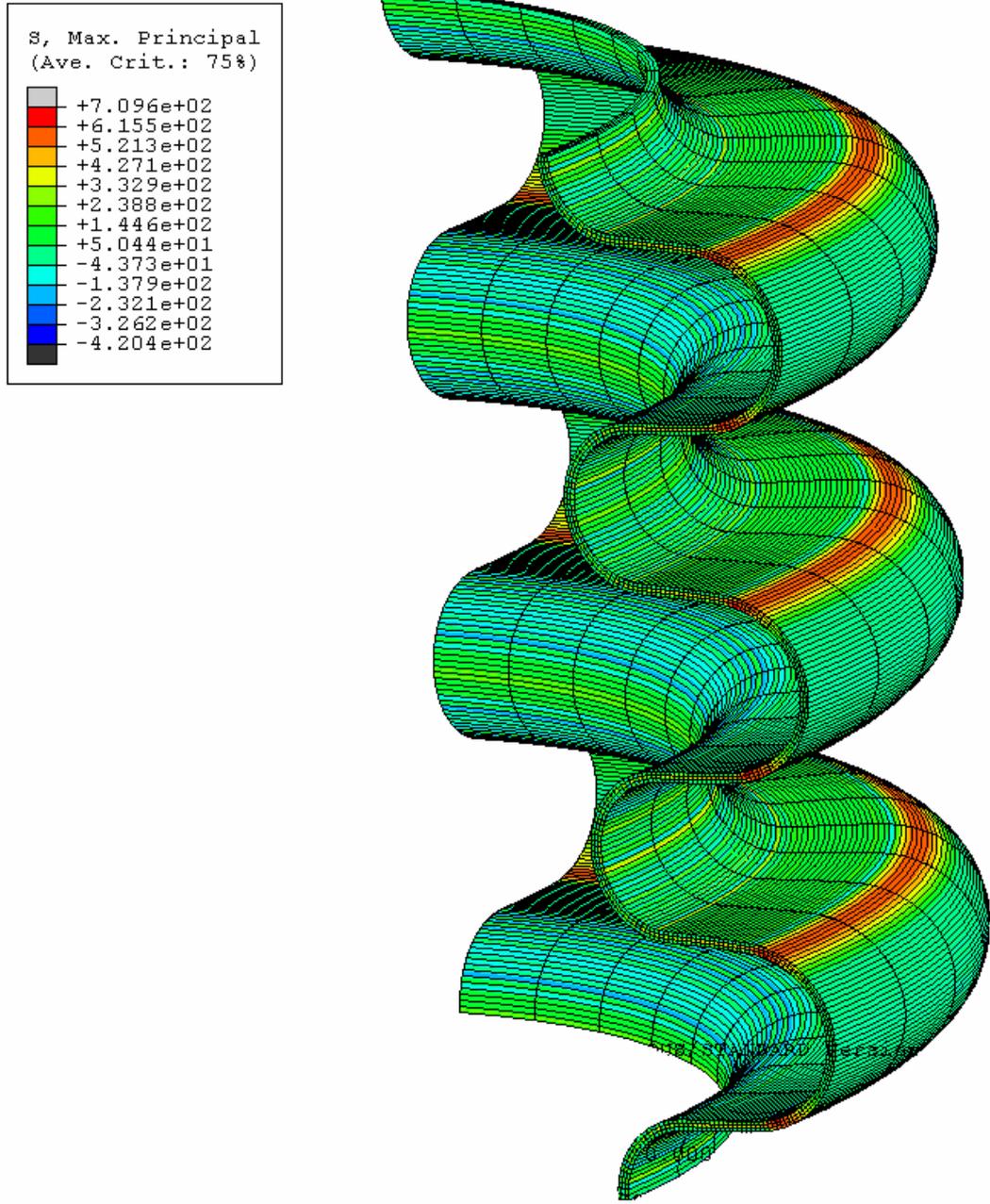
A la fin de l'hydroformage : *contraintes résiduelles*

*MISE EN FORME , PARNOR 6POUCE , Ecouissage isotope*



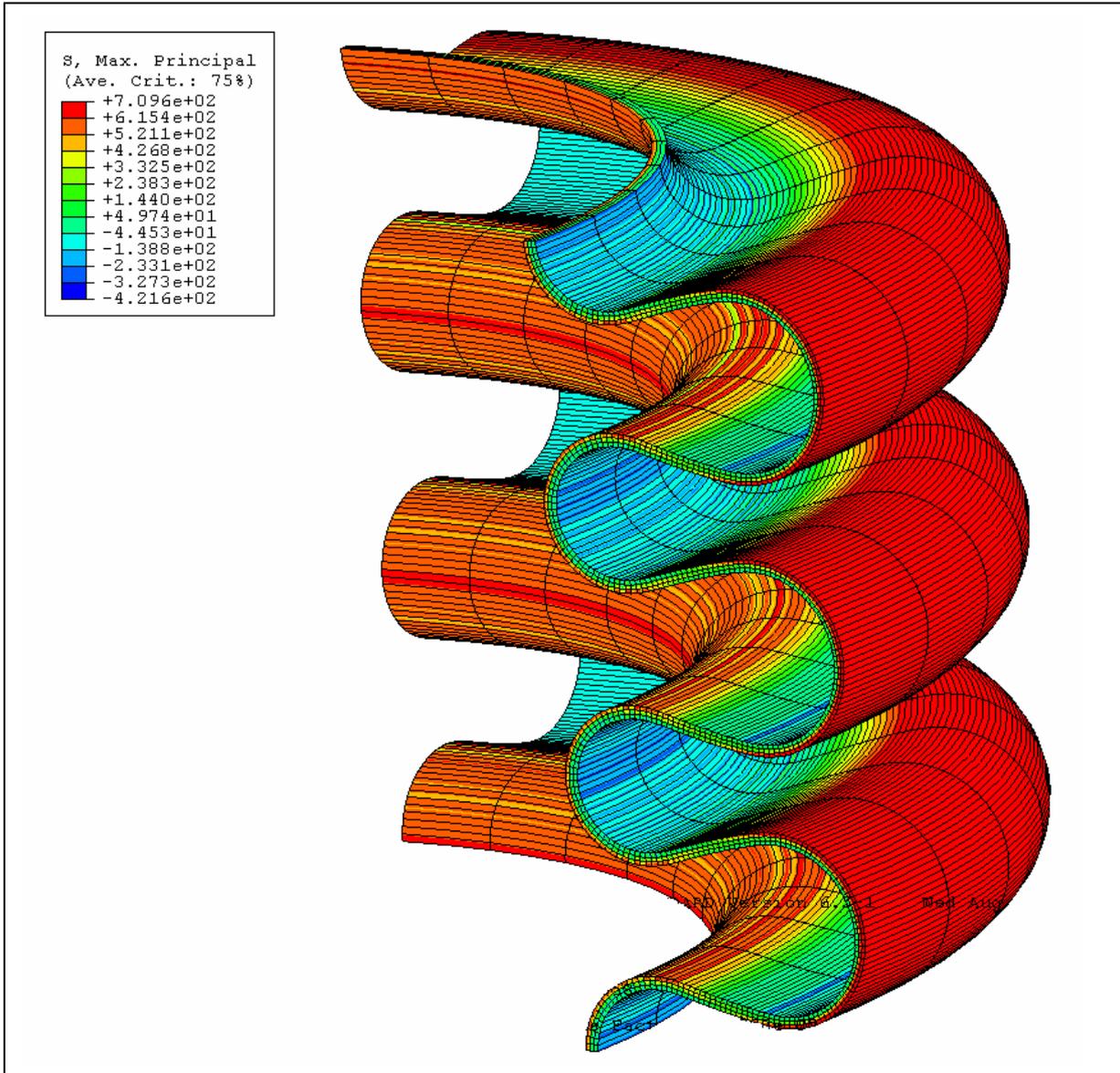
A la fin de l'hydroformage : *déformations résiduelles équivalentes*

*PARRAP 1 POUCE, écouissage isotrope*



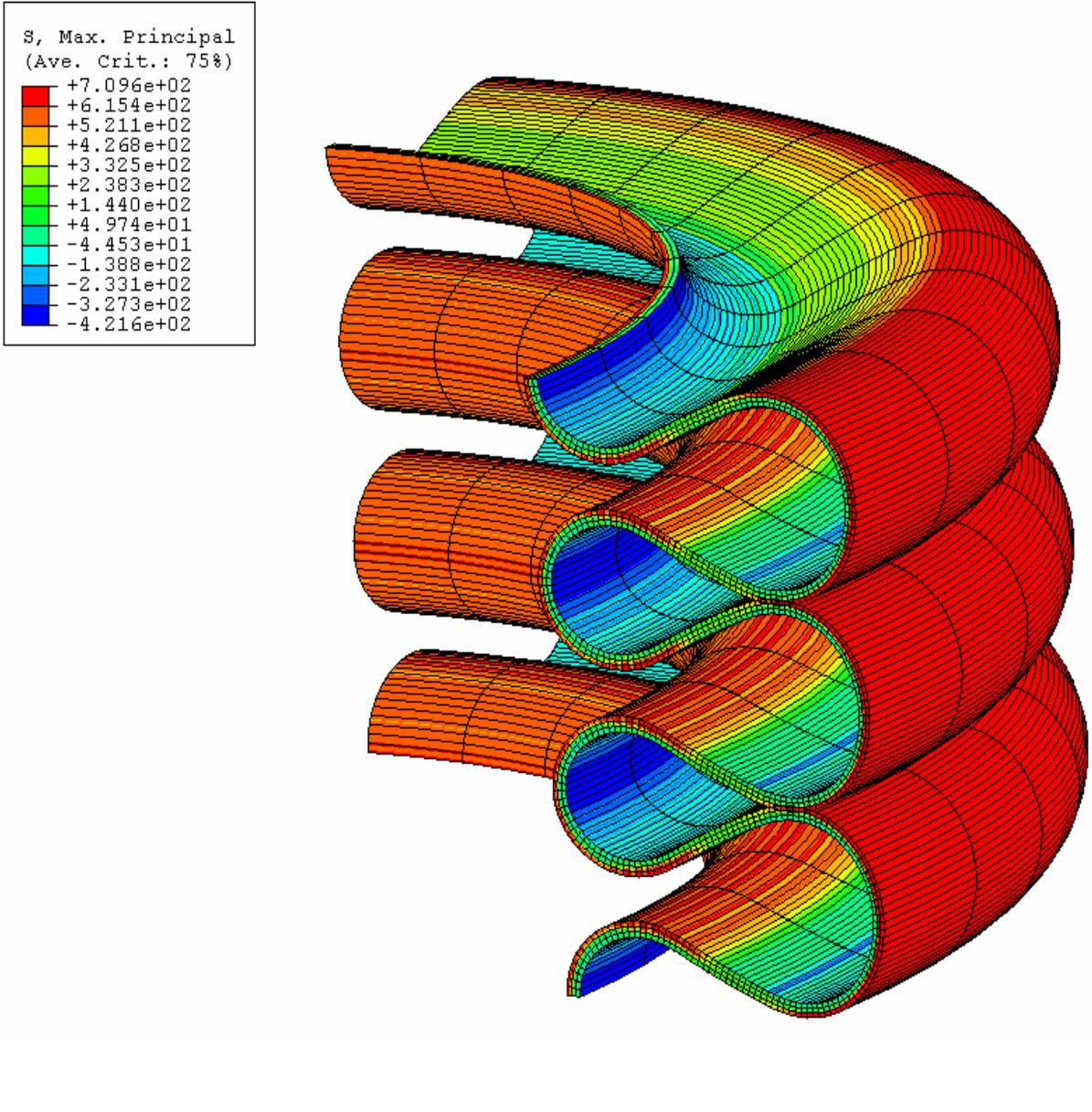
**Avant la compression**

*PARRAP 1 POUCE , écoulement isotrope*



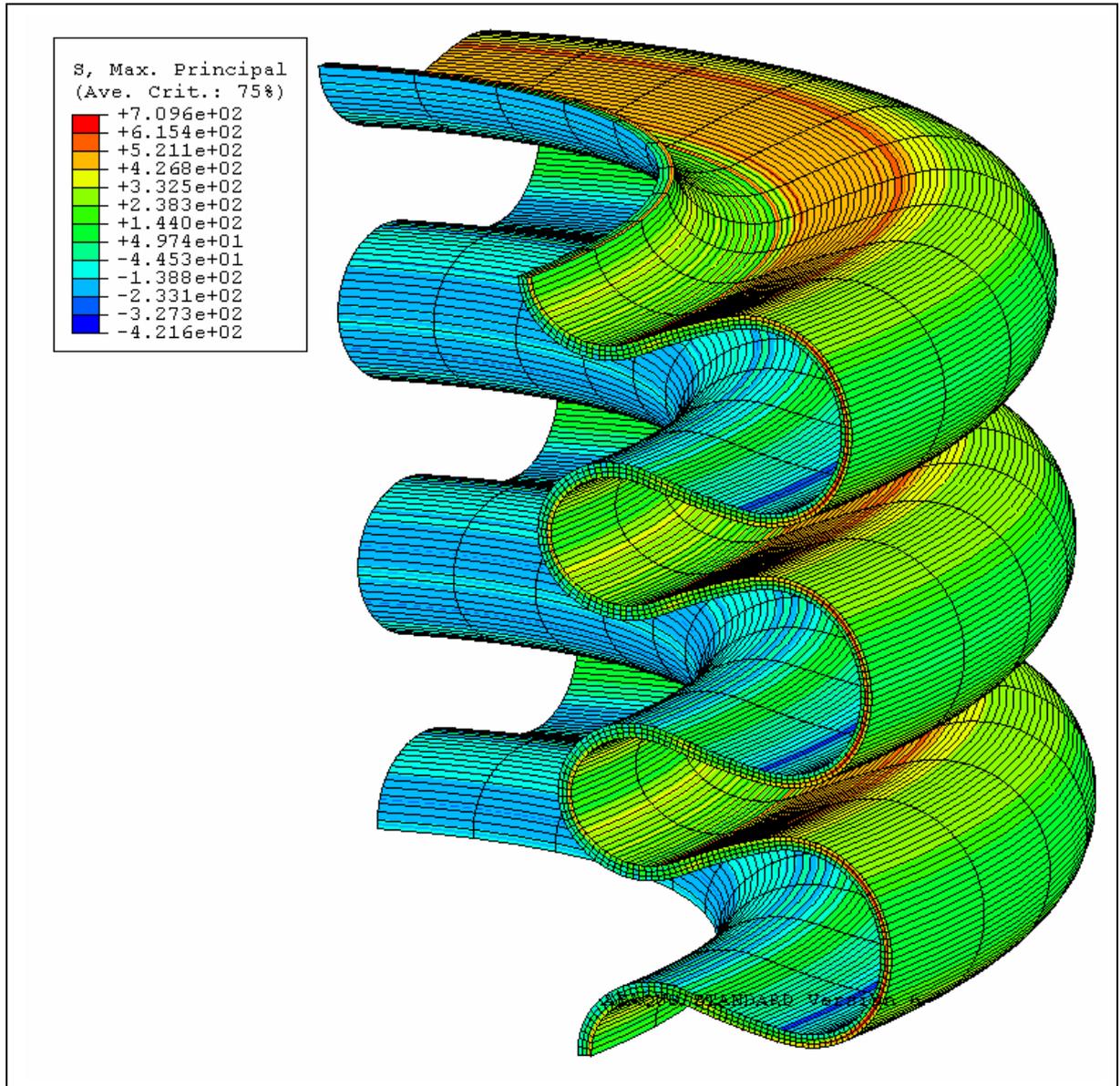
**Au cours de la compression**

*PARRAP 1 POUCE , écouissage isotrope*



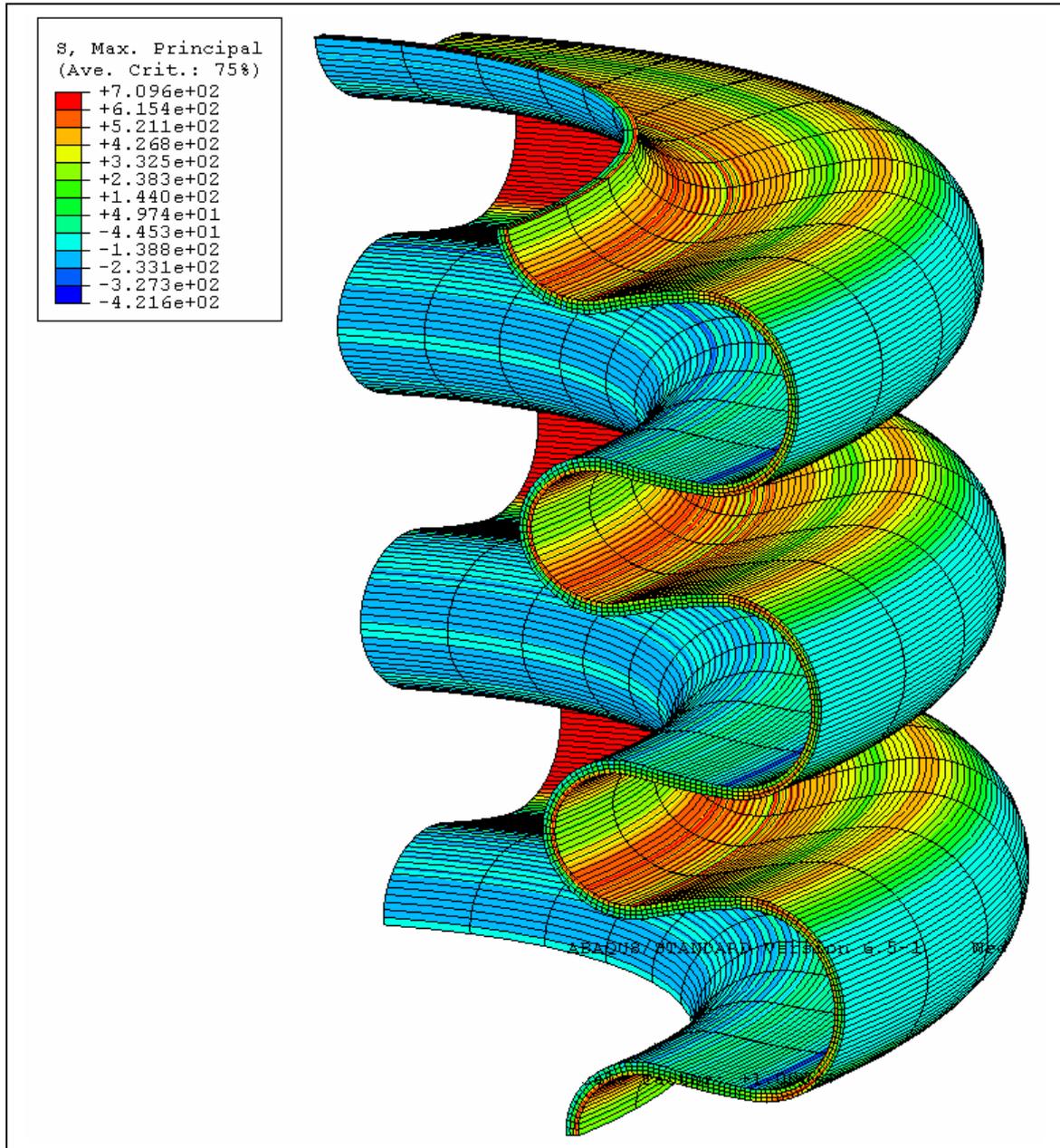
**A la fin de la compression**

*PARRAP 1 POUCE , écoulement isotrope*



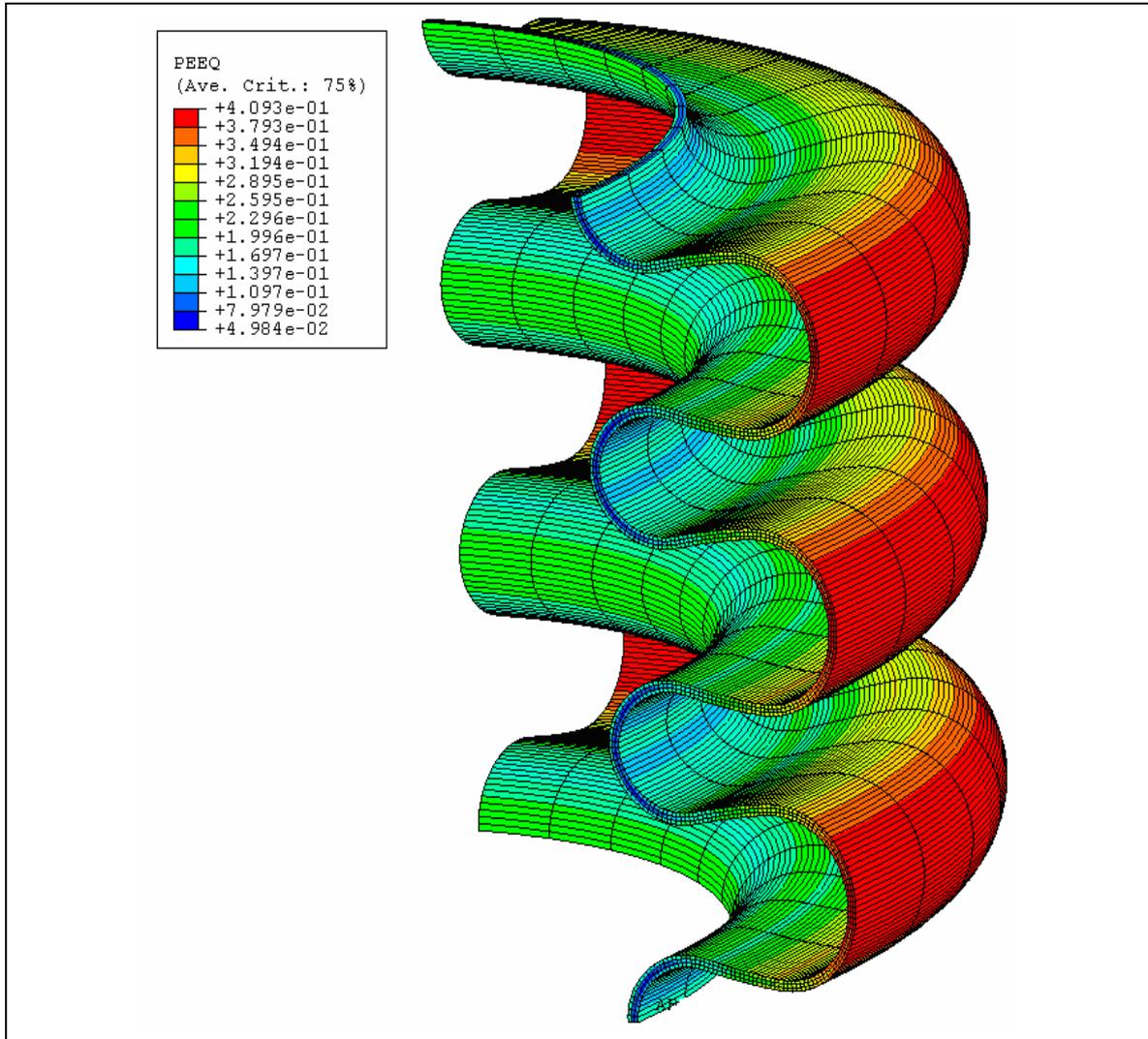
**Au cours de l'étirement**

**PARRAP 1 POUCE , écouissage isotrope**



**A la fin de l'étirement : contraintes résiduelles de PARRAP1''**

*PARRAP 1 POUCE , écouissage isotrope*



**A la fin de l'étirement : Déformation résiduelles équivalentes : PARRAP**

