



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

**En : Génie Civil**

**Spécialité : structures**

**Par : Menai Hamza**

**Sujet**

**Analyse du comportement des pièces sous sollicitation  
cycliques alternées**

Présenté et soutenu publiquement, le ..... / 06 / 2021, Devant le jury composé de :

**Président :** Mr. ATHAMNIA IBRAHIM

**Rapporteur :** Mr. AYEB BELKHIR

**Examineurs :** Mr. BOULAARAS SAIDE

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

Je remercie mon encadreur Mr AYEB BELKHIR pour ses conseils et pour m'avoir honoré en acceptant de diriger ce travail.

J'exprime ma reconnaissance à mes amis qui m'ont encouragé et m'ont aidé dès le début.

Pour finir, j'adresse mes remerciements aux membres du jury et l'Université "LARBI TEBESSI- TEBESSA " et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

## Liste des symboles

Symbols	Définition
A	Longueur de la fissure
$\sigma_1 \sigma_2$	Contrainte appliqué da/dN vitesse de fissuration
$a_0$	Longer de fissure initiale
A et m	constantes propres au matériau qui dépendant de l'environnement, de la fréquence et du rapport (R)
R	Rapport
$\Delta K$	Variation du facteur d'intensité de contrainte à l'extrémité de la fissure
$\sigma_a, S$	Amplitude de contrainte
$\sigma_m$	Contrainte moyenne
$\sigma_{max}$	Contrainte maximale
$\sigma_{min}$	Contrainte minimale
$\Delta\sigma$	Etendue de contrainte
N	Nombre de cycle
$R_m$	Résistance à la rupture à la traction
$\sigma_D$	Limite de fatigue conventionnelle
Nr	durée de vie
Nf	Nombre de cycle à la rupture
$\beta, C$	Constante caractéristique du comportement du matériau
$\Delta\epsilon^P$	Déformation plastique

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b>	Détail des principales causes qui ont conduit à des dégâts.
<b>Tableau 3.1</b>	Contrainte et charge maximale en flexion en fonction de cycles –section circulaire-.
<b>Tableau 3.2</b>	Contrainte et charge maximale en flexion en fonction de cycles –section carrée-.
<b>Tableau 3.3</b>	Contrainte et charge maximale en flexion en fonction de cycles –section rectangulaire-.
<b>Tableau 3.4</b>	Contrainte et charge maximale en traction- compression en fonction de cycles –section circulaire-.
<b>Tableau 3.5</b>	Contrainte et charge maximale en traction- compression en fonction de cycles –section carrée-.
<b>Tableau 3.6</b>	Contrainte et charge maximale en traction- compression en fonction de cycles –section rectangulaire-.
<b>Tableau 3.7</b>	Relation entre résistance statique $R_m$ et limite d'endurance $\sigma_D$ en Flexion.
<b>Tableau 3.8</b>	Relation entre résistance statique $R_m$ et limite d'endurance $\sigma_D$ en (compression- traction).

## Liste des figures

**Figure 1.1** Évolution du nombre de ponts structurellement défectueux au Québec.

(Tirée de MTQ, 2005).

**Figure 1.2** Taux de ponts structurellement défectueux aux États-Unis.

(Tirée de U.S. Department of Transportation, 2003).

**Figure 1.3** Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique.

**Figure 1.4** Modélisation du chargement appliqué par les mains sur le fil d'acier.

**Figure 1.5** Rupture au niveau d'une charpente métallique.

**Figure 1.6** Fissuration d'un pont.

**Figure 1.7** Description d'un mécanisme de fatigue.

**Figure 1.8** Courbe de la longueur de la fissure(a) en fonction de nombre de cycle(N).

**Figure 1.9** Représentation schématisée de la  $da/dN$  en fonction du  $\Delta K$  (en échelle log).

**Figure 1.10** Contrainte sinusoïdale à amplitude constante.

**Figure 1.11** Contrainte sinusoïdale à amplitude variable.

**Figure 1.12** Contrainte aléatoire.

**Figure 1.13** Cycle de contrainte sinusoïdale.

**Figure 1.14** La contrainte non complètement renversée est la résultante de deux contraintes l'une complètement renversée et l'autre constante.

**Figure 1.15.1** sollicitations répétées de compression.

**Figure 1.15.2** sollicitations purement alternées.

**Figure 1.15.3** sollicitations répétées de traction.

**Figure 1.16** Courbe Wöhler.

- Figure 1.17** Courbe de Wöhler de l'acier S235JR.
- Figure 2.1** Combinaison fibres et polymère d'un MCA.
- Figure 2.2.1** État de contraintes et contraintes principales dans une poutre non fissurée.
- Figure 2.2.2** Direction des contraintes principales de compression.
- Figure 2.2.3** Types de fissures dans une poutre en béton armé.
- Figure 2.2.4** Modes de rupture dans une poutre très profonde,  $a/d < 1$ .  
(Tirée de ASCE-ACI Task Committee 426, 1973).
- Figure 2.2.5** Modes de rupture dans une poutre profonde,  $1 < a/d < 2,5$ .  
(Tirée de ASCE-ACI Task Committee 426, 1973)
- Figure 2.2.6** Modes de rupture dans une poutre élancée,  $2,5 < a/d < 6$ .  
(Tirée de ASCE-ACI Task Committee 426, 1973).
- Figure 3.1** modélisation de la géométrie.
- Figure 3. 2** données de la section transversale.
- Figure 3. 3** longueurs de la pièce.
- Figure 3.4** Présentation de la pièce.
- Figure 3.5** Déclaration de la masse volumique.
- Figure 3.6** Module de Young ,Coefficient de poisson.
- Figure 3.7** Contrainte, déformation plastique.
- Figure 3.8** Contrainte principal maximale.
- Figure 3.9** Coefficient de viscosité.
- Figure 3.10** Assemblage.
- Figure 3.11** Activer la fatigue, Entrer le nombre de cycle.

**Figure 3.12** Encastrement à l'extrémité.

**Figure 3.13** Déclaration de la charge.

**Figure 3.14** Type de chargement (charge sinusoïdale) sous forme de tableaux.

**Figure 3.15** Taille du maillage.

**Figure 3.16** Affichage des résultats.

**Figure 3.17** Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section circulaire à (flexion).

**Figure 3.18** Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section carré à (flexion).

**Figure 3.19** Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section rectangle à (flexion).

**Figure 3.20** Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section circulaire à (compression- traction).

**Figure 3.21** Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section carré à (compression- traction).

**Figure 3.22** Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section rectangle à (compression- traction).

**Figure 3.23** Confrontation des trois courbes de fatigue en flexion.

**Figure 3.24** Confrontation des trois courbes de fatigue en traction- compression.

## Résumé :

Ce travail concerne l'analyse numérique du comportement en fatigue d'un matériau en acier S335.

En considérant une console soumise à une flexion pure alternée et également à un effet de compression- traction.

Pour avoir la possibilité d'analyse on a considéré pour la même console des différentes formes de la section à savoir :

- ✓ Section circulaire.
- ✓ Section carrée.
- ✓ Section rectangulaire.

Un calcul numérique détaillé nous a conduits à tracer les courbes de fatigue et de déterminer la limite d'endurance ( $\sigma_D$ ) pour chaque cas.

Une comparaison profonde est faite pour valoriser et prévoir la forme dont le comportement en fatigue est meilleur.

## Mots clés :

Fatigue, flexion alternée, endurance, durée de vie.

## ملخص:

يتعلق هذا العمل بالتحليل الرقمي لسلوك التعب لمادة الصلب S335 .  
لدينا console خاضع للانحناء بالتناوب وخاضع أيضاً لتأثير الشد- الانضغاط .  
قمنا بدراسة تحليلية، فقد درسنا نفس console لأشكال مختلفة من المقطع العرضي، وهي:

✓مقطع دائري.

✓مقطع مربع.

✓مقطع مستطيل.

قمنا بحساب رقمي مفصل برسم منحنيات التعب وتحديد حد التحمل ( $\sigma_D$ ) لكل حالة  
يتم إجراء مقارنة عميقة لتقييم شكل المقطع، حيث يكون سلوك التعب أفضل

## الكلمات المفتاحية:

التعب، الانحناء بالتناوب، التحمل، العمر.

## Summary:

This work concerns the numerical analysis of the fatigue behaviour of material S335 steel.

Considering a console subjected to pure alternating bending and also has a compression-traction effect

To have the possibility of analysis, we have considered for the same console different forms of the section, namely:

- ✓ Circular section
- ✓ Square section
- ✓ Rectangular section

A detailed numerical calculation led us to draw the fatigue curves and determine the endurance limit ( $\sigma_D$ ) for each case

A deep comparison is made to value and predict the form whose fatigue behaviour is better

## Keywords :

Fatigue, alternation flexion, endurance, life pan.

## Table des matières

Liste des symboles.....	1
Liste des tableaux.....	2
Liste des figures.....	3
Résumés.....	6

### **CHAPITRE I: PHÉNOMÈNE DE FATIGUE**

<b>1. Introduction générale .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Problématique des ouvrages.....</b>	<b>16</b>
<b>3. Cas significatifs en chiffres.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1. Québec/Canada.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. États-Unis .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3. Royaume-Uni.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4. Japon.....</b>	<b>18</b>
<b>4. Historique de la fatigue.....</b>	<b>19</b>
<b>5. C'est quoi la fatigue.....</b>	<b>20</b>
<b>6. Comment agit la fatigue.....</b>	<b>23</b>
<b>7. Vitesse de la fissuration.....</b>	<b>24</b>
<b>8. Types de variation des contraintes.....</b>	<b>27</b>
<b>8.1. Contrainte sinusoïdale à amplitude constante.....</b>	<b>27</b>
<b>8.2. Contrainte sinusoïdale à amplitude variable.....</b>	<b>28</b>
<b>8.3. Contrainte aléatoire.....</b>	<b>29</b>
<b>9. Différent types de sollicitations.....</b>	<b>31</b>
<b>10. Les essais de fatigue.....</b>	<b>33</b>
<b>10.1. Essais simples.....</b>	<b>33</b>
<b>10.2. Essais complexes..... ;.....</b>	<b>33</b>

11. Courbe de Wöhler.....	33
12. Exemple de la courbe de Wöhler.....	34
13. Domaines de la courbe de Wöhler.....	35
14. Notions générales et définitions.....	36
15. Paramètres d'étude en fatigue.....	37

## **CHAPITRE II: FATIGUE DES MATÉRIAUX**

1. Fatigue des matériaux.....	39
1.1. Béton.....	39
1.2. Acier d'armature.....	39
1.3. Béton armé.....	40
2. Renforcement externe de structures en béton armé.....	40
2.1 Les constituants d'un composite PRF.....	41
2.2 Les fibres (renforts).....	41
2.2.1. Fibres de carbone.....	42
2.2.2. Fibres de verre.....	42
2.2.3. Fibres d'aramide.....	42
3. Méthodes de vérification à la fatigue des ouvrages.....	43
3.1. Ouvrages métalliques.....	43
3.2. Ouvrages en béton - Méthode simplifiée.....	43
4. Comportement en cisaillement des poutres en béton armé.....	44
4.1. Fissuration.....	44

<b>4.2. Modes de rupture.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.1. Poutres très profondes, <math>a/d &lt; 1</math>.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2. Poutres profondes, <math>1 &lt; a/d &lt; 2.5</math>.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.3. Poutres élancées, <math>2.5 &lt; a/d &lt; 6</math>.....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.4. Poutres très élancées, <math>a/d &gt; 6</math>.....</b>	<b>48</b>

## **CHAPITRE III : ANALYSE NUMÉRIQUE**

<b>1. Résumé.....</b>	<b>50</b>
<b>2. Modélisation numérique .....</b>	<b>51</b>
<b>2.1. Présentation du logiciel ABAQUS.....</b>	<b>51</b>
<b>2.2. Procédure générale du logiciel.....</b>	<b>51</b>
<b>3. Fatigue sous chargement cyclique en flexion.....</b>	<b>69</b>
<b>3.1. Section circulaire.....</b>	<b>70</b>
<b>3.2. Section carrée.....</b>	<b>72</b>
<b>3.3. Section rectangulaire.....</b>	<b>74</b>
<b>4. Fatigue sous chargement cyclique en compression-traction.....</b>	<b>76</b>
<b>4.1. Section circulaire.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2. Section carrée.....</b>	<b>79</b>
<b>4.3. Section rectangulaire.....</b>	<b>81</b>
<b>5. Analyse des résultats.....</b>	<b>83</b>
<b>5.1. Flexion.....</b>	<b>83</b>
<b>5.2. Compression-traction.....</b>	<b>84</b>

<b>6. Combinaison des résultats .....</b>	<b>85</b>
<b>6.1. Cas de la flexion.....</b>	<b>85</b>
<b>6.2. Cas de compression-traction.....</b>	<b>86</b>
<b>7. Conclusion Générale.....</b>	<b>87</b>
<b>Référence.....</b>	<b>88</b>

# **CHAPITRE I : PHÉNOMÈNE DE FATIGUE**

## 1. Introduction Générale:

Les structures soumises en fatigue se comportent différemment à celles sollicitées statiquement. Ceci peut être expliqué par la variation cyclique des contraintes à long terme, ce qui engendre une modification des caractéristiques et des propriétés des matériaux et également la résistance des structures.

La règle fondamentale dans ce contexte est que ; sous chargement cyclique les structures présentent un comportement de résistance inférieure à celle développée sous chargement statique.

Cette réduction de résistance dépend de plusieurs paramètres tels que les conditions de chargement cyclique (amplitude, fréquence et nombre de cycles de contraintes appliquées ...) ainsi que les propriétés des éléments structuraux.

En raison de leur caractère répétitif, les charges cycliques peuvent participer à la progression des fissures qui se développent lentement dans le temps.

Ces fissures provoquent la perte de rigidité et éventuellement la rupture par fatigue de la structure provoquée par la dégradation cumulée de la résistance.

## **2. Problématique des ouvrages :**

La réhabilitation et la maintenance des ouvrages existants sont devenues aujourd'hui une préoccupation croissante dans le domaine du génie civil et des travaux publics.

En effet, ces infrastructures sont soumises à des conditions d'exploitation de plus en plus exigeantes.

Comme exemple, le trafic routier est en croissance permanente du fait de l'augmentation continue du nombre de véhicules et de leur poids.

Ainsi, les charges de sollicitation effectives ne correspondent plus aux charges de calcul pour lesquelles les anciens ouvrages ont été conçus.

Des travaux de plus en plus nombreux et coûteux doivent être réalisés pour renforcer ou réhabiliter ces structures afin d'assurer la sécurité des usagers. [1]

Comme on peut le voir, les ponts (chemin de fer ou routier) sont parmi les ouvrages les plus souvent endommagés. Le Tableau I.1 montre que la fatigue est la troisième cause de tous les dommages constatés; pour les ponts, elle est classée en premier rang. [2]

Cause de dommage	Bâtiments		Ponts		convoyeurs		Total	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
Résistance statique	102	33,6	19	14,8	40	36,0	161	29,7
Stabilité	62	20,4	11	8,6	14	12,6	87	16,0
Fatigue	8	2,6	49	38,3	35	31,5	92	16,9
Mouvement du corps rigide	25	8,2	2	1,6	17	15,3	44	8,1
Déformation élastique	14	4,6	1	0,8	0	0	15	2,8
La rupture fragile	9	3,0	5	3,9	1	0,9	15	2,8
Environnement	59	19,4	41	32,0	1	0,9	101	18,6
Les charges thermiques	23	7,6	0	0	0	0	23	4,2
Autres	2	0,7	0	0	3	2,7	5	0,9
Somme	304	100	128	100	111	100	543	100

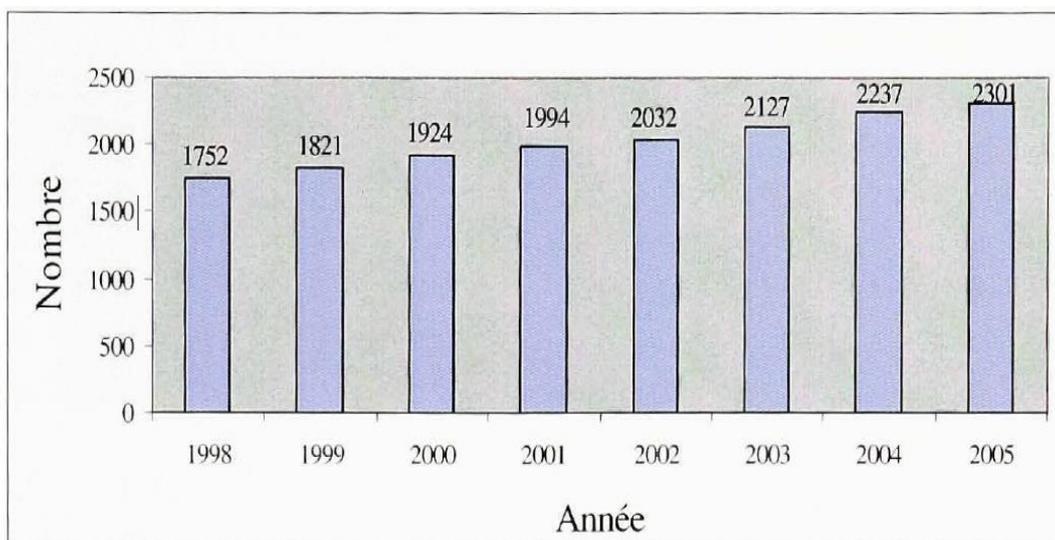
**Tableau 1.1** Détail des principales causes qui ont conduit à des dégâts. [2]

### 3. Cas significatifs en chiffres:

#### 3.1. Québec/Canada :

Selon les statistiques **2005** du Ministère des transports du Québec (**MTQ**), le réseau routier québécois compte **8 648** ponts. Parmi eux, le nombre de ponts nécessitant des interventions de réparation ou de réhabilitation ne cesse d'augmenter d'année en année (voir figure ci-dessous).

En **2005**, **2 301** ponts, soit **26,6 %** du patrimoine, présentaient des déficiences structurelles. [1]

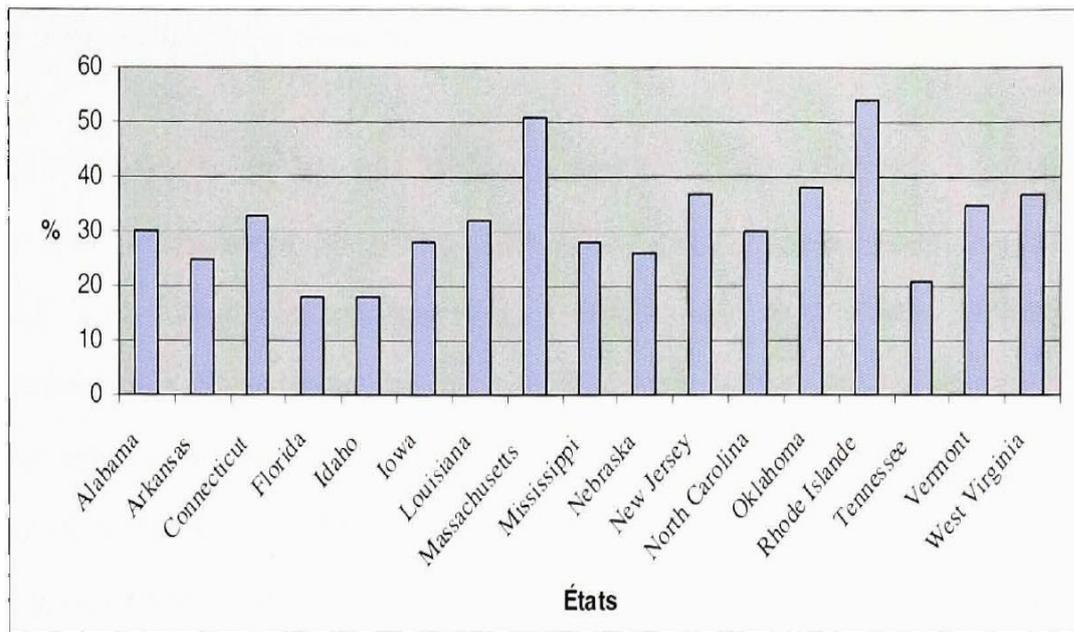


**Figure 1.1 Évolution du nombre de ponts structurellement déficients au Québec.**  
(Tirée de MTQ, 2005).

#### 3.2. États-Unis :

Selon les données statistiques de **2003** fournies sur le site internet de l'ASCE, une moyenne nationale de **27,1 %** des **590 750** ponts recensés aux États-Unis présentent des déficiences structurelles ou sont fonctionnellement désuets.

La figure ci-dessous indique ce pourcentage relatif à quelques États. Une politique nationale initiée en **1992** pour diminuer ce taux affiche une projection de **25 %** à l'horizon **2008**. Cependant, il n'en restera pas moins d'un pont sur quatre devant faire l'objet de restrictions éventuelles de tonnage ou de fermeture, entraînant ainsi des coûts dans l'activité économique en plus de ceux consacrés directement à leur réhabilitation. [1]



**Figure 1.2 Taux de ponts structurellement défectueux aux Etats-Unis. (Tirée de U.S. Department of Transportation, 2003).**

### 3.3. Royaume-Uni :

La majorité des ponts routiers et autoroutiers Britanniques ont été construits pendant les années 1960 et 1970. Nombre d'entre eux présentent des dégradations dues à l'altération des matériaux.

En 1987, un vaste programme national a été lancé par le ministère des transports pour l'évaluation des quelque 14 600 ponts situés sur le réseau national. Cette campagne avait pour objectif la réhabilitation et le renforcement de ces infrastructures afin d'assurer la sécurité des usagers mais également de les préparer à supporter l'augmentation du tonnage des poids lourds en prévision de la croissance du marché économique européen. [1]

### 3.4. Japon :

Près de **150 000** ponts routiers ont été recensés au Japon selon les données statistiques de **2006** recueillies sur le site internet du National Institute for Land and Infrastructure Management.

Le site révèle que **34 %** de ces infrastructures ont été construites entre **1955** et **1973**; l'âge

moyen actuel est alors de **37** ans.

Les auteurs estiment qu'un programme de reconstruction ou de réhabilitation majeure de ces infrastructures, à cause de leur détérioration, est à envisager d'ici **20** ans. [1]

#### **4. Historique de la fatigue :**

Les débuts de la recherche sur le phénomène de la fatigue remontent aux débuts du **XIX<sup>ème</sup>** siècle. La première étude publiée sur ce phénomène est due à un ingénieur des mines allemand du nom d'Albert [3] ; mais c'est Poncelet [4] qui fut le premier en **1839** à introduire le terme fatigue à propos de rupture de matériaux métalliques.

Au milieu du **XIX<sup>ème</sup>** siècle, les recherches se sont sensiblement développées avec l'industrialisation croissante et notamment grâce à l'essor du transport ferroviaire. Les premiers investissements importants en termes de recherches ont été déclenchés par un accident de train sur la ligne Paris-Versailles survenu le 8 mai **1842** où la rupture d'un essieu a entraîné la mort de plusieurs dizaines de personnes.

En **1860**, Wöhler - ingénieur des chemins de fer allemands - a publié ses résultats d'essais systématiques de rupture par fatigue sur essieux de locomotive [5]. Il a alors observé que la charge limite supportée en fatigue était bien inférieure à celle supportée en statique. Il est également à l'origine de la caractérisation de la fatigue par l'approche des courbes dites **S-N** (amplitude de contrainte - nombre de cycles à rupture), qui est encore couramment employée aujourd'hui. Enfin, il est le premier à avoir parlé du concept d'endurance limite. Dans la continuité de ces travaux, Goodman [6] a proposé en 1899 une approche prenant en compte les contraintes non purement alternées.

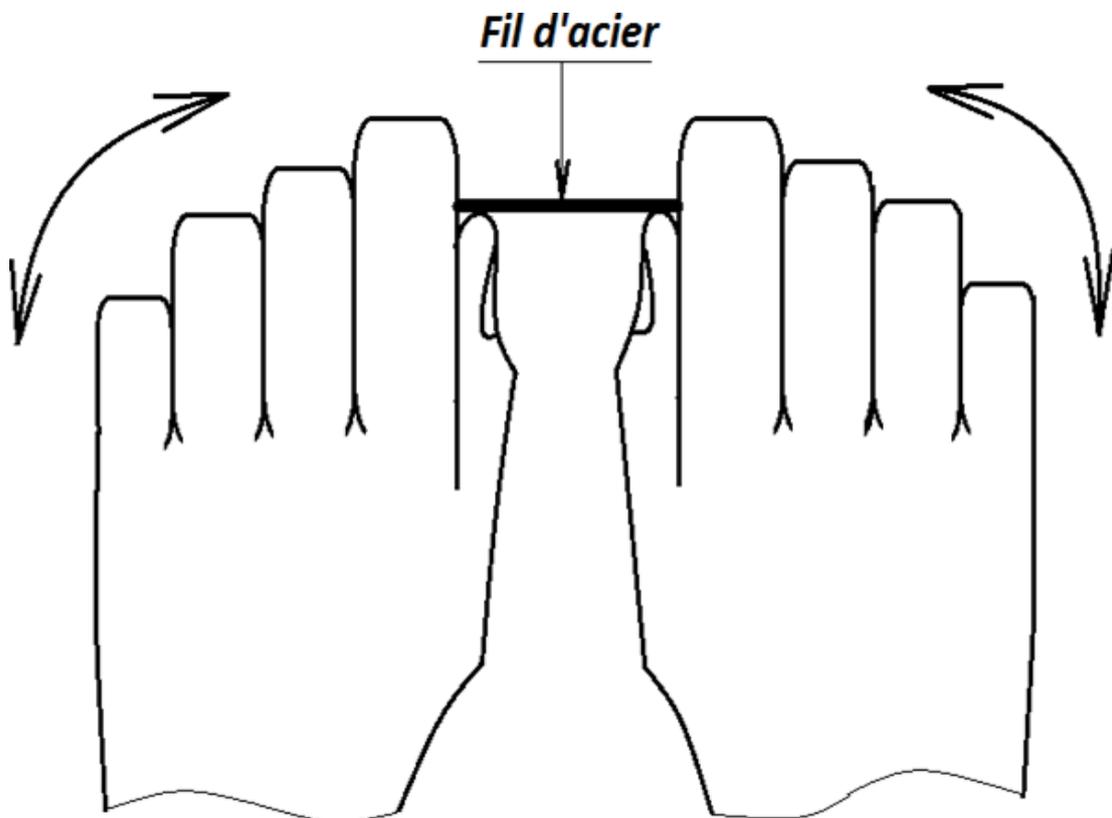
En **1910**, Basquin [7] a pu proposer un modèle empirique permettant de caractériser la limite d'endurance des matériaux.

Plus récemment, depuis le milieu du **XX<sup>ème</sup>** siècle, Palmyre [8] puis Miner [9] ont proposé des règles de cumul de l'endommagement dû à la fatigue pour les sollicitations à amplitude variable.

Enfin, Manson [10] et Coffin [11] furent les premiers à s'intéresser à l'influence de l'amplitude de déformation plastique sur la durée de vie.

## 5. C'est quoi la fatigue ?

Pour comprendre ce phénomène prenons un fil d'acier entre deux mains en le coudant dans un sens et puis dans l'autre sens, en faisant cela plusieurs fois jusqu'à la rupture (Figure 1.3). [12]



**Figure 1.3 Rupture d'un fil d'acier sous l'effet d'une flexion cyclique. [12]**

Le fil est rompu après **10 à 15** cycles, analysons le problème (**Figure 1.4**) :

On assimile le fil d'acier à une poutre sur laquelle sont appliqués les efforts des deux mains, dans le premier sens la fibre AB est tirée (sens 1) contrainte positive, lorsqu'on inverse le chargement (sens 2) la fibre AB est comprimée et la contrainte est négative. Répétant plusieurs fois jusqu'à la rupture.

C'est le phénomène de fatigue. (**Figure 1.5 ; Figure 1.6**) En résumé la fatigue est la rupture sous des sollicitations répétées. [12]

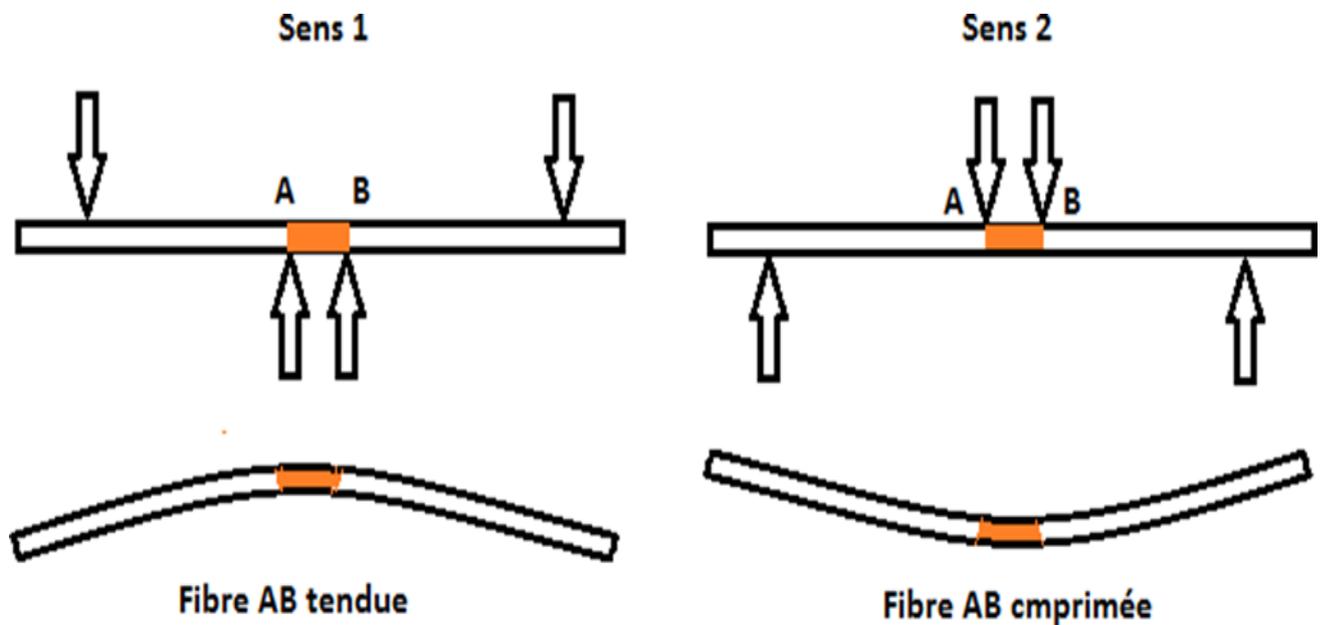
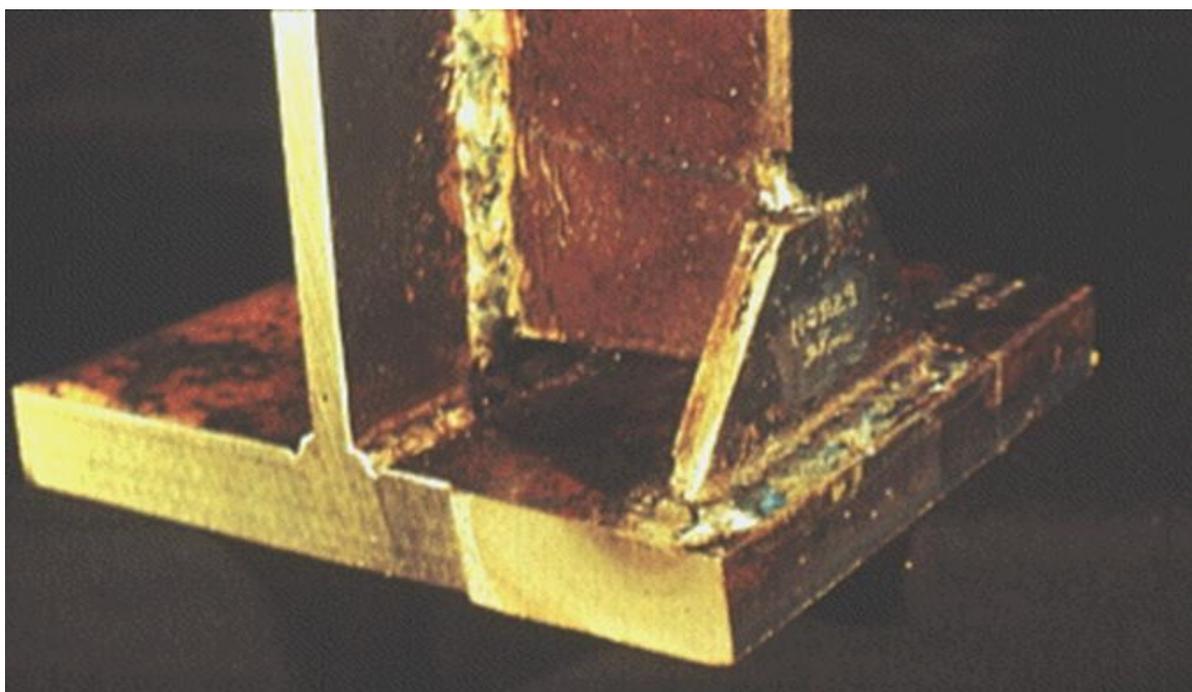


Figure 1.4 Modélisation du chargement appliqué par les mains sur le fil d'acier.



**Figure 1.5** Rupture au niveau d'une charpente métallique. [12]



**Figure 1.6** Fissuration d'un pont. [12]

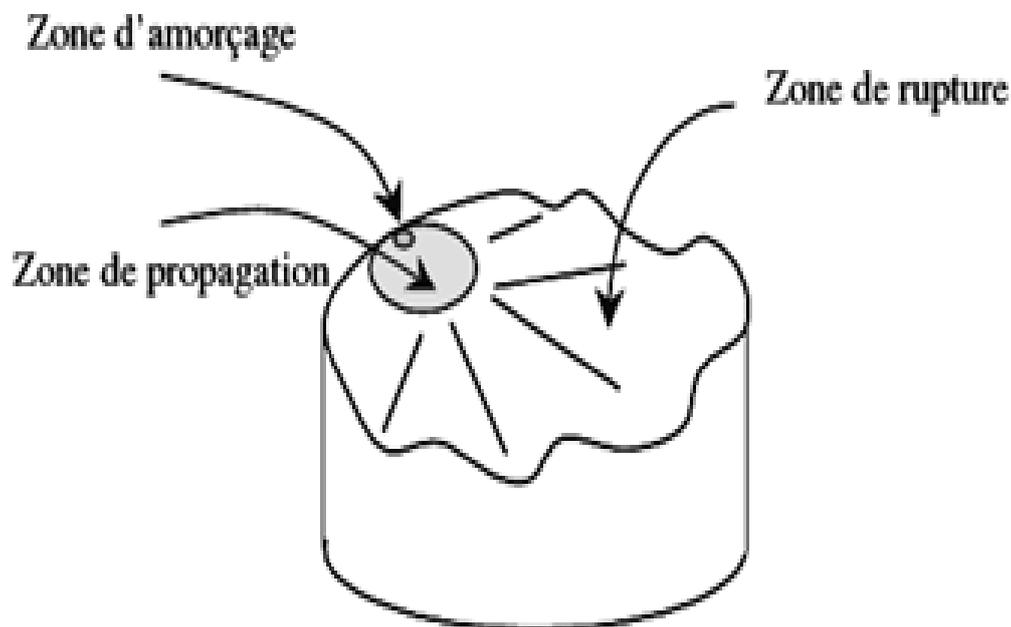
## 6. Comment agit la fatigue ?

L'observation macroscopique ou microscopique d'une section rompue sous l'effet de la fatigue indique la présence d'une amorce locale provoquée par une concentration de contrainte due à une imperfection du matériau ou à un changement de la géométrie de la pièce.

Cette amorce continue par une zone où la fissure semble se propager graduellement. [13]

Enfin une troisième zone indique qu'une rupture brusque s'est produite lorsque la section résiduelle est devenue trop petite pour résister à la charge : on distingue donc 3 stades dans le processus de fatigue [13]

1. L'amorce de la fissure zone 1 (**Figure 1.7**) ;
2. La propagation de la fissure zone 2 (**Figure 1.7**);
3. La rupture finale du matériau zone 3 (**Figure 1.7**). [13]



**Figure 1.7** Description d'un mécanisme de fatigue. [2]

## 7. vitesse de la fissuration :

Des études de fatigue ont montré que la durée de vie d'une pièce est liée à la vitesse de fissuration.

Durant le stade 2, une fissure de très faible taille peut se atteindre une taille critique. [14]

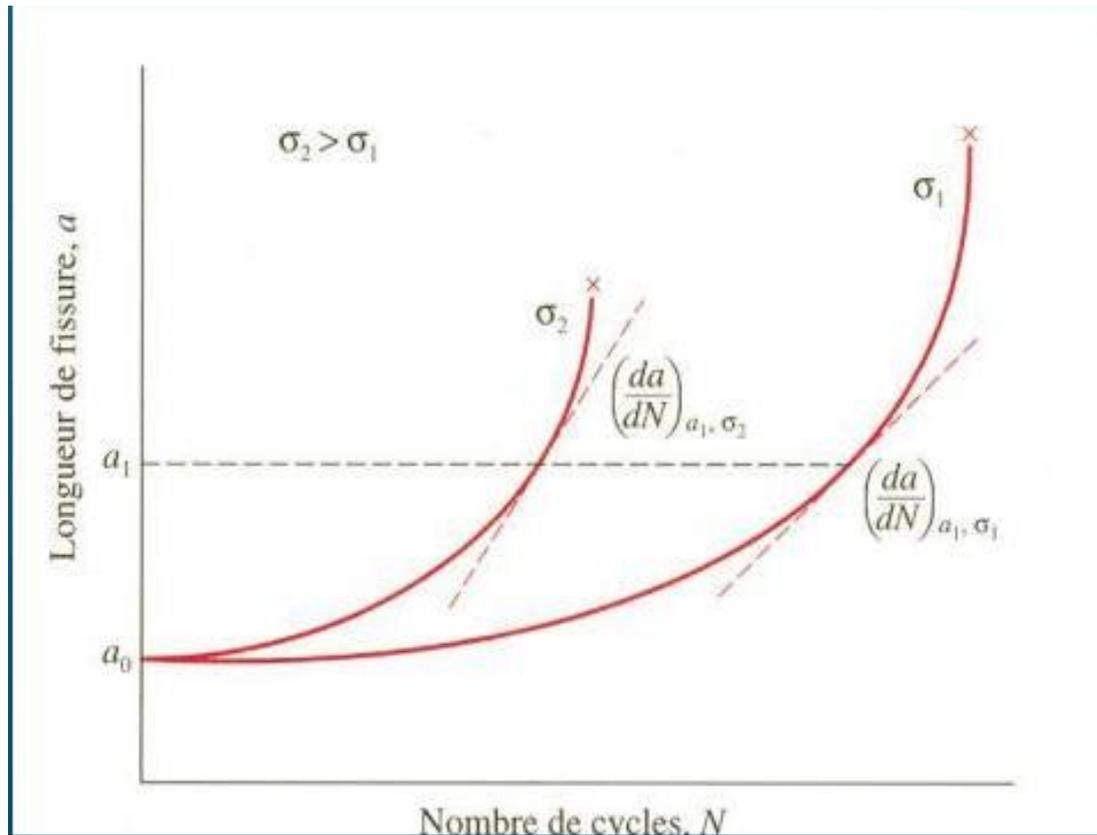


Figure 1. 8 Courbe de la longueur de la fissure( $a$ ) en fonction de nombre de cycle( $N$ ). [14]

$\sigma_1, \sigma_2$ : Contrainte appliquée  $da/dN$  vitesse de fissuration.

$a_0$ : Longueur de fissure initiale.

### Deux résultats importants :

- Au début de la vitesse la vitesse est faible, puis elle augmente avec la longueur de la vitesse.
- Elle s'accroît avec l'amplitude de la contrainte appliquée pour une longueur de fissure donnée. [14]

La vitesse de la fissuration en fatigue lors du stade 2 varie en fonction de :

- L'amplitude de contrainte appliquée.
- La taille de fissure.
- Les variables propres au matériau.

La vitesse de fissuration en fatigue s'écrit sous la forme :

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m$$

**A** et **m** constantes propres au matériau qui dépendent de l'environnement, de la fréquence et du rapport (**R**).

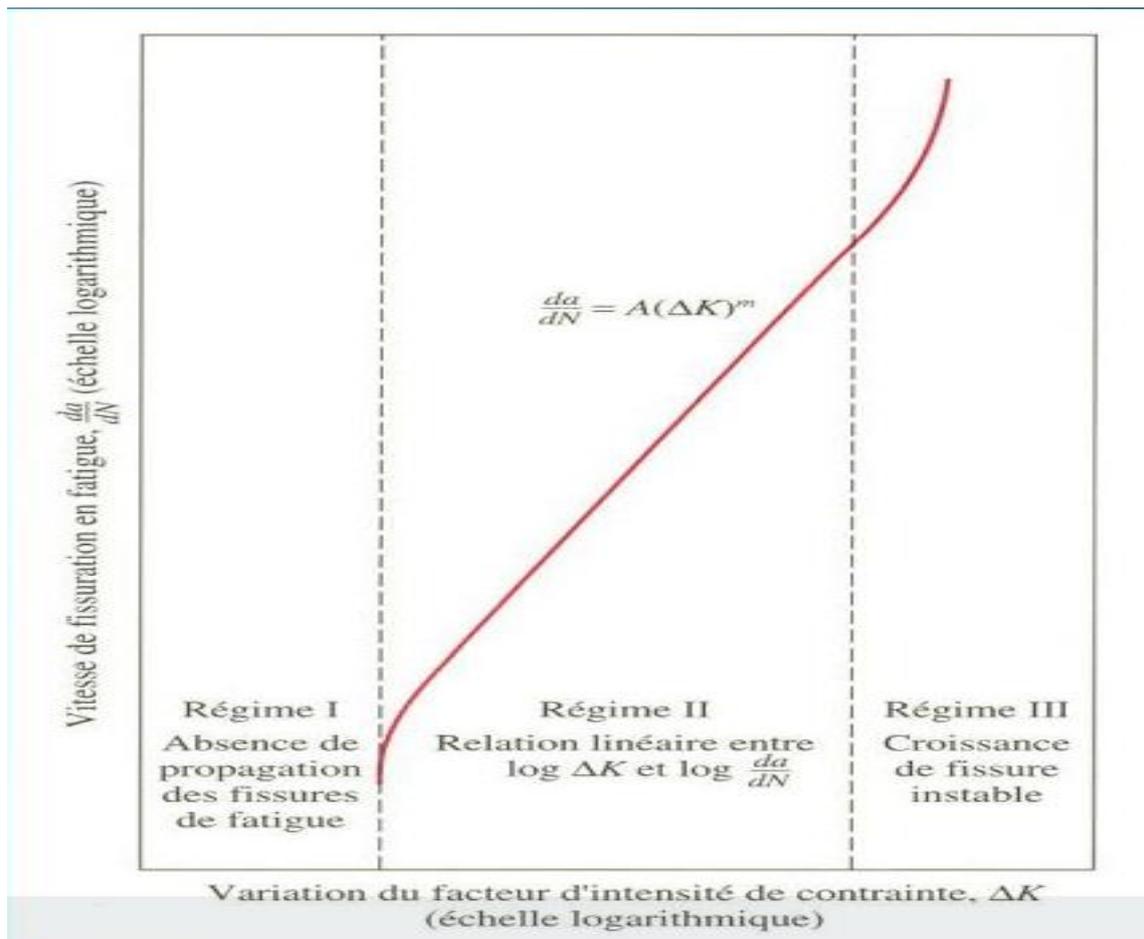
(**m** compris entre **1** et **6**).

**ΔK** Variation du facteur d'intensité de contrainte à l'extrémité de la fissure. [14]

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} .$$

Ou

$$\Delta K = Y\Delta\sigma\sqrt{\pi a} = Y(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) . [14]$$



**Figure 1.9** Représentation schématique de la  $da/dN$  en fonction du  $\Delta K$  (en échelle log). [14]

Trois régimes distincts peuvent être observés :

- Régime I: contraintes faible ou à petites fissures
  - ➔ Aucune propagation des fissures existantes
- Régime II: courbe quasi-linéaire
  - ➔ Propagation régulière des fissures
- Régime III : accélération de la fissure
  - ➔ Propagation brutale des fissures [14]

**En régime II :**

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = \log[A(\Delta K)^m] \quad \Rightarrow \quad \log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log \Delta K + \log A$$

Segment linéaire dont la pente et le point d'interception sont respectivement **m** et **log A**

➔ Déterminés à partir de données expérimentales [14]

### Durée de vie en fatigue :

Calcul de  $N_r$  [14]

$$dN = \frac{da}{A(\Delta K)^m} \quad \Rightarrow \quad N_r = \int_0^{N_r} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A(\Delta K)^m}$$

## **8. Types de variation des contraintes :**

Les sollicitations en fatigue peuvent être simples (traction, compression, torsion..) ou complexes (combinées). Les efforts répétés, varient en fonction du temps d'une façon périodique, dans ce cas on admet que leurs variations sont sinusoïdales, ou quelconque celle-ci posera des difficultés en calcul. [12]

On peut distinguer :

### **8.1 Contrainte sinusoïdale à amplitude constante :**

C'est la variation la plus simple elle est continue et à amplitude de contrainte constante. (Figure 1. 10) [11]

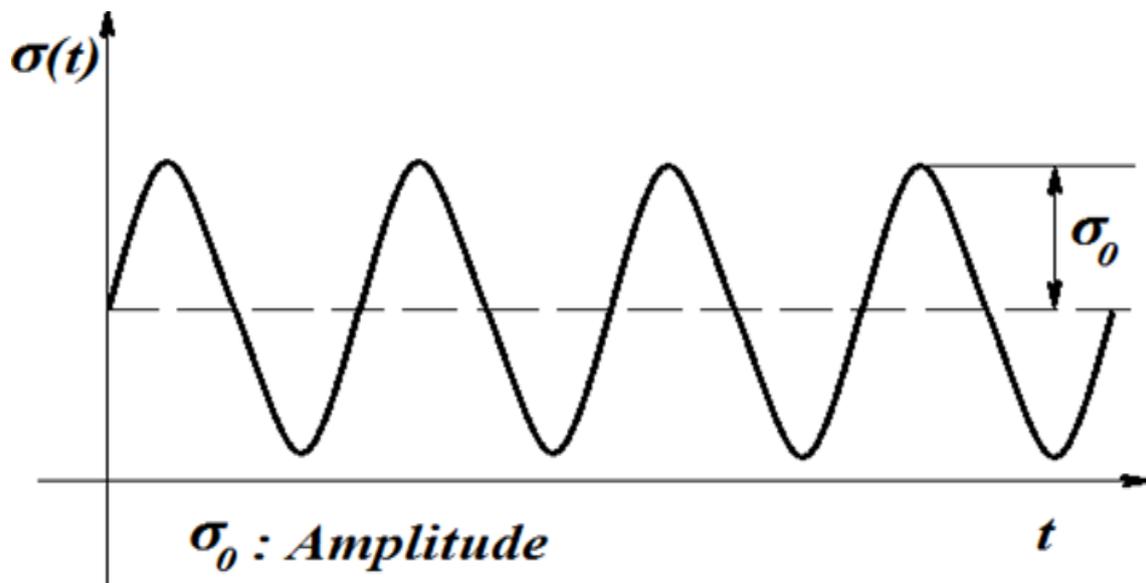


Figure 1. 10 Contrainte sinusoïdale à amplitude constante. [12]

### 8.2 Contrainte sinusoïdale à amplitude variable (Figure 1. 11) :

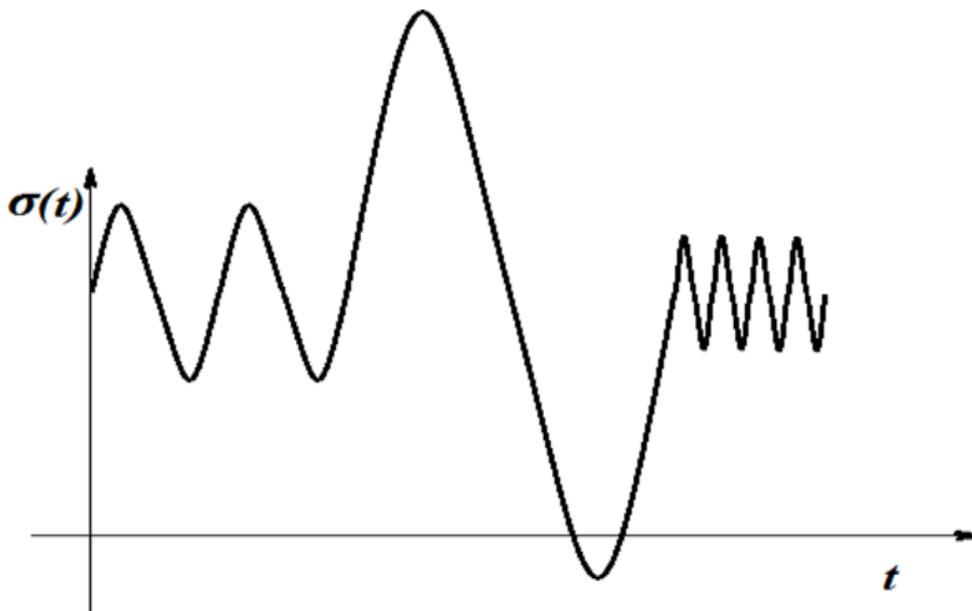


Figure 1. 11 Contrainte sinusoïdale à amplitude variable. [12]

### 8.3 Contrainte aléatoire :

La courbe de variation est d'allure quelconque (Figure 1 .12) [12]

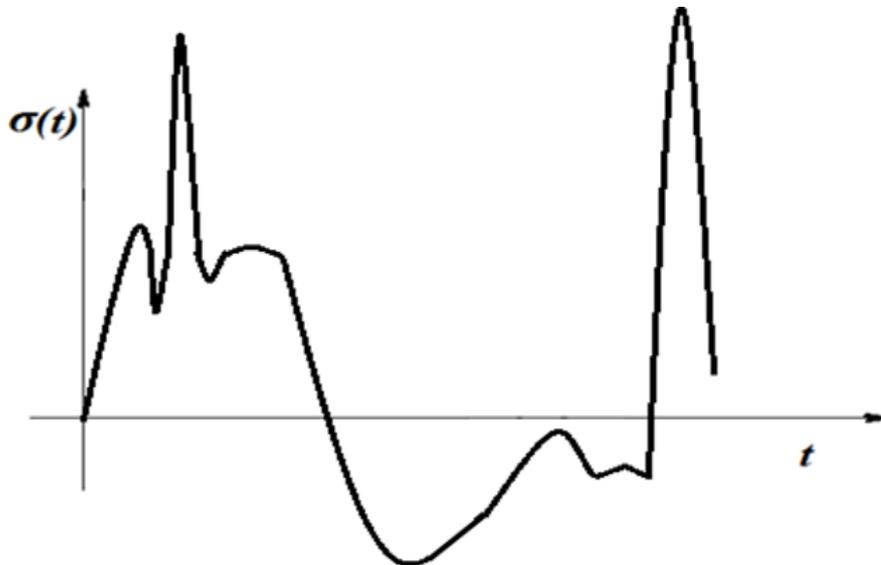


Figure 1 .12 Contrainte aléatoire. [11]

Pour simplifier les calculs en fatigue nous considérons ici que les contraintes sont sinusoïdales à amplitude constante ou à amplitude variable. [12]

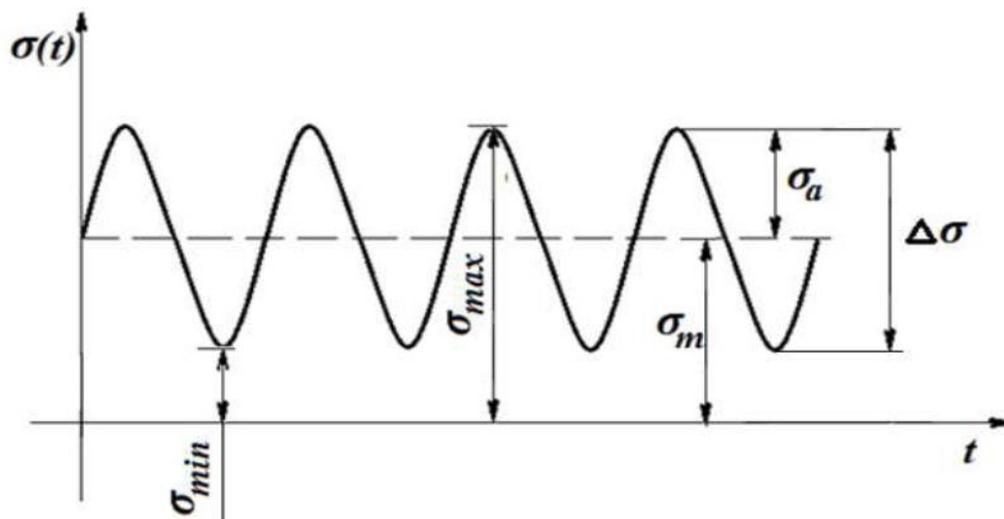


Figure 1. 13. Cycle de contrainte sinusoïdale. [12]

$\sigma_a$  : Amplitude de contrainte.

$\sigma_m$  : Contrainte moyenne.

$\sigma_{\max}$  : Contrainte maximale.

$\sigma_{\min}$  : Contrainte minimale.

$\Delta\sigma$  : Etendue de contrainte.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

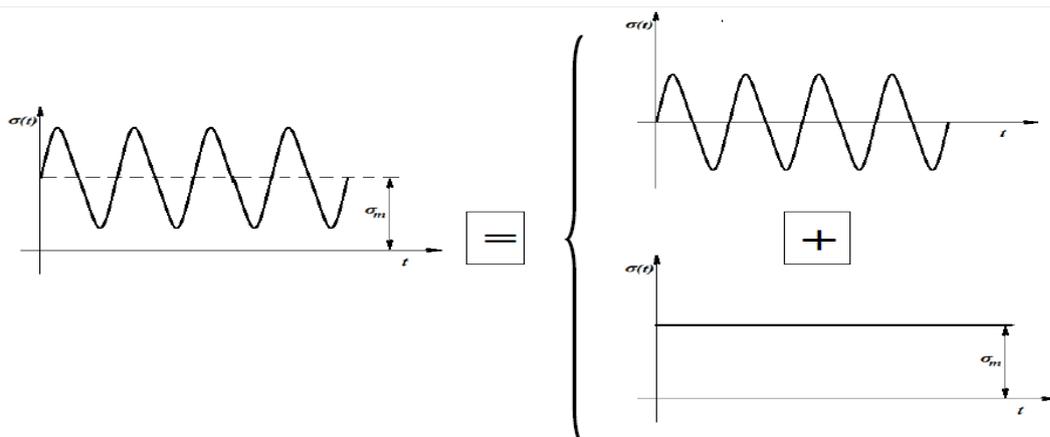
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$

Une sollicitation à contrainte non complètement renversée peut être considérée la superposition de deux sollicitations l'une à contrainte complètement renversée et l'autre statique (Figure 1 .14). [11]



**Figure 1 .14 La contrainte non complètement renversée est la résultante de deux contraintes l'une complètement renversée et l'autre constante. [12]**

## 9. Différent types de sollicitations :

Constitue un paramètre caractéristique du chargement couramment utilisé

On distingue alors les sollicitations suivantes présentées sur les figures

(1.15.1 ; 1.15.2 ; 1.15.3) [15]

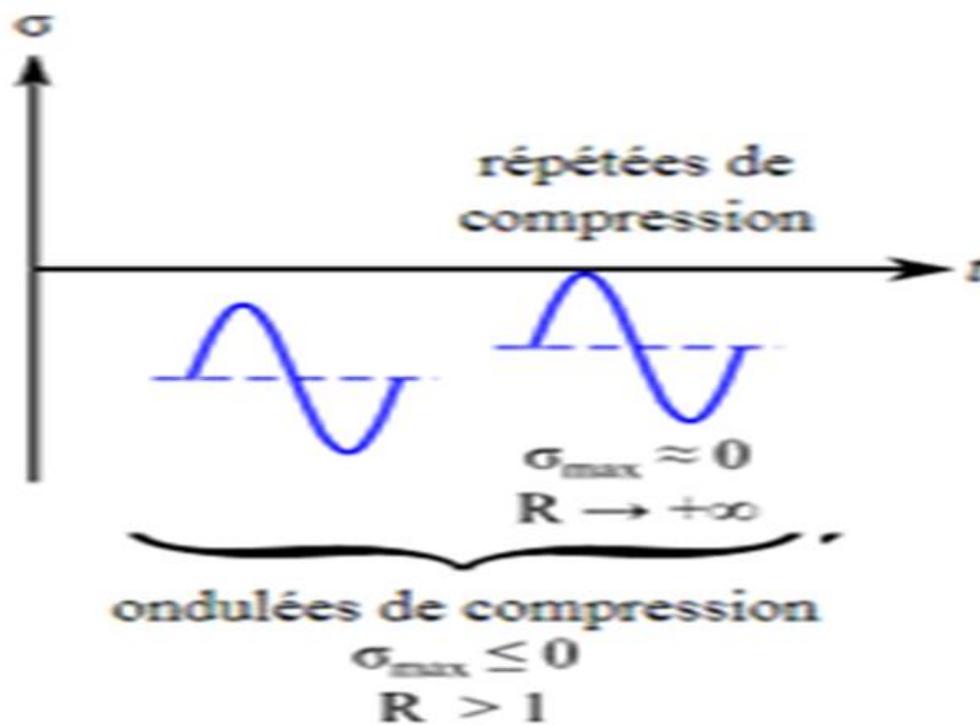


Figure 1 .15.1 sollicitations répétées de compression.

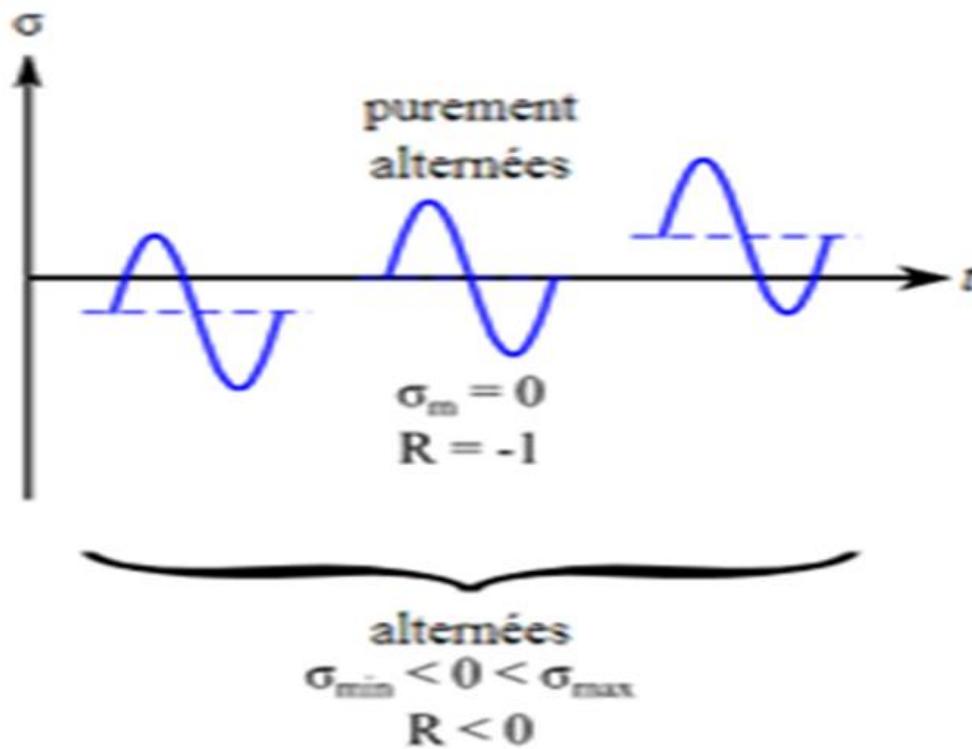


Figure 1 .15.2 sollicitations purement alternées.

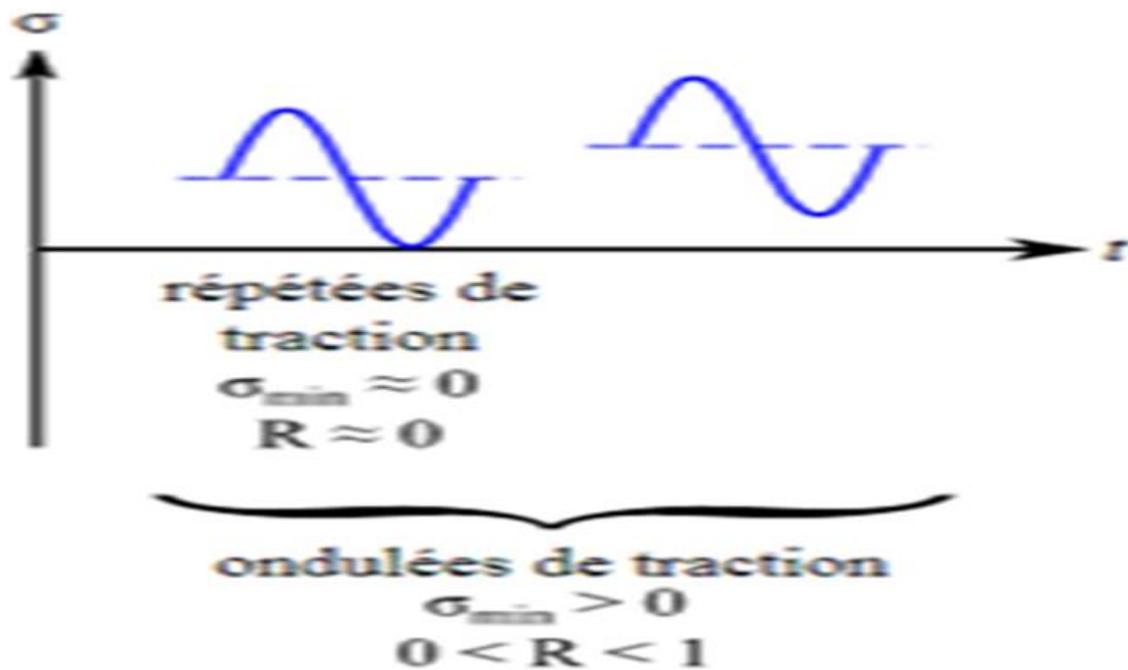


Figure 1 .15.3 sollicitations répétées de traction.

## 10. Les essais de fatigue :

**10.1 Essais simple** : réalisés sur des éprouvettes normalisés en considérant de sollicitations simples ; [16]

**10.2 Essais complexes** : concernent des sollicitations complexes avec des éprouvettes des formes différentes [16]

### Les essais simples le plus connus sont :

- Essais de traction
- Essais de Wöhler (flexion en encastrement)
- Essais de torsion
- Essais de Moore (flexion rotative sur quater point / deux bouts)
- Essais de flexion alternée [16]

## 11. Courbe de Wöhler :

La courbe de Wöhler d'un matériau représente la relation expérimentale entre l'amplitude de contraintes appliquées  $S$  et un nombre de cycles  $N$ . [17]

### Pour la construire :

- Il faut faire subir à une série d'éprouvettes des cycles de sollicitations sinusoïdales avec une charge moyenne et une amplitude données.
- On mesure alors le nombre  $N_f$  de cycles requis à chaque fois pour la rupture.
- On répète plusieurs fois l'essai à différentes amplitudes de contraintes  $S$ .
- Puis on trace la courbe :  $S = f(N)$  en prenant  $N = 50\% \cdot N_f$  (sécurité). [17]

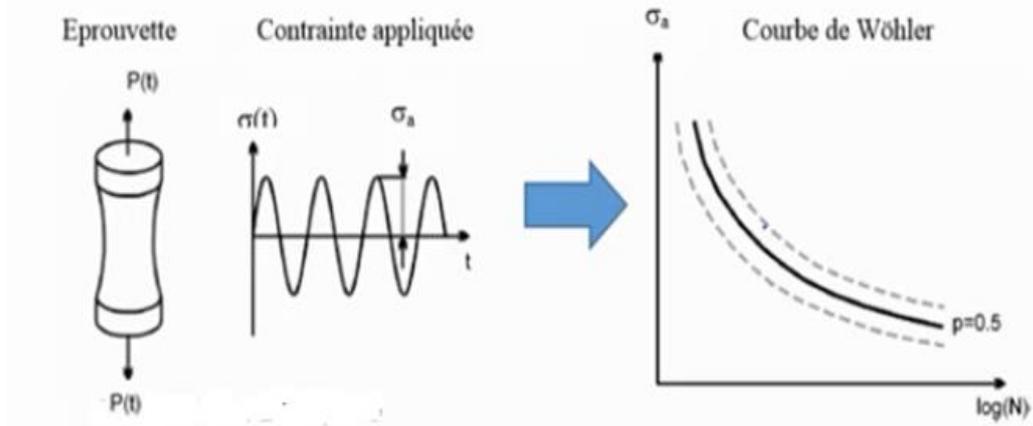


Figure 1.16 Courbe Wöhler.

12. Exemple de Courbe Wöhler :

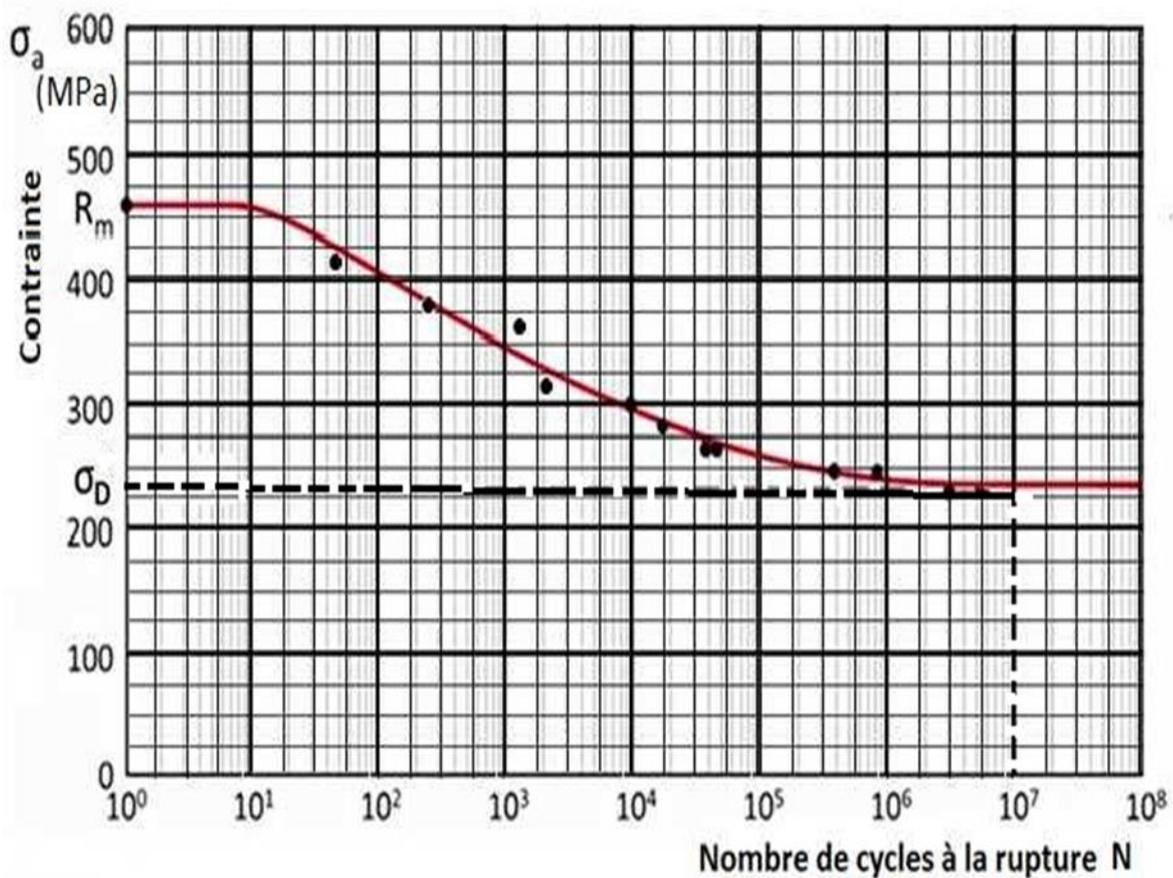


Figure 1.17 Courbe de Wöhler de l'acier S235JR. [12]

$\sigma_a$  : Amplitude de contrainte

$N$  : Nombre de cycle

$R_m$  : Résistance de rupture à la traction

$\sigma_D$  : Limite de fatigue conventionnelle , Limite d'endurance

$$N = 10^7 \text{ (Résistance à la fatigue)}$$

### 13. Domaines de la courbe de Wöhler :

➤ **La zone I : zone de fatigue oligocyclique ou à faible nombre de cycles :**

Dans ce cas la contrainte développée dépasse la limite élastique au cours de chaque cycle, générant des déformations plastiques observables macroscopiquement. Le nombre de cycles atteint généralement pour un acier est de l'ordre de  **$10^4$  à  $10^5$** .

S'appuyant sur les études de Bauschinger datant de **1886**, les premiers à avoir simultanément étudié ce domaine de fatigue et y avoir décrit le comportement d'un matériau métallique sont Coffin et Manson en **1954** [18]. Leurs études ont mené à une loi reliant la déformation plastique élémentaire  $\Delta \epsilon^P$  au nombre de cycles à rupture  $N_r$  et qui est connue sous le nom de relation de Manson-Coffin [19] :

$$\Delta \epsilon^P (N_r)^\beta = C$$

Où  $\beta$  et  $C$  sont des constantes caractéristiques du comportement du matériau

➤ **La zone II : zone de fatigue à grand nombre de cycles :**

Dans ce cas, l'intensité des contraintes mises en jeu ne dépasse jamais la limite d'élasticité. La rupture est atteinte après un nombre de cycles qui croît quand l'intensité des contraintes diminue. Le nombre de cycles atteint est généralement supérieur à  **$10^6$**  voire même  **$10^7$**  Ou  **$10^9$**  pour un acier. Plusieurs approximations de la courbe de Wöhler dans cette zone ont été proposées, la plus simple étant celle de Basquin [20] qui a choisi d'approximer celle-ci par

une droite lorsqu'elle est représentée dans un repère à l'échelle log ( $\log(\sigma)$  et  $\log(N)$ ), ce qui donne l'expression :

$$\sigma N^a = C$$

➤ **La zone III : la zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité :**

Dans cette zone le matériau est soumis à une faible contrainte pour laquelle la rupture ne se produit pas avant  $10^7$  cycles pour un acier et reste pour de nombreux cas supérieurs à la durée de vie envisagée pour la pièce.

Durant ces dernières années, certaines équipes de recherches se sont intéressées à la fatigue giga cyclique ou fatigue à très grand nombre de cycles (durée de vie supérieure à  $10^8$  cycles).

Ces études sont aujourd'hui facilitées par l'apparition de nouvelles machines permettant de solliciter une éprouvette à plusieurs dizaines de kilohertz mais ceci pose toutefois certains problèmes comme la maîtrise des fréquences de sollicitation ou l'auto échauffement important des éprouvettes [21].

#### 14. Notions générales et définitions :

- **Cycle de contrainte :** C'est la période de temps durant laquelle l'amplitude des contraintes variable dans le temps se répète. [25]  
Le cycle sinusoïdal est celui qui est utilisé pour étudier le comportement des structures en fatigue. Dans ce cycle, la contrainte varie dans le temps de sa valeur minimale,  $\sigma_{\min}$  à sa valeur maximale,  $\sigma_{\max}$  par rapport à une contrainte moyenne,  $\sigma_m$  [25]
- **Durée de service en fatigue :** C'est le nombre de cycles de contraintes ou de déformations, N, que peut supporter une poutre avant sa rupture. [25]
- **Limite de fatigue :** Pour une contrainte moyenne  $\sigma_m$  donnée, la limite de fatigue

est la plus grande amplitude des contraintes pour laquelle il n'est pas constaté de rupture après un nombre infini de chargement cyclique. [25]

- **Limite d'endurance ou résistance en fatigue :** Pour une contrainte moyenne  $\sigma_m$  donnée, la limite d'endurance est la plus grande amplitude des contraintes pour laquelle une rupture est constatée après un nombre fini  $N$  de chargement cyclique. [25]

### **15. Paramètres d'étude en fatigue :**

Le choix des paramètres d'étude est d'une importance capitale pour évaluer le comportement en fatigue, surtout les conditions de chargement cyclique. Par conséquent, **l'amplitude, la fréquence et le nombre de cycles** de contraintes appliquées peuvent affecter substantiellement les mécanismes de résistance et de rupture de la structure. [25]

## **CHAPITRE II: FATIGUE DES MATÉRIAUX**

## 1. Fatigue des matériaux :

### 1.1. Béton :

(**Papakonstantinou**) et al, (**2001**) rapportent que la résistance à la fatigue de pièces en béton, correspondant à **10** millions de cycles, est supposée équivalente à **55 %** de la résistance statique initiale. Selon ces mêmes auteurs, (**Hordijk**) et Reinhardt (**1992**) ont étudié le comportement en fatigue du béton non armé. Ils ont conclu que sous chargement cyclique, la propagation des fissures engendre la ruine. En effet, la fatigue du béton fait l'objet d'un processus progressif Dans un premier temps, des microfissures apparaissent et se propagent. Ce premier phénomène provoque des macro-fissures; la diffusion de ces dernières achève le processus en provoquant une rupture brutale, [1]

### 1.2. Acier d'armature :

Comme pour le béton, sous chargement de fatigue, les dommages induits dans les barres d'armature se manifestent par l'apparition de microfissures dites : fissures de fatigues (**Heffernan et Erki, 2004**), Les microfissures sont initiées par une concentration de contraintes sur la surface des barres (**Papakonstantinou et al, 2001**), Leur propagation continue avec les cycles de contrainte, La rupture soudaine survient lorsque les fissures atteignent une longueur critique où la propagation devient instable. [1]

Ainsi, la résistance en fatigue des aciers d'armature est égale au nombre de cycles à partir duquel les premières fissures apparaissent, plus la durée au cours de laquelle ces fissures se développent jusqu'à comportement et aux propriétés de l'acier entraîne une sensibilité de leur résistance en fatigue à de nombreux paramètres, La classe de l'acier, la forme des barres, la corrosion, le type de chargement, etc., sont parmi ceux dont la rupture, La complexité des mécanismes liés aux cette résistance est dépendante (**Heffernan et Erki, 2004**), Selon ces mêmes auteurs, **Tilly (1979)** indique que la géométrie des barres d'armature influe grandement sur leur tenue en fatigue. [1]

Les différentes formes de façonnage induisent des concentrations de contraintes qui sont les

principales causes de rupture prématurée. [1]

Aussi, cette résistance diminue lorsque le diamètre des barres augmente, la probabilité qu'il y ait défaut (entailles) sur une section est plus grande lorsque celle-ci est plus importante. La soudure, la corrosion et le crantage des armatures diminuent également leur résistance à la fatigue.

### **1.3. Béton armé :**

La performance du béton armé dépend de l'action composée du béton et de l'acier d'armature. Cependant, selon Bizindavyi et al. (2003), Heffernan (1997) rapporte que la résistance à la fatigue d'une poutre en béton armé dépend principalement de la fatigue de l'acier d'armature. Papakonstantinou et al. (2001) indiquent également que les pièces ayant un faible taux d'armature présentent une performance à la fatigue en flexion dominée par la performance de l'armature. [1]

## **2. Renforcement externe de structures en béton armé :**

Les structures existantes en béton armé ont une durée de service limitée et se voient affectées par des problèmes de fonctionnalité, de résistance et de durabilité sous différents types de chargement (flexion, cisaillement, torsion, fatigue, etc.). Pour cela, les ingénieurs doivent être capables de maintenir ces structures à un niveau de performance acceptable, de les réparer après un certain niveau de dégradation, ou de les renforcer pour amener leur capacité à un niveau plus élevé afin de résister à une éventuelle augmentation du chargement.

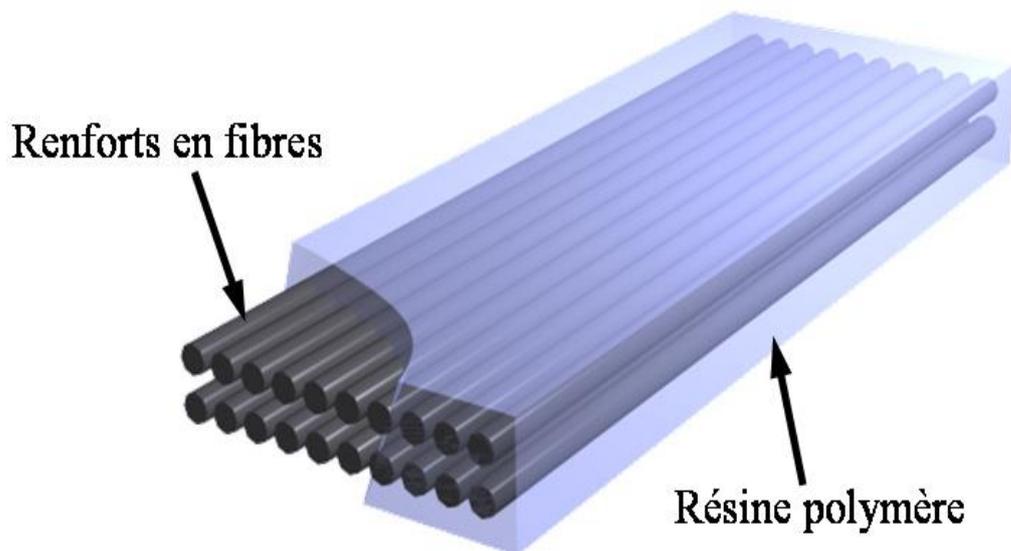
Le renforcement externe est une technique destinée à réhabiliter ou à augmenter la résistance de structures en béton armé (BA) lorsque celles-ci présentent des déficiences structurelles ou lorsqu'elles sont amenées à supporter des charges plus importantes que celles prévues lors de leur conception. [22]

## Parmi les matériaux composites :

### 2.1. Les constituants d'un composite PRF :

Un matériau composite est, par définition, une combinaison de plusieurs matériaux de nature et composition différentes.

Plus spécifiquement, les matériaux composés avancé (MCA) combinent un noyau à base de renforts souvent en fibres, et de matrice en résine polymère (**PRF = Fibres + Résine**), comme illustré à la **Figure 2.1** [22]



**Figure 2.1** Combinaison fibres et polymère d'un MCA. [22]

### 2.2. Les fibres (renforts) :

Les renforts en fibres, en phase discontinue souvent filamentaire, absorbent la majorité des contraintes mécaniques et assurent la résistance et la rigidité des composites PRF. La fibre est donc l'élément porteur de charge principale qui influe fortement sur les caractéristiques mécaniques d'un PRF. Plusieurs types de fibres sont fréquemment utilisés dans les composites : à base de carbone (PRFC), de verre (PRFV), d'aramide (PRFA), et plus récemment de fibres d'acier et fibres hybrides. [22]

### 2.2.1. Fibres de carbone :

Dans l'industrie de la construction, les fibres de carbone les plus utilisées actuellement pour le renforcement des structures sont sous forme de **PRF** en tissus, lamelles ou câbles de précontrainte. [22]

Elles sont caractérisées par leur durabilité et leur résistance contre les effets environnementaux, tel que la haute température, l'humidité, l'acidité et les réactions alcalis granulats; en plus de leur bonne performance sous chargement cyclique à long terme ou fatigue [22]

### 2.2.2. Fibres de verre :

Le choix des fibres de verre a prédominé pour de nombreuses structures d'ingénierie, dû à leur faible coût et leurs propriétés spécifiques de résistance, les classant parmi les fibres de haute performance.

Elles sont de deux types : [22]

1. **les fibres de type E** : utilisées pour produire la grande majorité des PRF à base de verre utilisé dans l'industrie de la construction, en raison de leur haute résistivité électrique,

2. **celles de type S** : utilisées pour produire des fibres de haute performance utilisées principalement dans l'industrie aérospatiale.

Contrairement aux fibres de carbone, les fibres de verre sont des excellents isolants thermiques et électriques.

Par contre, les fibres de verre sont sensibles à l'humidité, surtout en présence des sels et alcalis et susceptibles à une rupture par fluage due à une perte de résistance sous charges soutenues à Long terme. [22]

De plus, elles sont plus denses que les fibres de carbone et d'aramide

### 2.2.3. Fibres d'aramide :

Les fibres d'aramide ont été utilisées pour produire la première génération des câbles de précontrainte en PRF dans les années **1980** en Europe et au Japon.

Cependant, peu de manufacturiers produisent encore des barres d'armature ou câbles de précontrainte à base de fibres d'aramide. [22]

En effet, une combinaison du prix relativement élevé, la difficulté de traitement, leur faible résistance en compression, ainsi qu'une sensibilité à l'humidité et la haute température ont contribué à la diminution de l'utilisation des **PRF** à base d'aramide dans l'industrie de la construction. Par contre, les fibres d'aramide sont caractérisées par une résistance élevée en tension supérieure à celle des fibres de verre, par un module d'élasticité moyen d'environ **50%** plus élevé que celui du verre, ainsi qu'une densité faible comparée à celle du carbone ou du verre. [22]

De plus, les fibres d'aramide sont des bons isolants thermiques et électriques, et comme les fibres de carbone, elles ont un coefficient de dilatation thermique négatif dans leur direction longitudinale. Elles sont fréquemment utilisées dans des applications balistiques [22]

### **3. Méthodes de vérification des ouvrages en fatigue :**

#### **3.1 Ouvrages métalliques :**

La fatigue des ouvrages métalliques est l'objet du chapitre 9 de l'Eurocode 3. [23]

Il y a plusieurs Méthodes pour vérifier la fatigue des ouvrages métalliques Parmi eux :

- 1. Méthode du réservoir [23]**
- 2. Méthode de la goutte d'eau [23]**

#### **3.2 Ouvrages en béton :**

L'Eurocode 2 introduit une notion nouvelle: [24]

La vérification des sections en béton armé ou précontraint à la fatigue. [24]

## 4. Comportement en cisaillement des poutres en béton armé :

Le comportement en cisaillement des poutres en béton armé est relativement complexe. Les propriétés du béton, le taux de l'armature transversale et longitudinale, le type de chargement, la géométrie des pièces, etc., sont des facteurs qui contribuent à cette complexité. Aussi, les mécanismes de transfert de l'effort tranchant du point d'application de la charge aux supports sont difficiles à cerner.

Ce qui explique pourquoi il n'y a pas encore de théorie unifiée et complètement réaliste du comportement en cisaillement et que les méthodes de calcul adoptées par les codes et normes sont de type semi-empirique. [1]

### 4.1 Fissuration :

Dans une poutre en béton armé, le transfert de l'effort tranchant n'est pas identique s'il s'agit d'un élément fissuré ou non.

Les fissures sont généralement présentes, à cause de la faible résistance en traction du béton. Les zones d'apparition des fissures et leur inclinaison diffèrent en fonction de la sollicitation dominante - flexion versus cisaillement - ainsi que les caractéristiques de la poutre telles que la géométrie et le type de support (Appui simple ou encastrement)

Toute poutre soumise à une sollicitation de flexion est du fait même soumise à un effort tranchant; le moment fléchissant étant variable d'un point à un autre le long de la poutre. [1]

L'état de contrainte en tout point est alors composé de contraintes de compression et de cisaillement, ou de contraintes de traction et de cisaillement ou de contraintes de traction et de cisaillement (**Figure 2 .2.1.a**). [1]

Les contraintes principales qui en découlent sont indiquées à la **Figure 2.2.1.b**, La contrainte principale de traction fissure le béton si elle excède sa résistance, La **Figure 2. 2.2** montre les directions des contraintes principales de compression.

Elles forment des trajectoires similaires à celles formées par les fissures (**Figure 2.2.3**), Ces fissures se présentent sous deux formes : des fissures verticales et des fissures diagonales [1]

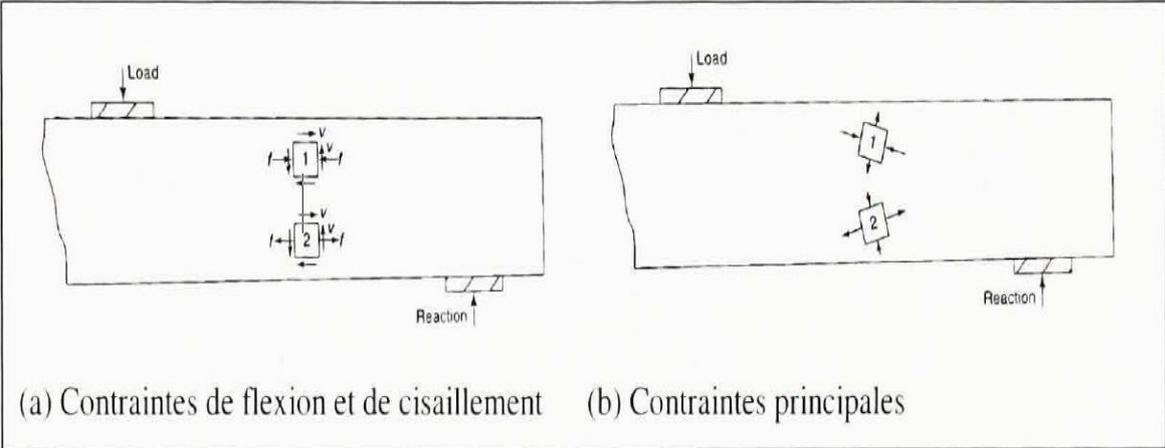


Figure 2 2.1 État de contraintes et contraintes principales dans une poutre non fissurée. [1]

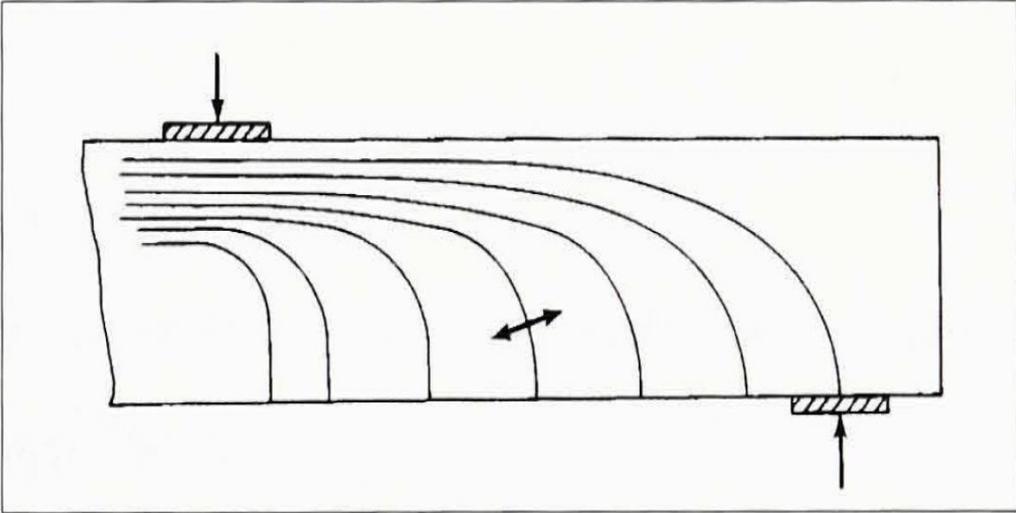


Figure 2.2.2 Direction des contraintes principales de compression. [1]

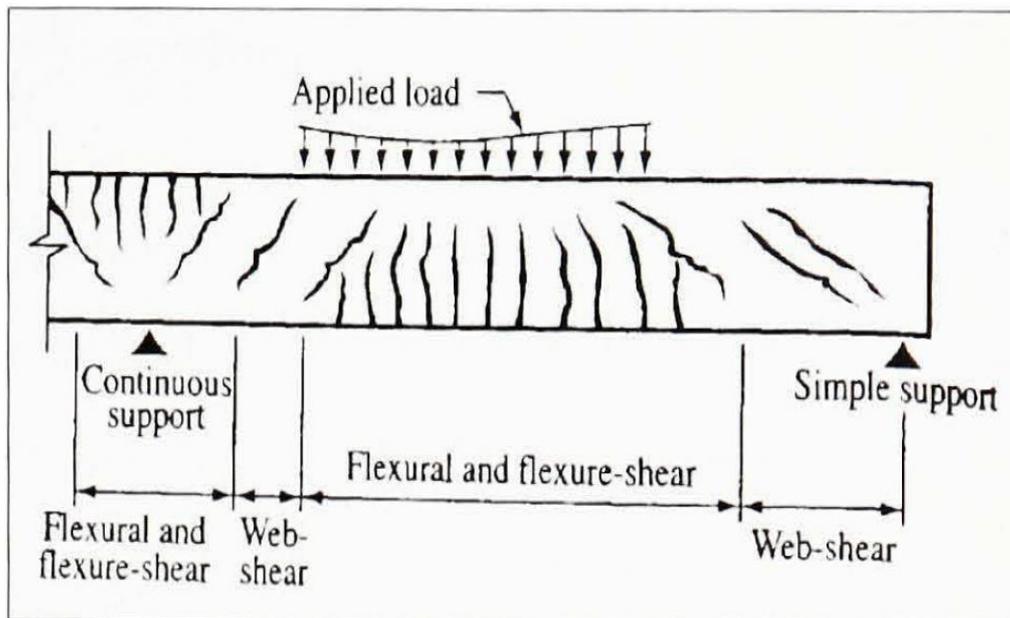


Figure 2.2.3 Types de fissures dans une poutre en béton armé. [1]

#### 4.2 Modes de rupture :

La rupture d'une poutre en béton armé est atteinte lorsque les charges qui la sollicitent excèdent sa résistance.

Le mode de rupture dépend de plusieurs paramètres dont (MacGregor et Bartlett, 2000) :

- Le type de chargement;
- les dimensions de la poutre et la géométrie de la section (**a**, **d**) ;
- les propriétés mécaniques des matériaux et leurs taux.

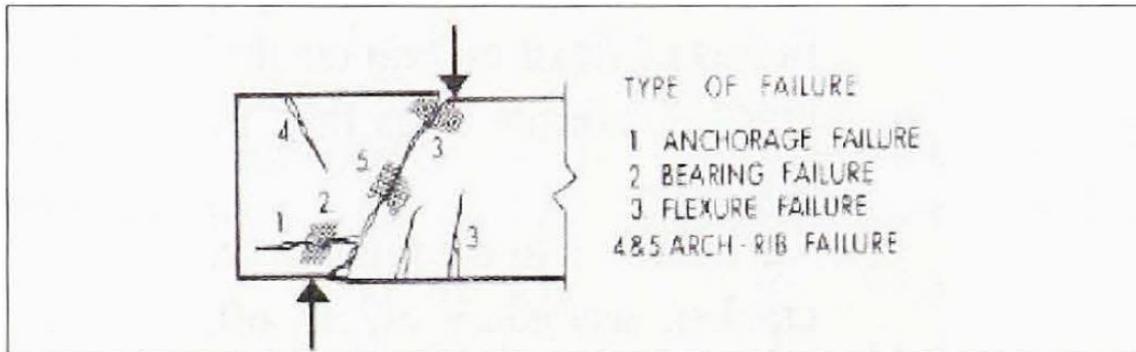
La variation de ces paramètres implique une variation dans le comportement d'une poutre et, dans le cas ultime, de son mode de rupture.

Conventionnellement, pour une poutre en béton armé soumise à des charges concentrées symétriquement disposées, ayant une géométrie, des dimensions et des propriétés donnés (Quantité d'armature, type d'acier, interaction béton/acier, etc.), le comportement est fonction du rapport  $a/d$ , où  $a$  est la distance entre le point d'application de la charge et l'appui et  $d$  est la profondeur de la poutre (ASCE-ACI Task Committee 426, 1973).

La variation du ratio  $a/d$  distingue quatre types de poutres présentant ainsi des modes de ruptures différents (MacGregor et Bartlett, 2000) : [1]

### 4.2.1 Poutres très profondes, $a/d < 1$ :

La perte d'ancrage aux extrémités des barres d'armatures longitudinales tendues est généralement le mode de rupture dominant dans de telles poutres. D'autres modes de rupture peuvent être observés comme indiqué dans la **Figure 2.2.4**. [1]

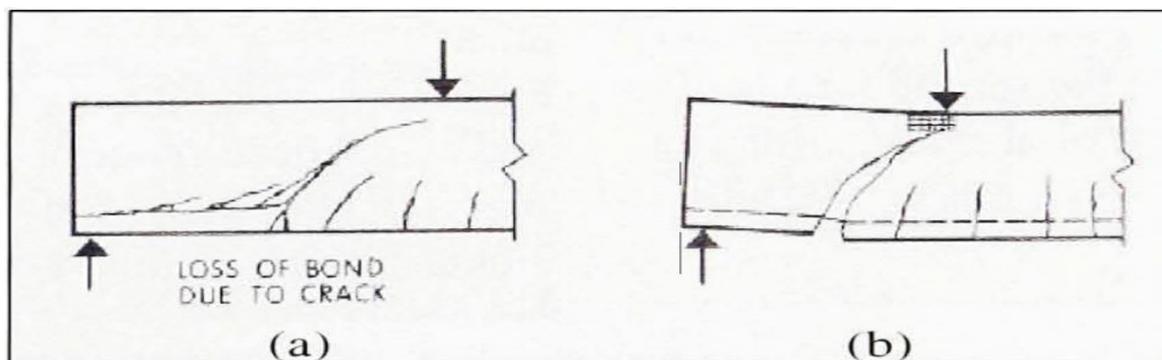


**Figure 2.2.4** Modes de rupture dans une poutre très profonde,  $a/d < 1$ .  
(Tirée de ASCE-ACI Task Committee 426, 1973). [1]

### 4.2.2 Poutres profondes, $1 < a/d < 2.5$ :

Les modes de rupture possibles pour de telles poutres sont :

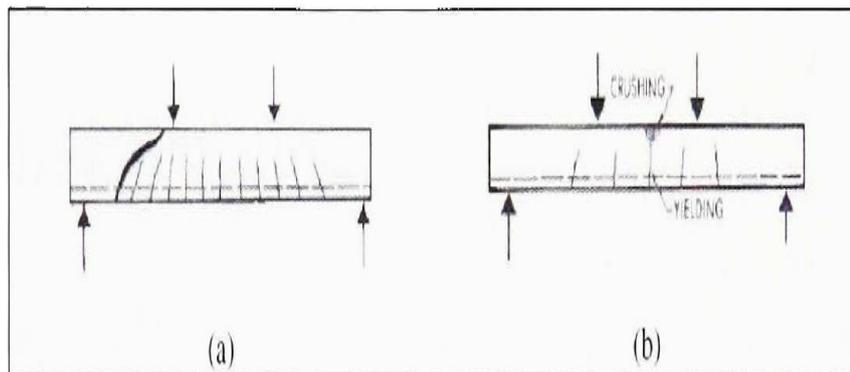
- La perte d'adhérence (**Figure 2.3.5.a**);
- le glissement des armatures longitudinales tendues (**Figure 2.2.5.a**);
- le cisaillement des barres d'armature longitudinales tendues (Effet goujon) (**Figure 2.2.5.b**);
- l'écrasement du béton entre la fibre la plus comprimée et le prolongement des fissures inclinées (**Figure 2.2.5.b**). [1]



**Figure 2.2.5** Modes de rupture dans une poutre profonde,  $1 < a/d < 2,5$ .  
(Tirée de ASCE-ACI Task Committee 426, 1973). [1]

### 4.2.3 Poutres élancées, $2.5 < a/d < 6$ :

La rupture se produit soit en cisaillement le long des fissures inclinées comme indiqué dans la **Figure 2.2.6.a** ou bien par écrasement du béton en même temps que la plastification des aciers d'armature longitudinale comme indiqué dans la **Figure 2.2.6.b**. [1]



**Figure 2.2.6 Modes de rupture dans une poutre élancée,  $2,5 < a/d < 6$ .**  
(Tirée de ASCE-ACI Task Committee 426, 1973). [1]

### 4.2.4 Poutres très élancées, $a/d > 6$ :

Ce type de poutre présente un mode de rupture en flexion avant même l'apparition des fissures inclinées. [1]

# **CHAPITRE III : ANALYSE NUMÉRIQUE**

## 1. Résumé

Dans ce chapitre, nous cherchons à tracer la courbe de fatigue d'une pièce en console (Acier S335 de longueur  $L=30$  cm et de section  $153.93 \text{ mm}^2$ ), sollicitée par une charge cyclique alternée analysée par le logiciel **ABAQUS**.

Nous utilisons deux types de sollicitation.

- Flexion pure.
- Compression-traction.

Nous utilisons 3 formes de sections transversales en gardant la même section  $S=153.93 \text{ mm}^2$

- Section circulaire  $D=14$  mm,  $S = \frac{\pi * D^2}{4} = 153.93 \text{ mm}^2$
- Section carre  $H=12.4$  mm,  $S = H^2 = 153.93 \text{ mm}^2$
- Section rectangulaire  $B=10$  mm,  $H=15.393$ mm,  $S = B * H = 153.93 \text{ mm}^2$

## **2. Modélisation numérique :**

### **2.1. Présentation du logiciel ABAQUS :**

Le logiciel **ABAQUS** est un outil de calcul basé sur la méthode des éléments finis, il est adapté à la résolution de problèmes du Génie Civil et autres. Ses domaines de compétences sont le calcul de structures, la mécanique des sols, les transferts thermiques, l'hydrogéologie, etc. Il est connu et répandu, en particulier pour sestraitements performants de problèmes non-linéaires.

**ABAQUS** contient une bibliothèque étendue des éléments qui peuvent modeler pratiquement n'importe quelle géométrie. Il a une liste également étendue de modèles matériels qui peuvent simuler le comportement de la plupart des matériaux typiques de technologie comprenant des métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, le béton armé, et les matériaux géotechniques tels que les sols et la roche.

Conçu comme outil d'usage universel de simulation. Ce logiciel est simple à employer et offre à l'utilisateur un éventail de possibilités, même les matériaux les plus compliqués peuvent être modélisés facilement. Par exemple, des problèmes avec les composants multiples sont modélisés en associant la géométrie, définissant chaque composant aux modèles matériels appropriés.

Dans la plupart des simulations, y compris fortement les non linéaires, le besoin d'utilisateur fournit seulement les données de technologie telles que la géométrie de la structure, le comportement des matériaux constitutants, ses états de frontière, et les charges appliquées.

Il peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : les poutres, plaques, coques et tous les éléments spéciaux (ressorts, masses etc...) en deux ou en trois dimensions.

Dans une analyse non linéaire, **ABAQUS** choisit automatiquement des incréments de charge et des tolérances appropriés de convergence. Non seulement choisit- continuellement pendant l'analyse, pour s'assurer qu'une solution précise est obtenue efficacement.

### **2.2. Procédure générale du logiciel :**

Nous allons décrire toutes les étapes à suivre pour intégrer les caractéristiques nécessaires à la modélisation d'une coupe orthogonale avec **ABAQUS**. Une grande partie de paramètres spécifiques à **ABAQUS** ont été obtenus grâce au travail de recherche de différentes thèses Les étapes de calcul seront menées comme suit :

➤ **Part**

Dans ce module, on traite une pièce en 3D avec les caractéristiques géométriques (longueur, largeur, hauteur, diamètre). **Figure (3.1 ; 3. 2 ; 3. 3 ; 3.4)**

➤ **Property**

Dans ce module, on déclare les propriétés du matériau. **Figure (3.5; 3. 6 ; 3. 7 ; 3.8 ; 3.9)**

➤ **Assembly**

Dans ce module, on assemble les parties de la pièce. **Figure 3.10**

➤ **Step**

Dans ce module, précision du mode de chargement cyclique.

Il faut entrer le nombre de cycles. **Figure (3.11 ; 3. 12 ; 3. 13 ; 3.14)**

➤ **Load**

Dans ce module, Nous allons définir les deux conditions limite à l'extrémité nécessaire à la simulation.

Il faut entrer le type de chargement (charge sinusoïdale) sous forme de tableaux. **Figure (3. 12 ; 3. 13 ; 3.14)**

➤ **Mesh**

Dans ce module, il faut entrer taille globale approximative 30 mm. **Figure 3.15**

➤ **Job**

Dans ce module, uniquement les résultats en terme de contraintes. **Figure 3.16**

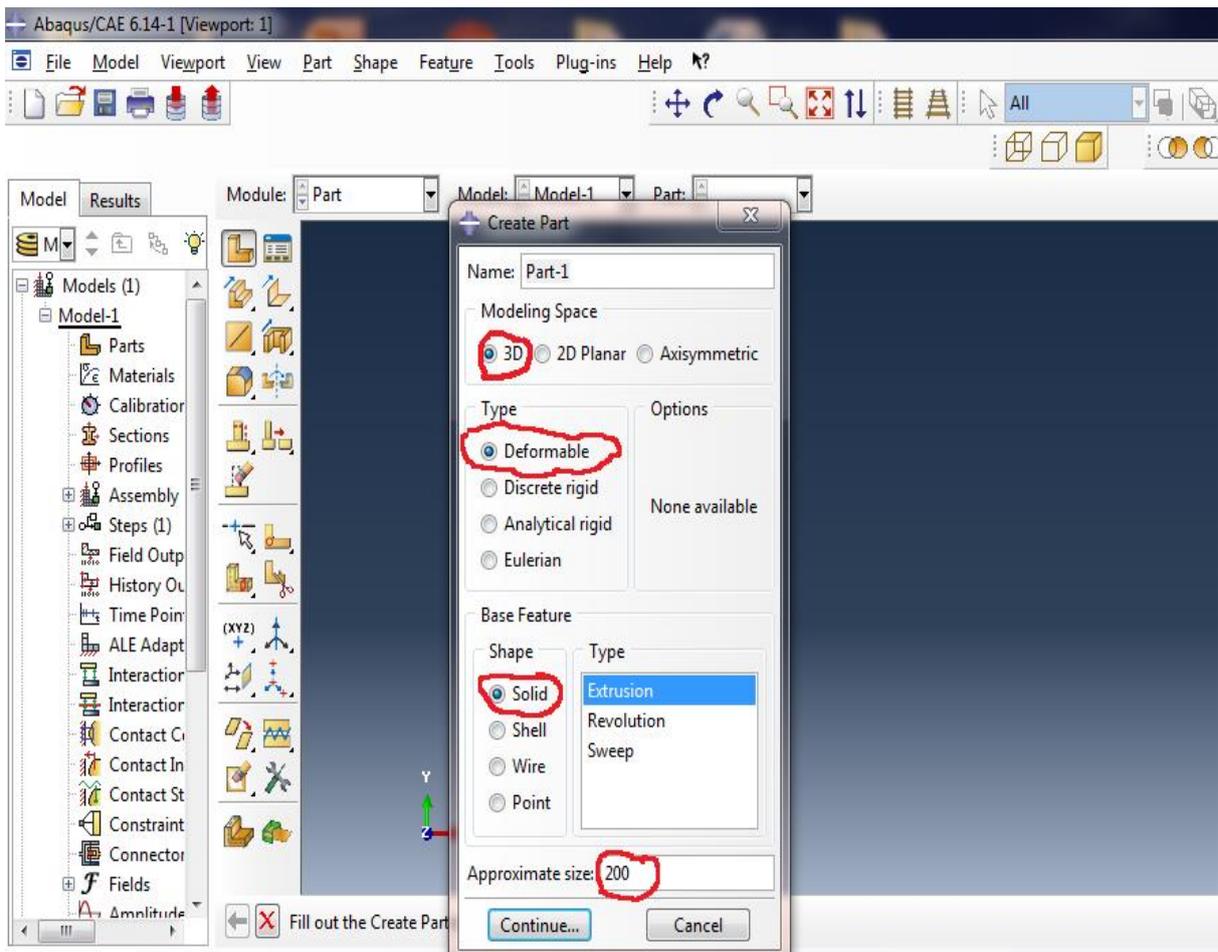
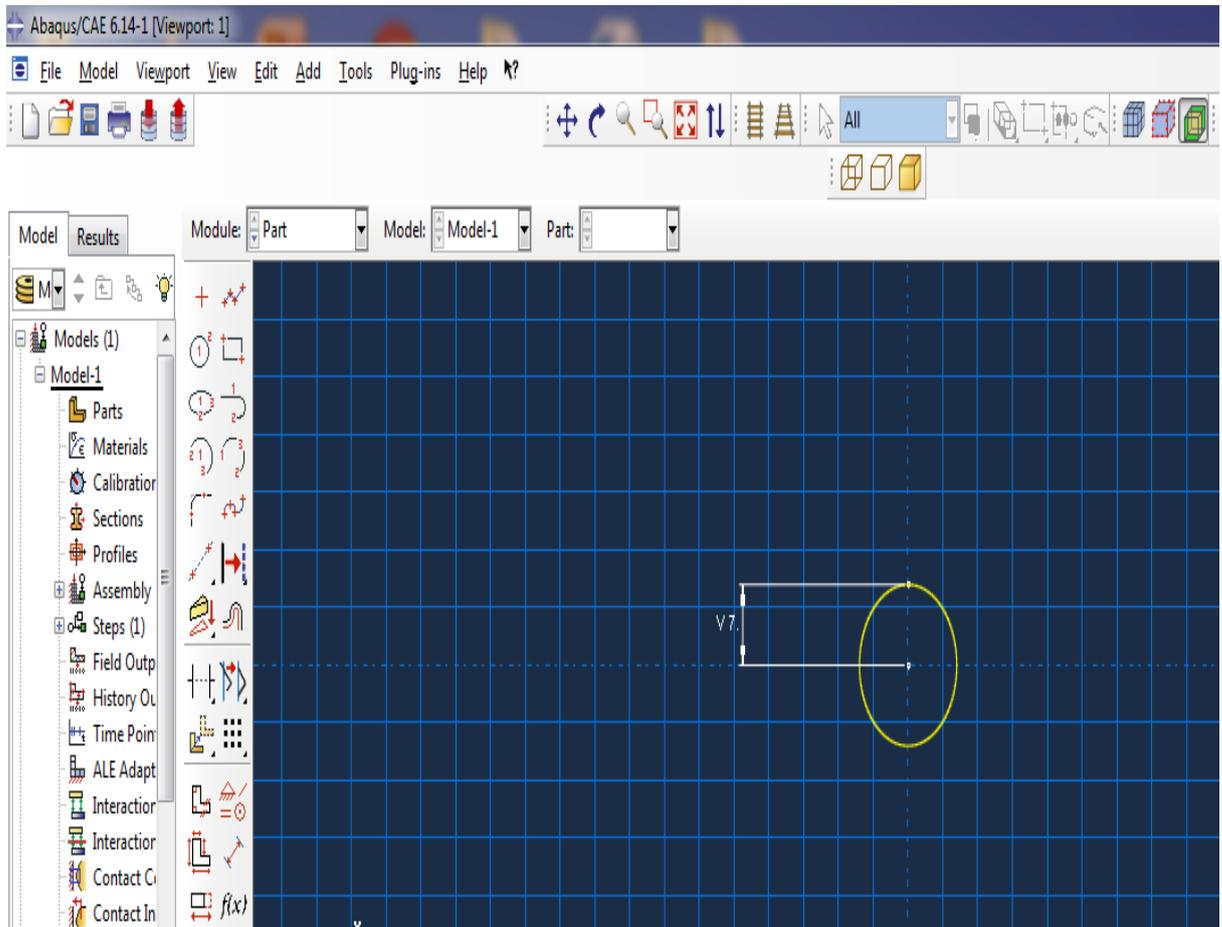


Figure 3.1 modélisation de la géométrie.



**Figure 3. 2 données de la section transversale.**

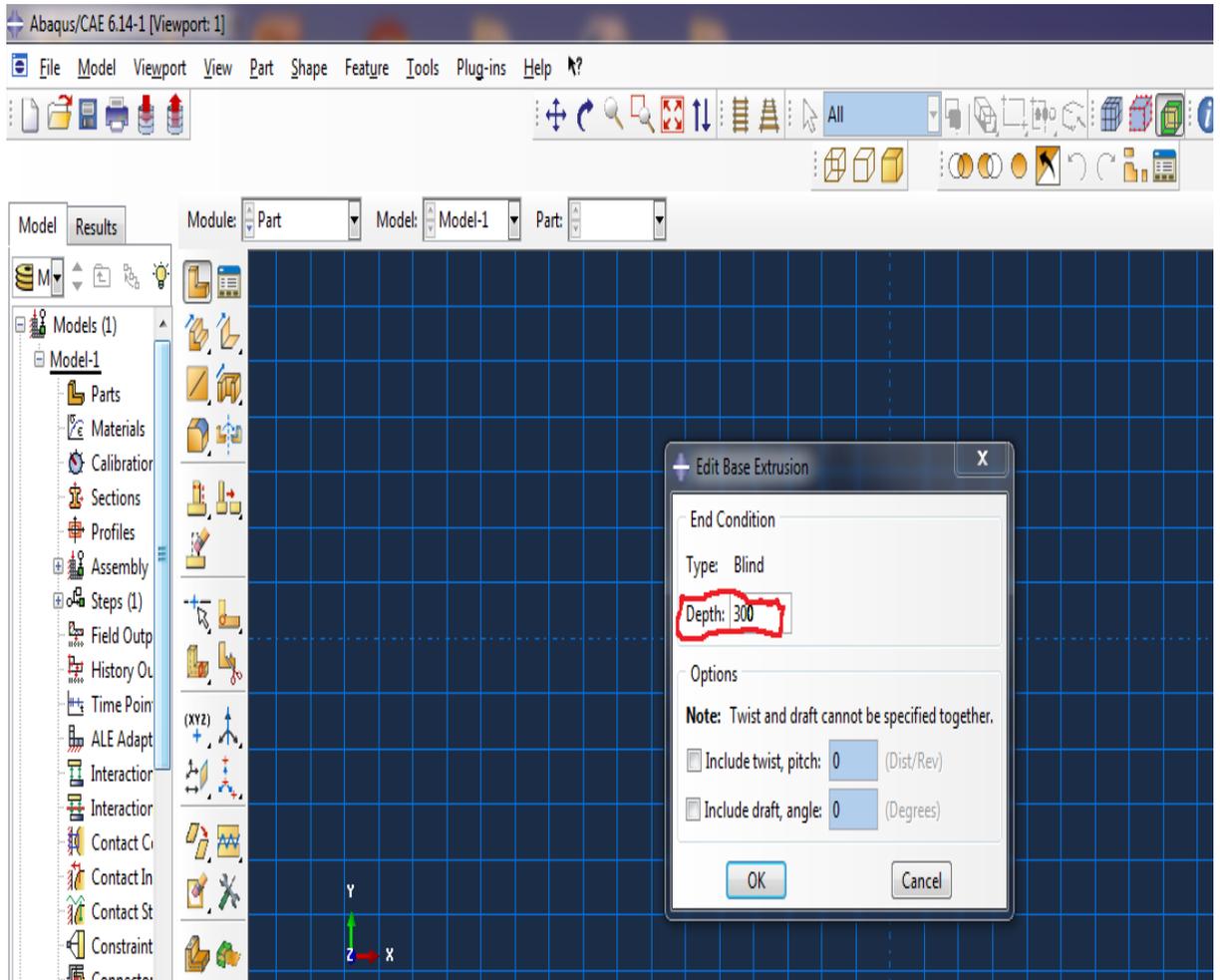
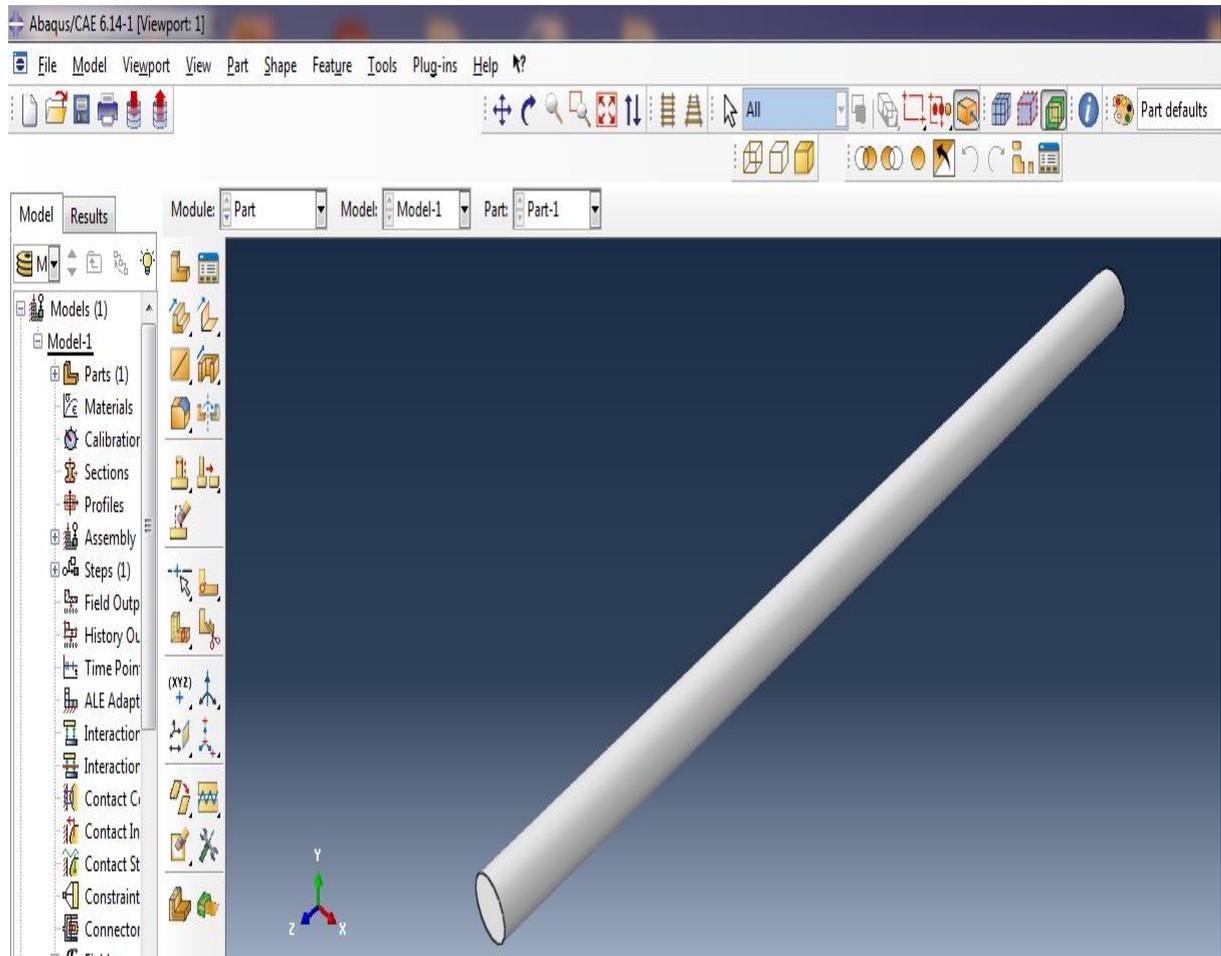


Figure 3. 3 longueurs de la pièce.



**Figure 3.4** Présentation de la pièce.

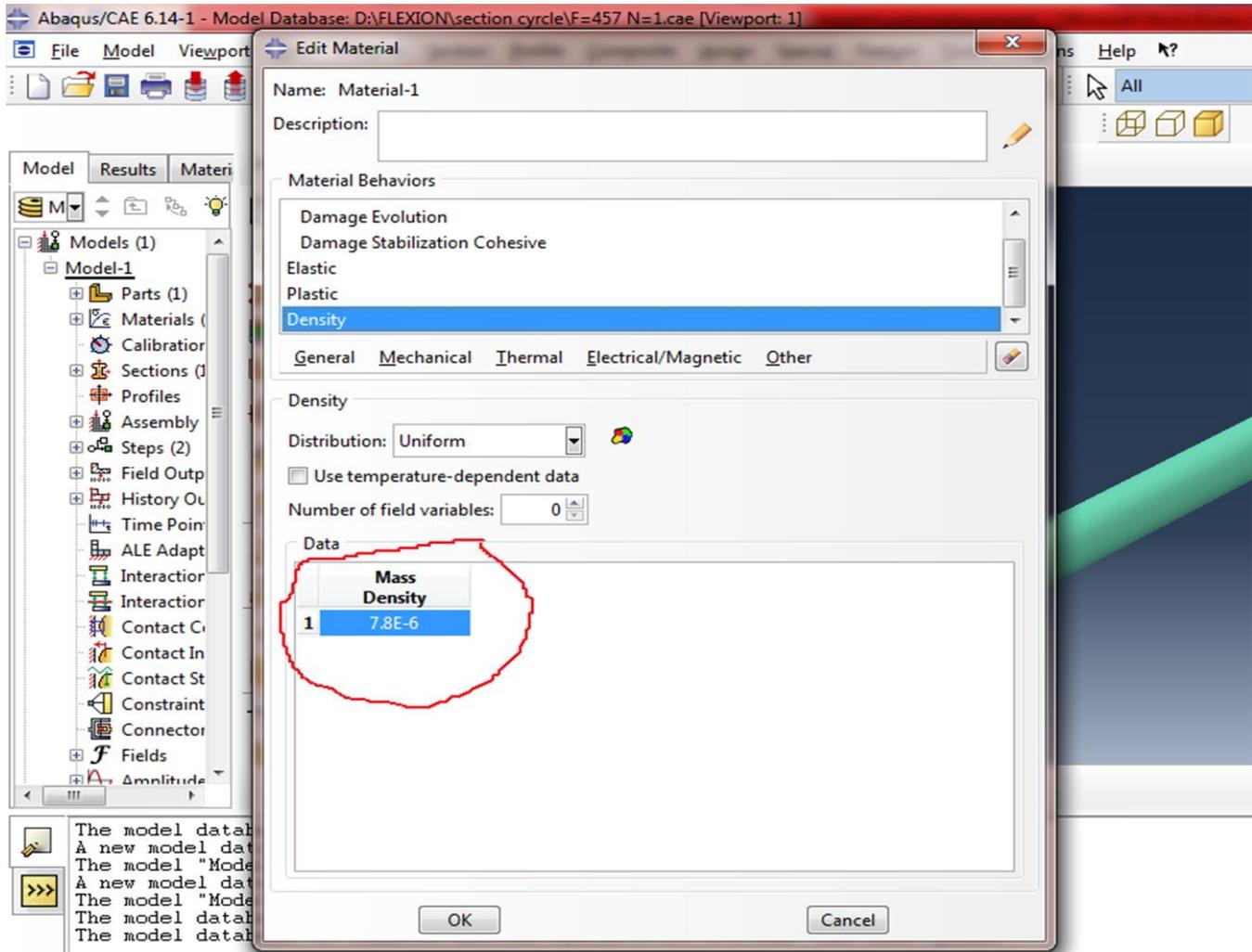


Figure 3.5 Déclaration de la masse volumique.

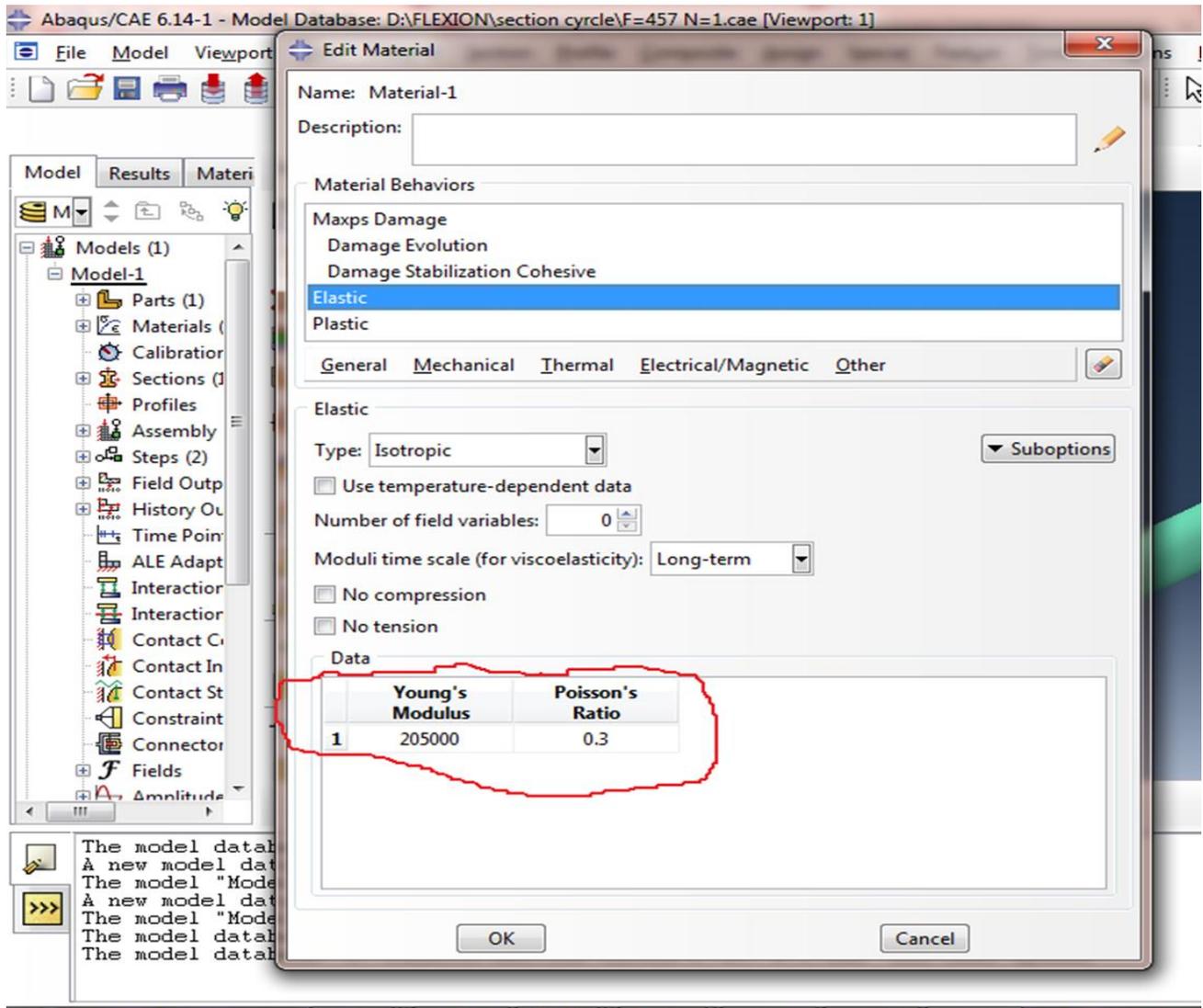


Figure 3.6 Module de Young, Coefficient de poisson.

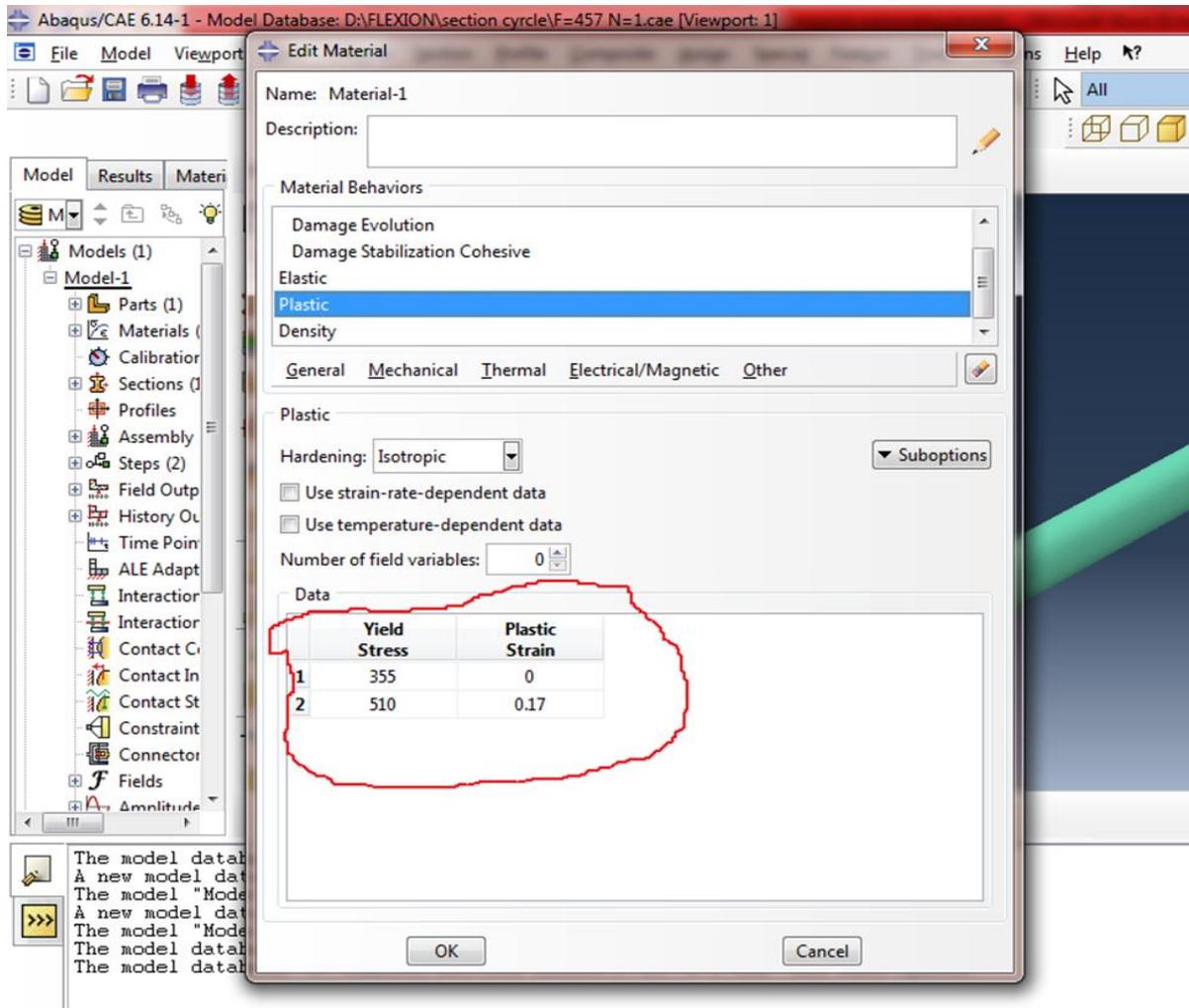


Figure 3.7 Contrainte, déformation plastique.

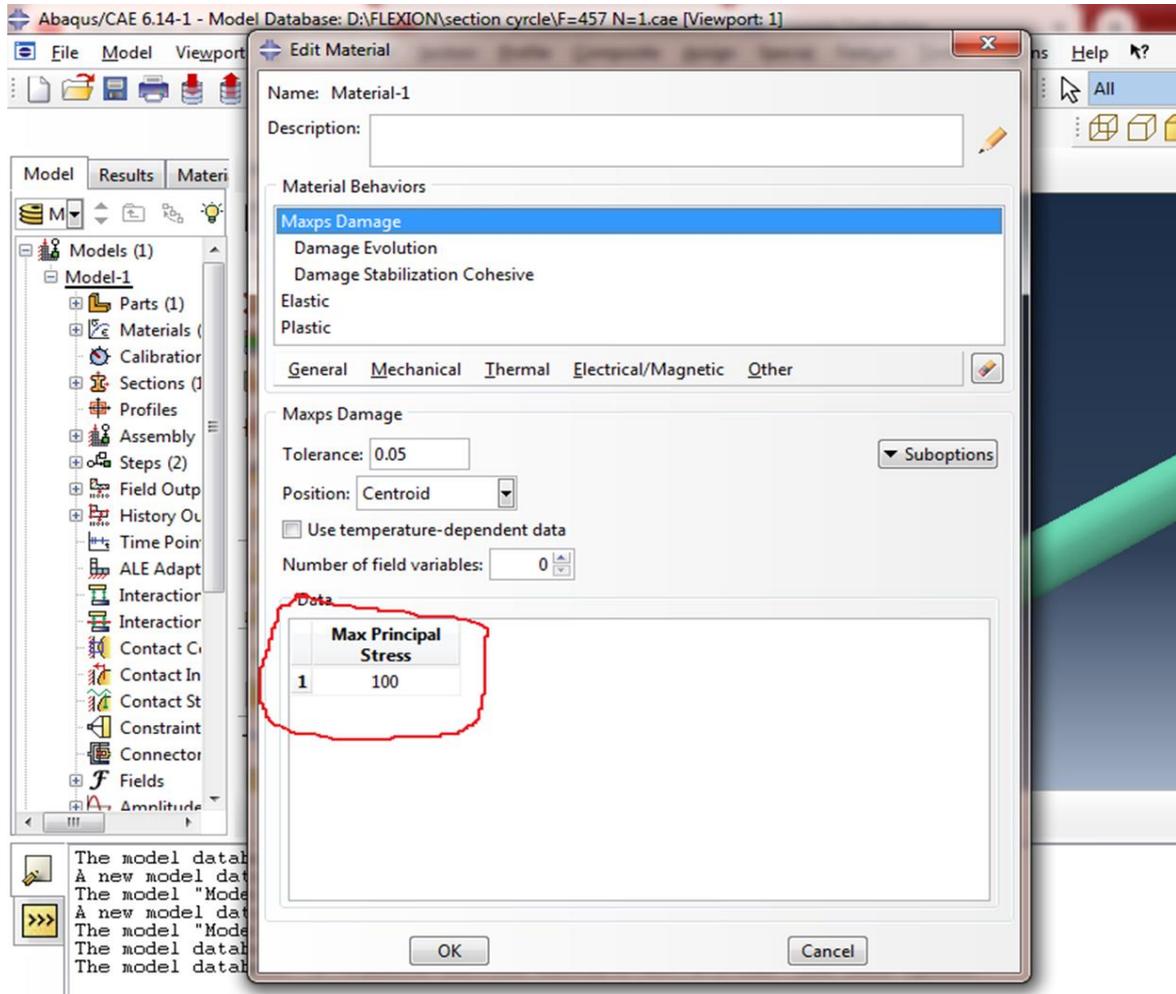


Figure 3.8 Contrainte principal maximale.

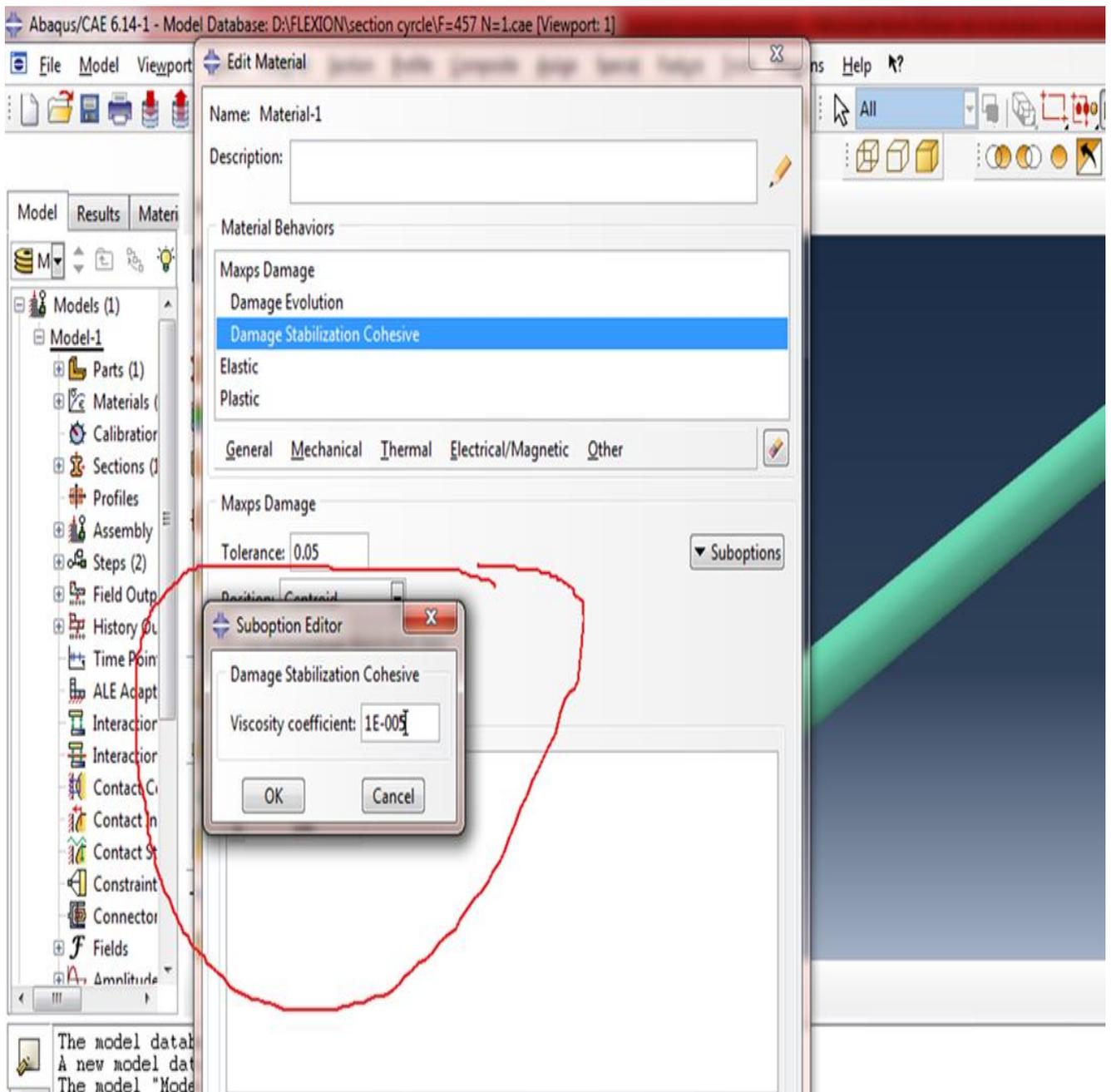


Figure 3.9 Coefficient de viscosité.

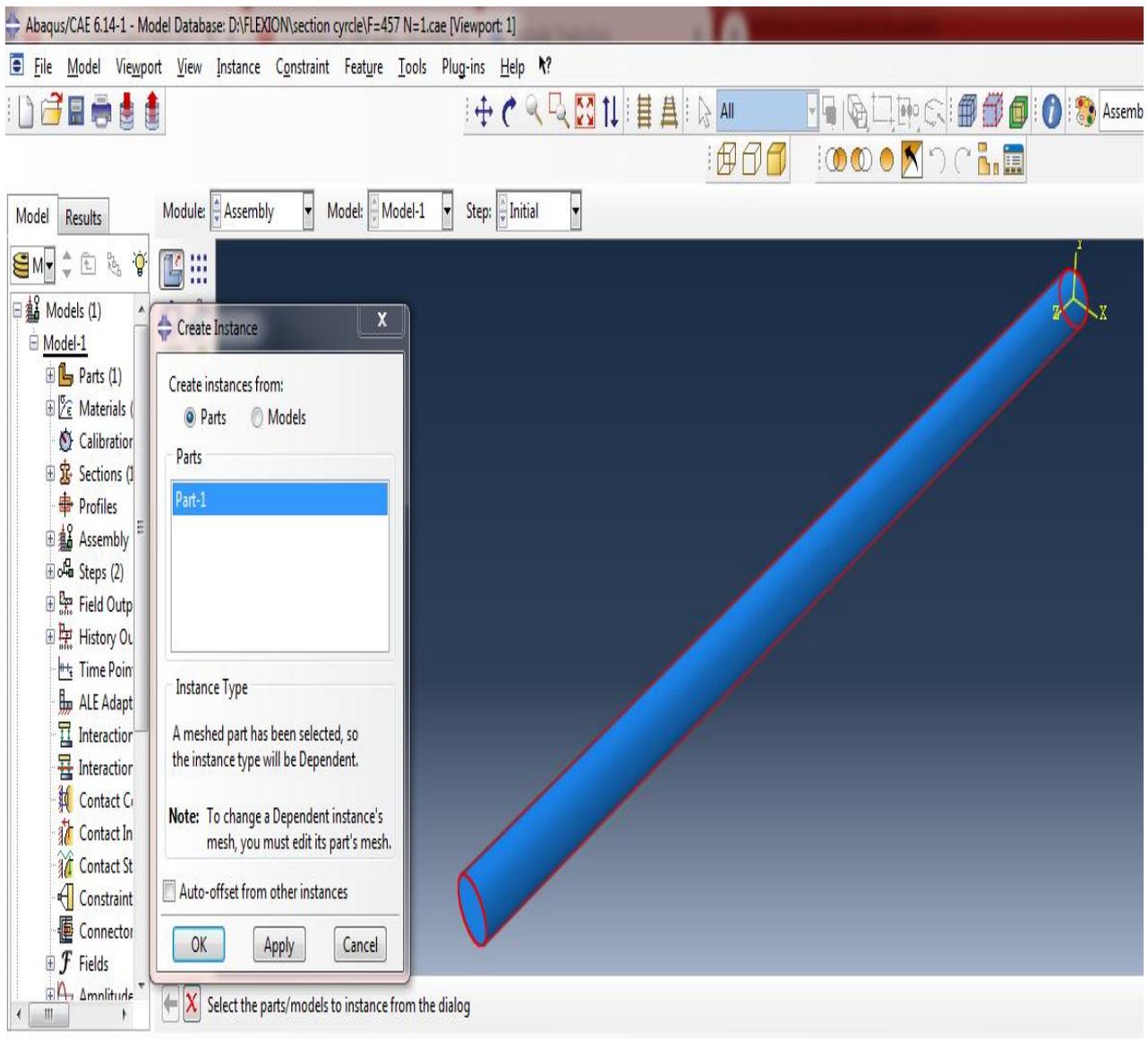


Figure 3.10 Assemblage.

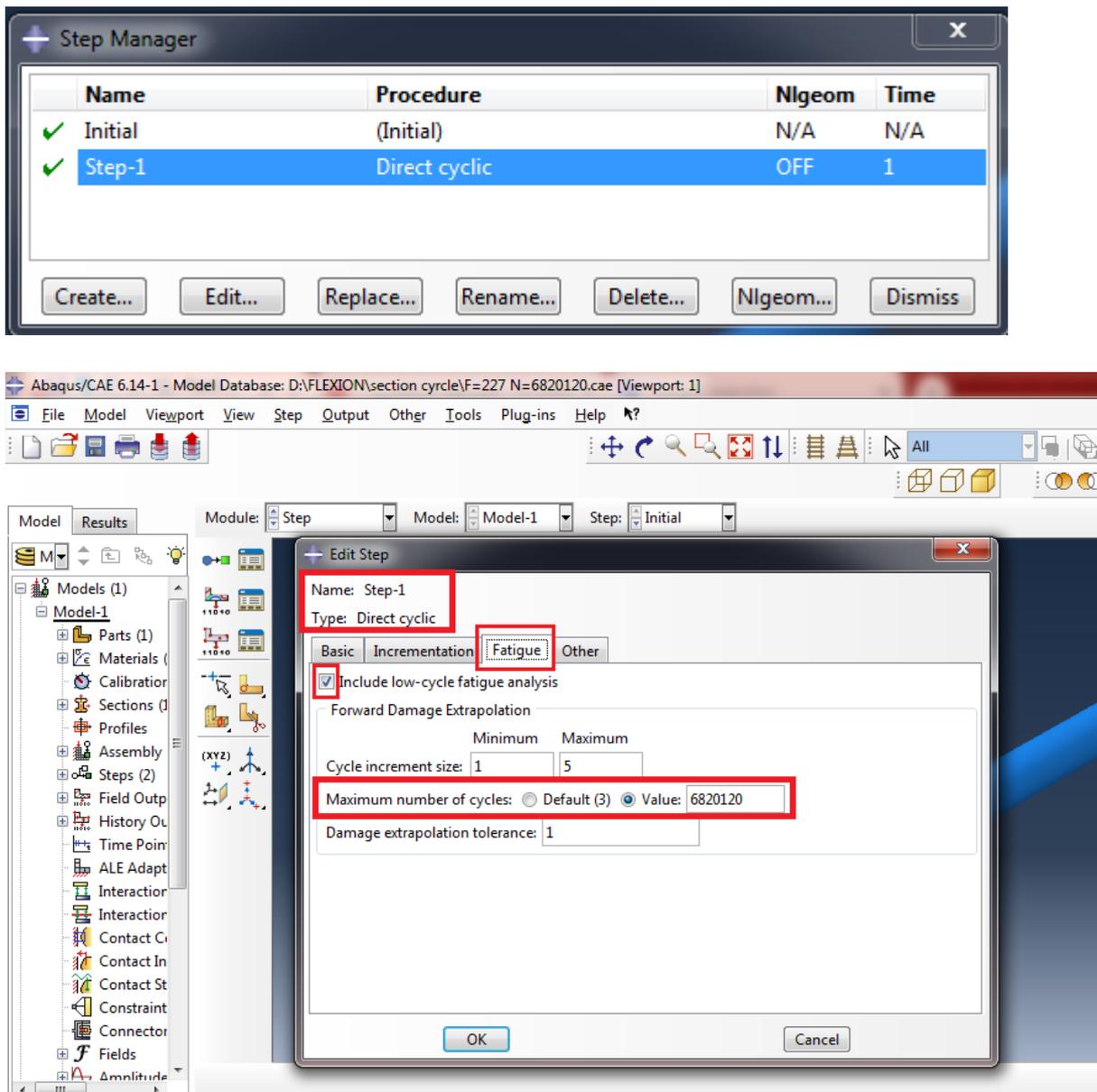
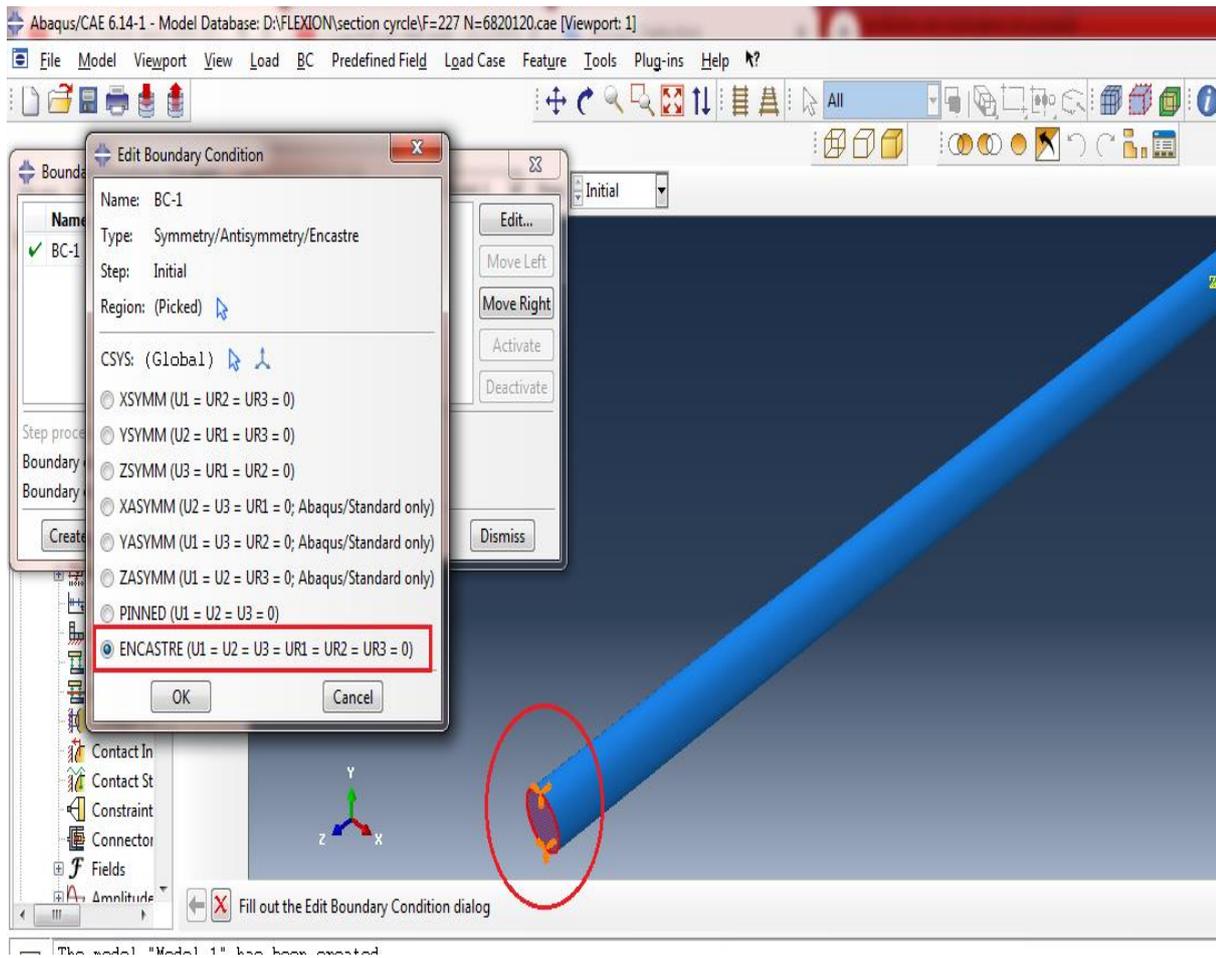


Figure 3.11 Activer la fatigue, Entrer le nombre de cycle.



**Figure 3.12** Encastrement à l'extrémité.

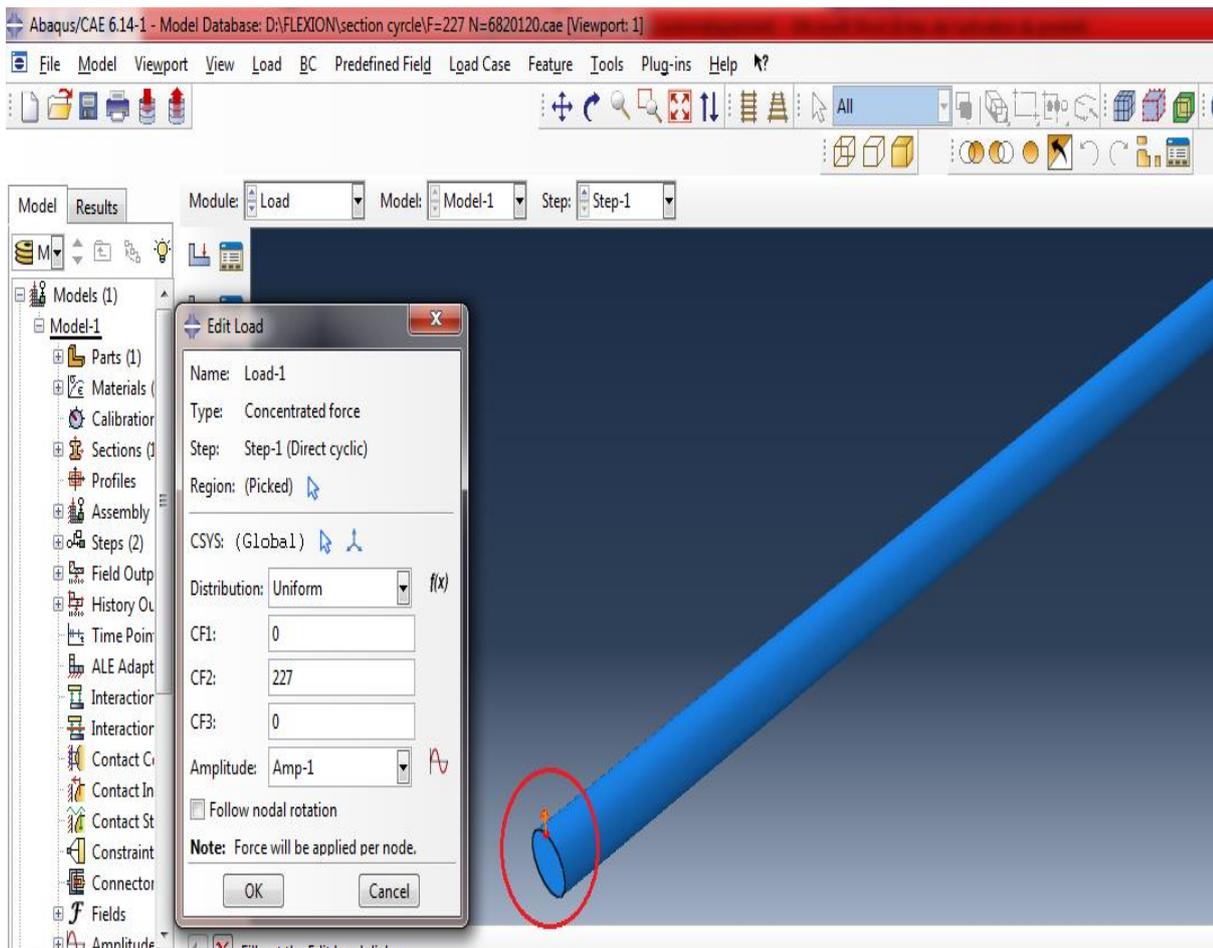


Figure 3.13 Déclaration de la charge.

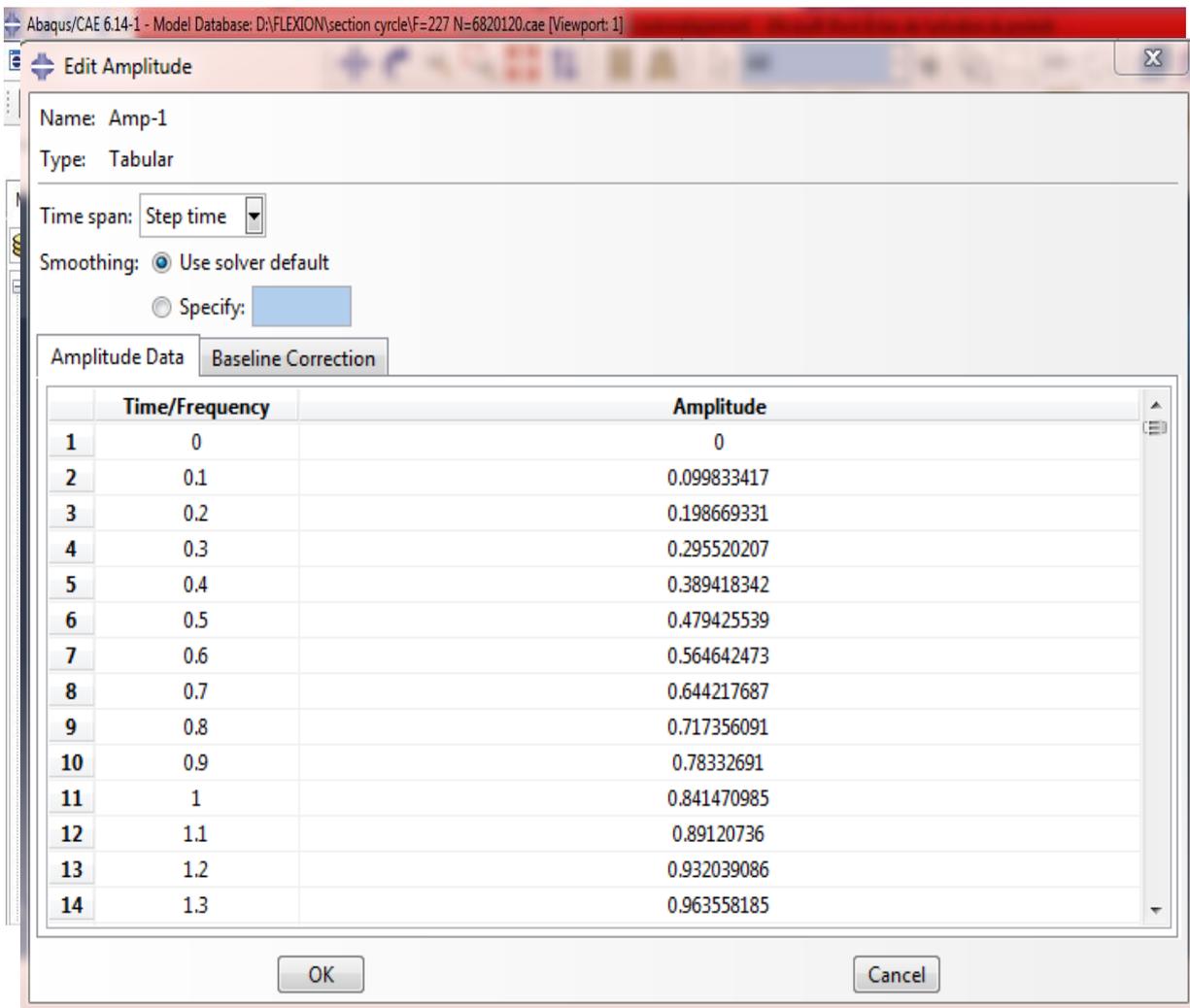
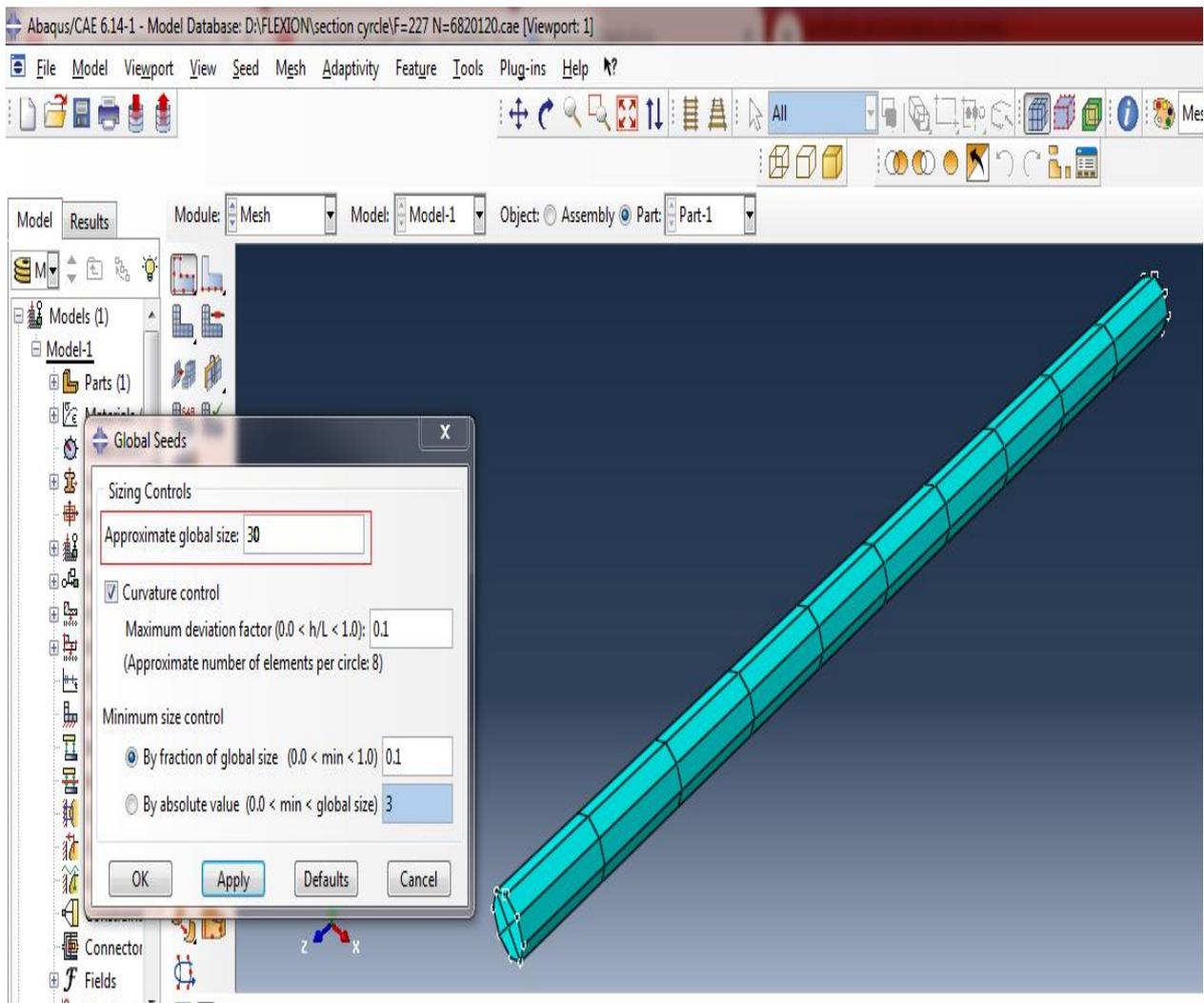
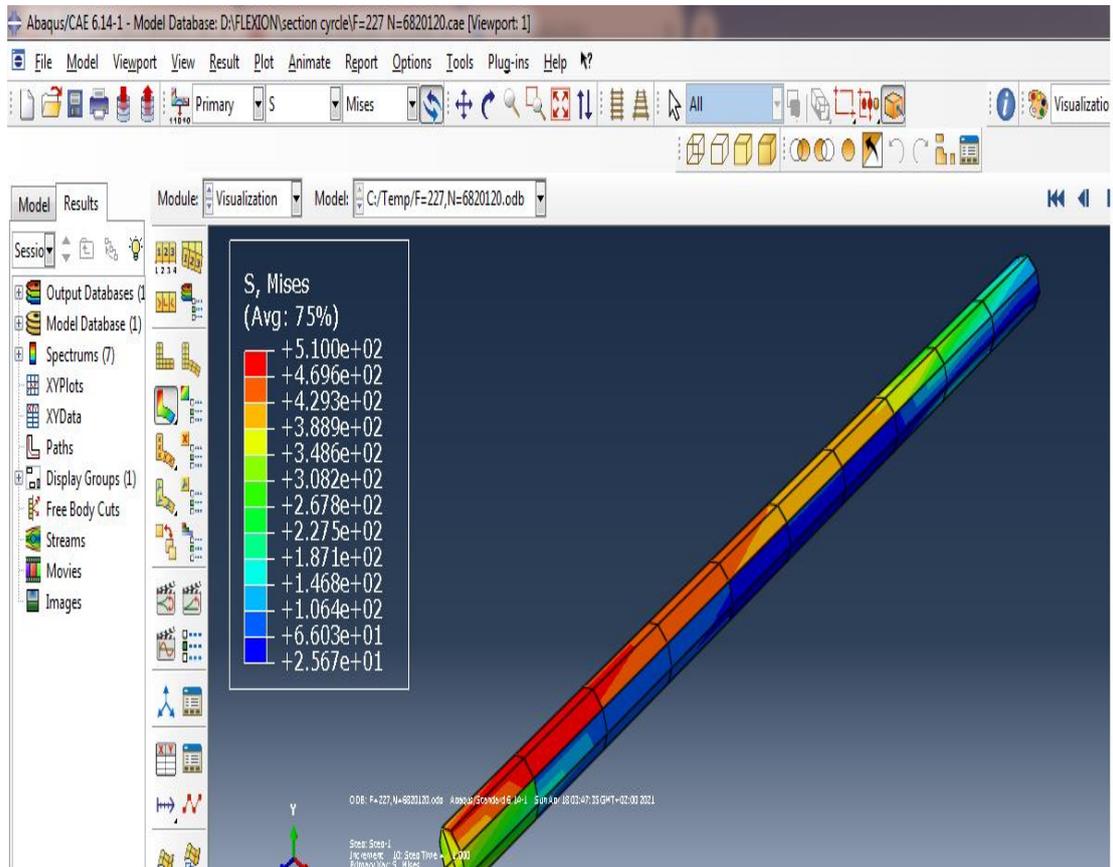


Figure 3.14 Type de chargement (charge sinusoïdale) sous forme de tableaux.

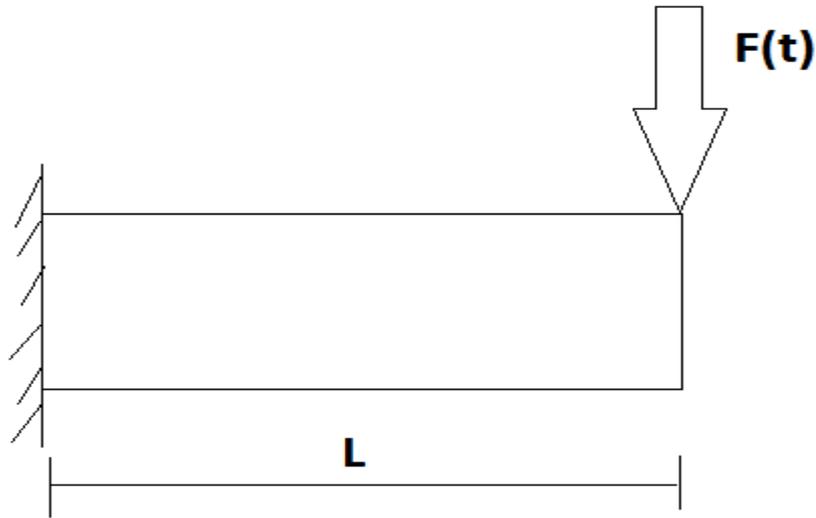


**Figure 3.15** Taille du maillage.



**Figure 3.16** Affichage des résultats.

**3. Fatigue sous chargement cyclique en flexion: cas général.**



$$F(t) = F_a * \sin(\omega t) + F_m$$

$$F_m = 0$$

$F_m$  : Force statique constante.

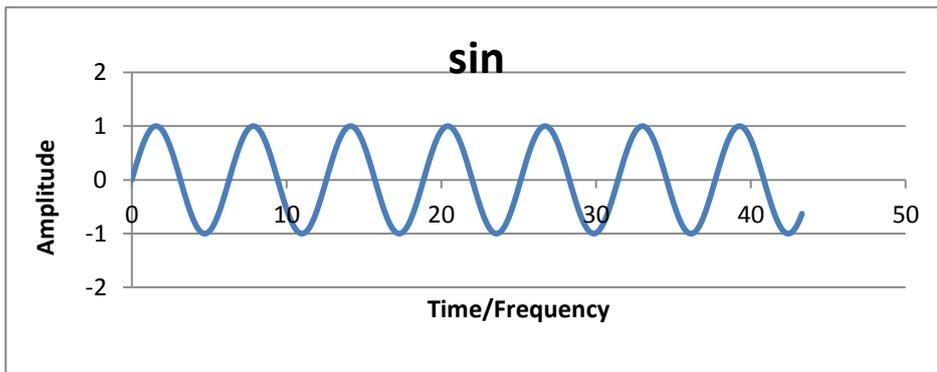
$F_a * \sin(\omega t)$  : Force variable suivant une loi harmonique a amplitude maximale  $F_a$ .

$$\sigma(t) = \sigma_a * \sin(\omega t) + \sigma_m$$

$$\sigma_m = 0$$

$\sigma_m$  : Contrainte statique constante.

$\sigma_a * \sin(\omega t)$  : Contrainte variable suivant une loi harmonique a amplitude maximale  $\sigma_a$ .

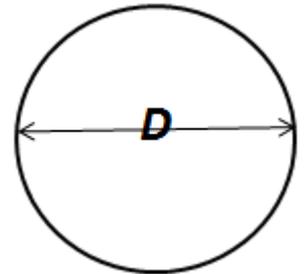


**Charge sinusoïdale.**

### 3.1. Section circulaire :

Les données :

$\sigma_a$	$I$	$M$	$y$	$\sigma_a$	D (mm)	L (mm)	$\sigma_a$
$\frac{M * y}{I}$	$\frac{D^4 * \pi}{64}$	$F_a * L$	$\frac{D}{2}$	$F_a \frac{32 * L}{\pi * D^3}$	14	300	$F_a * 1.114185438$



Résultats :

Nombre de cycle N	La charge maximale $F_a$ (N)	Amplitude de contrainte $\sigma_a$ (MPa)
1	457	509.182745
55	432	481.328109
85	407	453.473473
420	382	425.618837
630	357	397.764201
3050	332	369.909565
7800	307	342.054929
40120	282	314.200294
435100	257	286.345658
770080	247	275.203803
3652900	237	264.061949
6820120	227	252.920094

Tableau 3.1 Contrainte et charge maximale en flexion en fonction du nombre de cycles  
–section circulaire–.

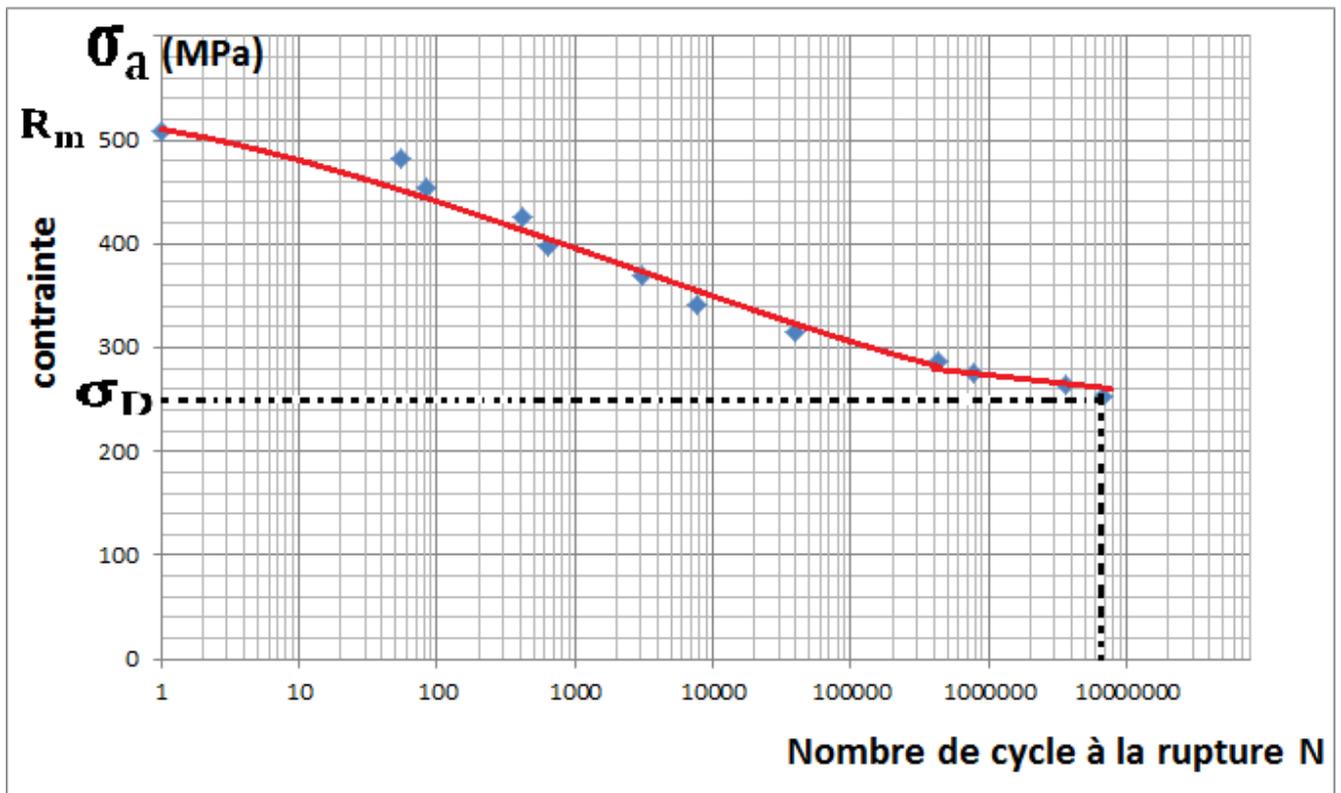


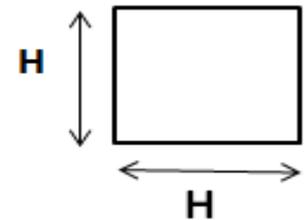
Figure 3.17 courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section circulaire (flexion).

$$\sigma_D = 252.920094 \text{ (MPa) Pour } N=6820120 \text{ cycles}$$

### 3.2. Section carrée :

Les données :

$\sigma_a$	$I$	$M$	$y$	$\sigma_a$	H (mm)	L (mm)	$\sigma_a$
$\frac{M * y}{I}$	$\frac{H^4}{12}$	$F_a * L$	$\frac{H}{2}$	$F_a \frac{6 * L}{H^3}$	12,4	300	$F_a * 0.9440770$



Résultats :

Nombre de cycle N	La charge maximale $F_a$ (N)	Amplitude de contrainte $\sigma_a$ (MPa)
1	540	509.80158
42	510	481.47927
84	480	453.15696
360	450	424.83465
750	420	396.51234
3000	390	368.19003
7500	360	339.86772
51000	330	311.54541
540000	300	283.2231
780000	290	273.78233
900000	280	264.34156
4500000	270	254.90079
7000000	265	250.180405

Tableau 3.2 Contrainte et charge maximale en flexion en fonction du nombre de cycles

–section carrée –.

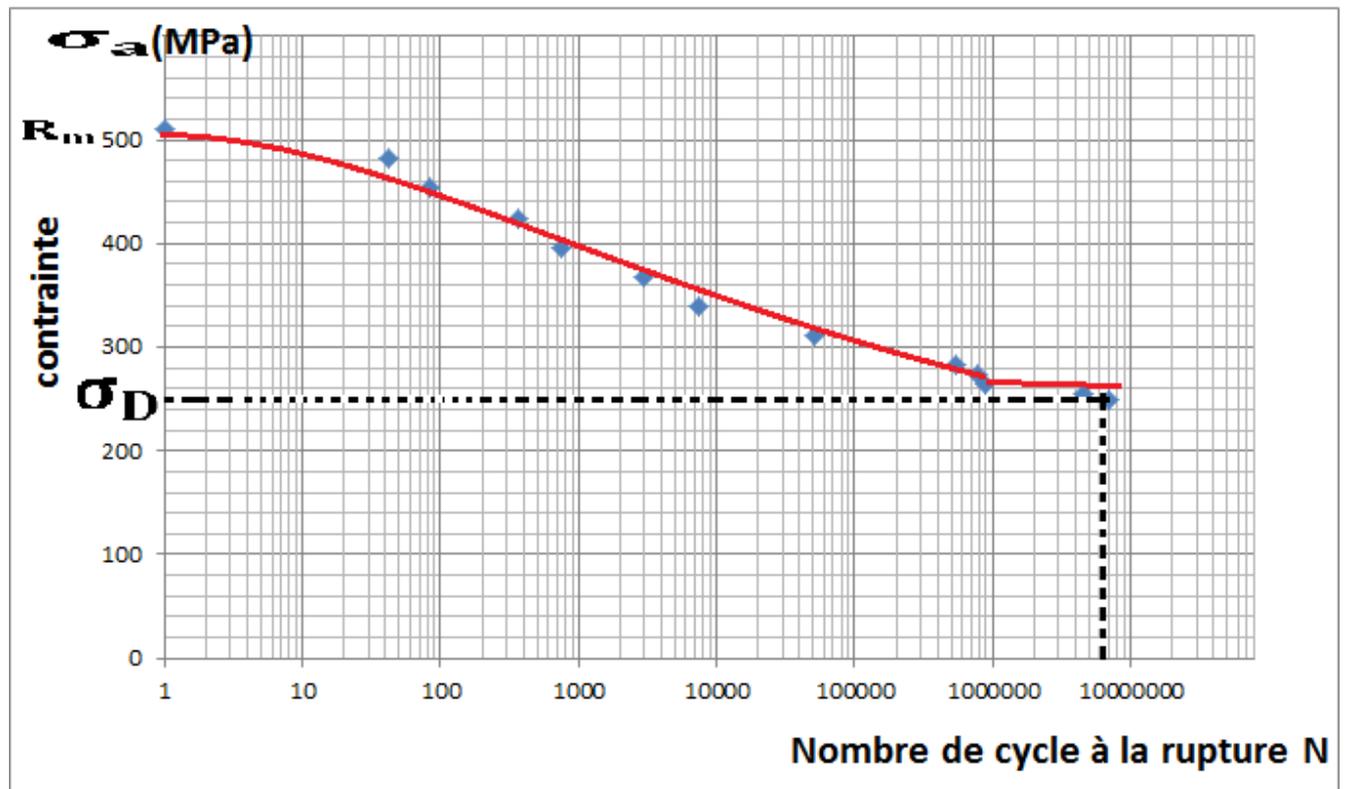
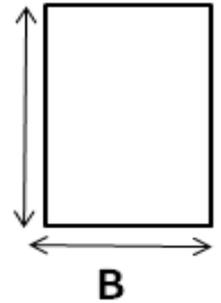


Figure 3.18 courbe de fatigue ( $\sigma$ - $N$ ) section carrée à (flexion).

$$\sigma_D = 250.180405 \text{ (MPa) Pour } N=7000000 \text{ cycles.}$$

### 3. 3. Section rectangulaire :

Les données :



$\sigma_a$	$I$	$M$	$y$	$\sigma_a$	$B$ (mm)	$H$ (mm)	$L$ (mm)	$\sigma_a$
$\frac{M * y}{I}$	$\frac{H^3 * B}{12}$	$F_a * L$	$\frac{H}{2}$	$F_a \frac{6 * L}{H^2 * B}$	10	15,393	300	$F_a * 0.75967173$

Résultats :

Nombre de cycle N	La charge maximale $F_a$ (N)	Amplitude de contrainte $\sigma_a$ (MPa)
1	670	508.980059
60	635	482.391549
95	600	455.803038
370	565	429.214527
820	530	402.626017
3250	495	376.037506
8100	460	349.448996
55600	425	322.860485
650600	390	296.271975
750000	355	269.683464
9950000	345	262.086747
4450000	335	254.49003
7268000	325	246.893312

Tableau 3.3 Contrainte et charge maximale en flexion en fonction de cycles

– section rectangulaire-.

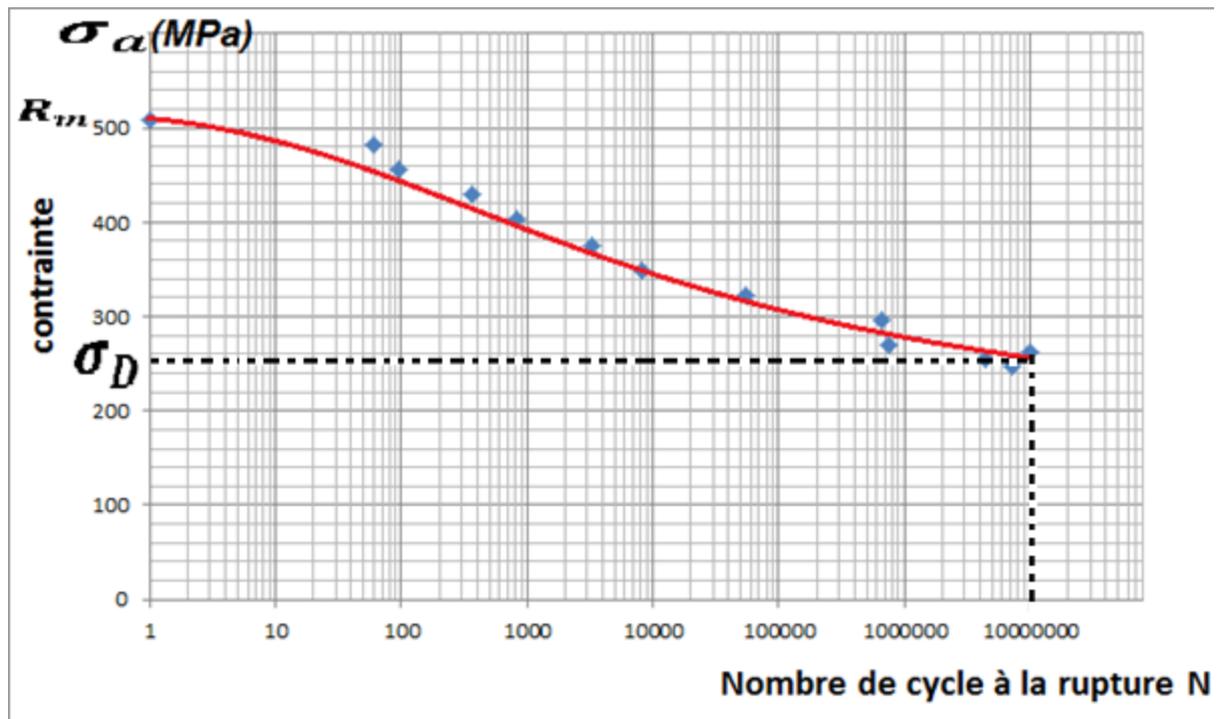
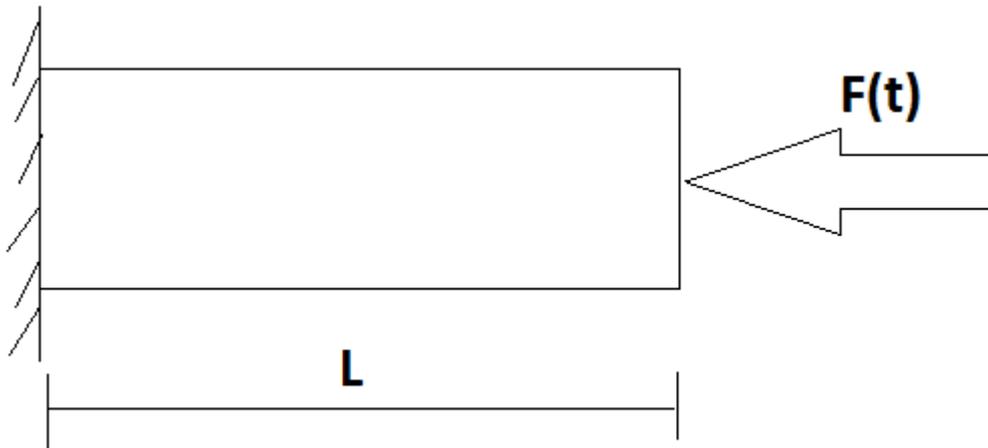


Figure 3.19 courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section rectangulaire à (flexion).

$$\sigma_D = 246.893312 \text{ (MPa) Pour } N=7268000 \text{ cycles.}$$

#### 4. Fatigue sous chargement cyclique en compression-traction : cas général.



$$F(t) = F_a * \sin(\omega t) + F_m$$

$$F_m = 0$$

$F_m$  : Force statique constante.

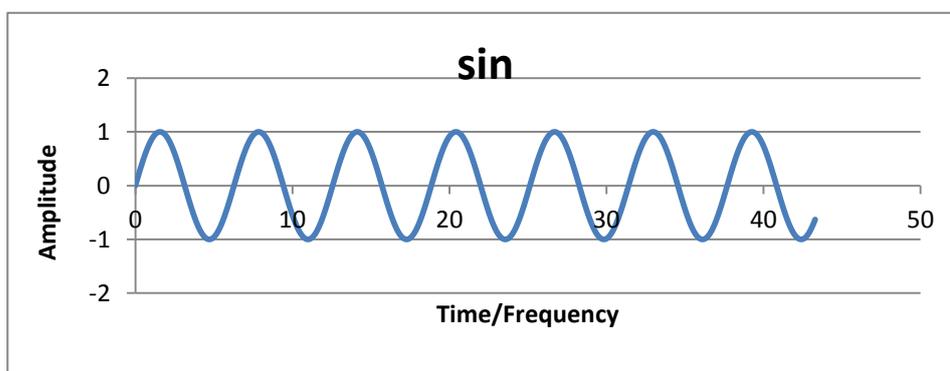
$F_a * \sin(\omega t)$  : Force variable suivant une loi harmonique a amplitude maximale  $F_a$ .

$$\sigma(t) = \sigma_a * \sin(\omega t) + \sigma_m$$

$$\sigma_m = 0$$

$\sigma_m$  : Contrainte statique constante.

$\sigma_a * \sin(\omega t)$  : Contrainte variable suivant une loi harmonique a amplitude maximale  $\sigma_a$ .

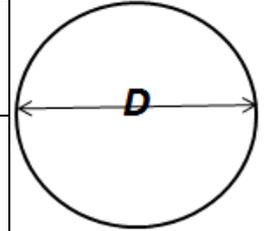


**Charge sinusoidale.**

#### 4.1. Section circulaire :

Les données :

$\sigma_a$	$A$	$D(mm)$	$\sigma_a$
$\frac{F_a}{A}$	$\frac{\pi * D^2}{4}$	14	$F_a * 0,00649$



Résultats

Nombre de cycle N	charge maximale $F_a$ (N)	Amplitude de contrainte $\sigma_a$ (MPa)
1	78417	509.406252
35	75417	489.917892
70	72417	470.429531
290	69417	450.941171
490	66417	431.45281
4120	63417	411.96445
6325	60417	392.47609
31310	57417	372.987729
583940	54417	353.499369
721890	51417	334.011009
943810	48417	314.522648
6184050	45417	295.034288
6871010	42417	275.545927

Tableau 3.4 Contrainte et charge maximale en traction- compression en fonction de cycles  
– section circulaire -.

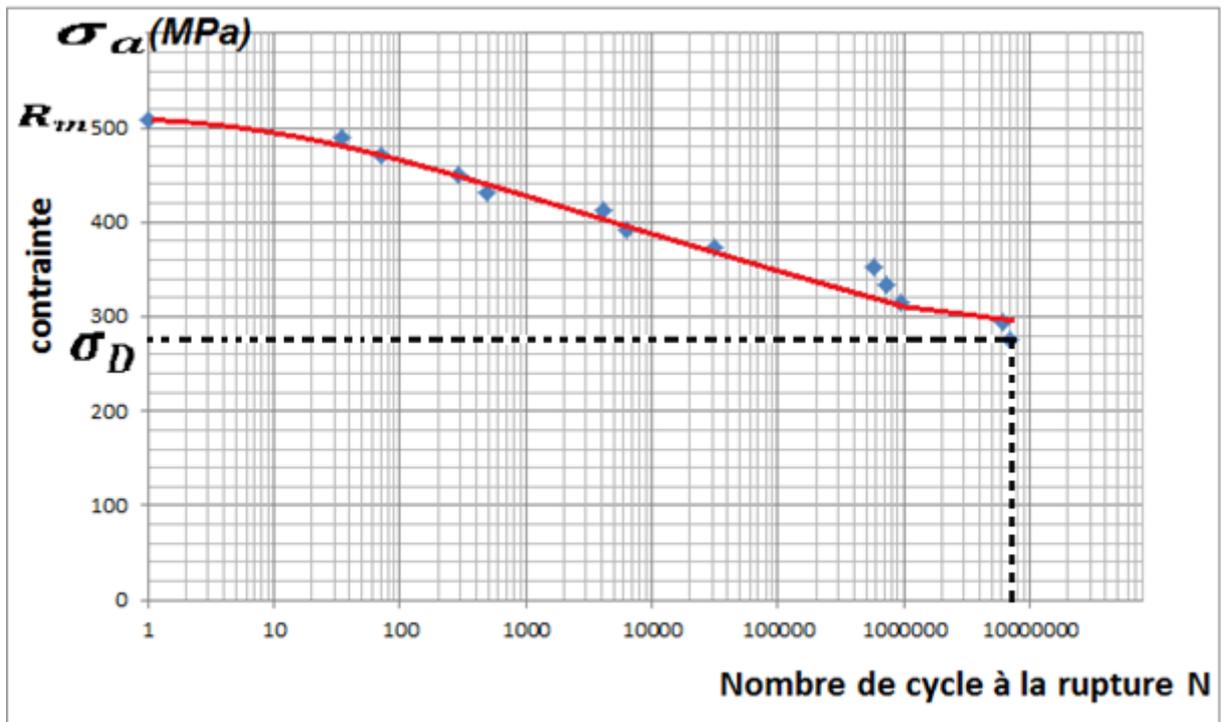


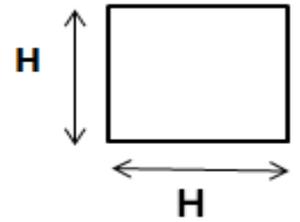
Figure 3.20 courbe de fatigue ( $\sigma$ - $N$ ) section circulaire à (compression- traction).

$$\sigma_D = 250.180405 \text{ (MPa) Pour } N=6871010 \text{ cycles.}$$

## 4.2. Section carrée :

Les données :

$\sigma_a$	$A$	$H(mm)$	$\sigma_a$
$\frac{F_a}{A}$	$H * H$	12.4	$F_a * 0.0065036$



Résultats :

Nombre de cycle N	La charge maximale $F_a$ (N)	Amplitude de contrainte $\sigma_a$ (MPa)
1	78508	510.587929
45	75508	491.077003
68	72508	471.566077
280	69508	452.055151
535	66508	432.544225
4410	63508	413.033299
6980	60508	393.522373
36470	57508	374.011446
486590	54508	354.50052
651380	51508	334.989594
824000	48508	315.478668
3289540	45508	295.967742
7135600	42508	276.456816

Tableau 3.5 Contrainte et charge maximale en traction- compression en fonction de cycles

– section carrée -.

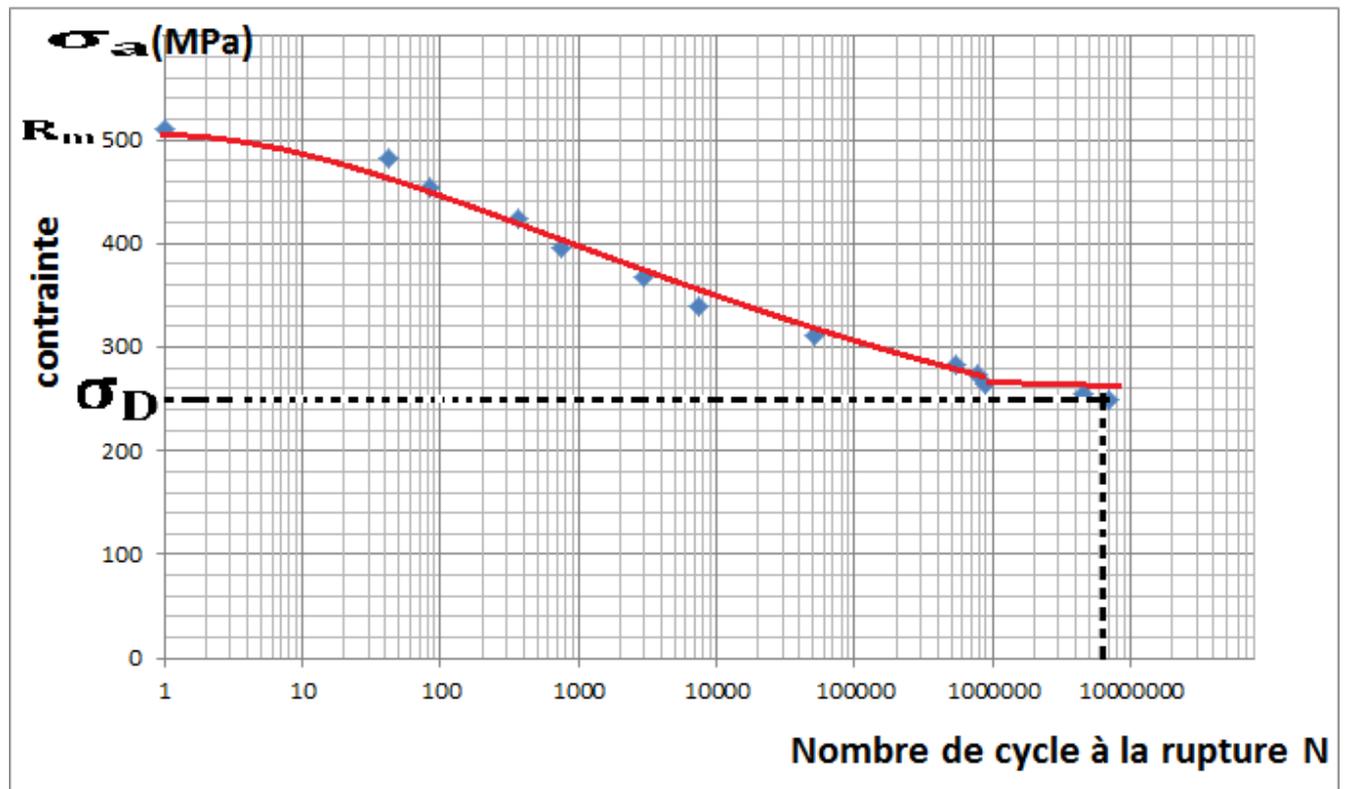


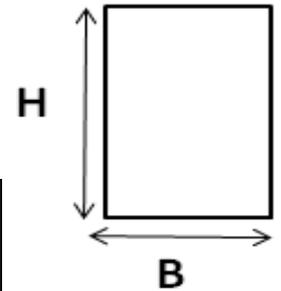
Figure 3 .21 courbe de fatigue ( $\sigma$ - $N$ ) section carrée à (compression- traction).

$\sigma_D = 276.456816$  (MPa) Pour  $N=7135600$  cycles.

### 4.3. Section rectangulaire :

Les données :

$\sigma_a$	$A$	$H(mm)$	$B (mm)$	$\sigma_a$
$\frac{F_a}{A}$	$B * H$	15.393	10	$F_a * 0.0064964$



Résultats :

Nombre de cycle N	La charge maximale $F_a$ (N)	Amplitude de contrainte $\sigma_a$ (MPa)
1	78504	509.998051
29	75504	490.508673
67	72504	471.019294
460	69504	451.529916
900	66504	432.040538
3980	63504	412.55116
5840	60504	393.061781
41380	57504	373.572403
397510	54504	354.083025
513040	51504	334.593646
891200	48504	315.104268
5891100	45504	295.61489
6991540	42504	276.125512

Tableau 3.6 Contrainte et charge maximale en traction – compression en fonction du nombre de cycles  
-section rectangulaire-.

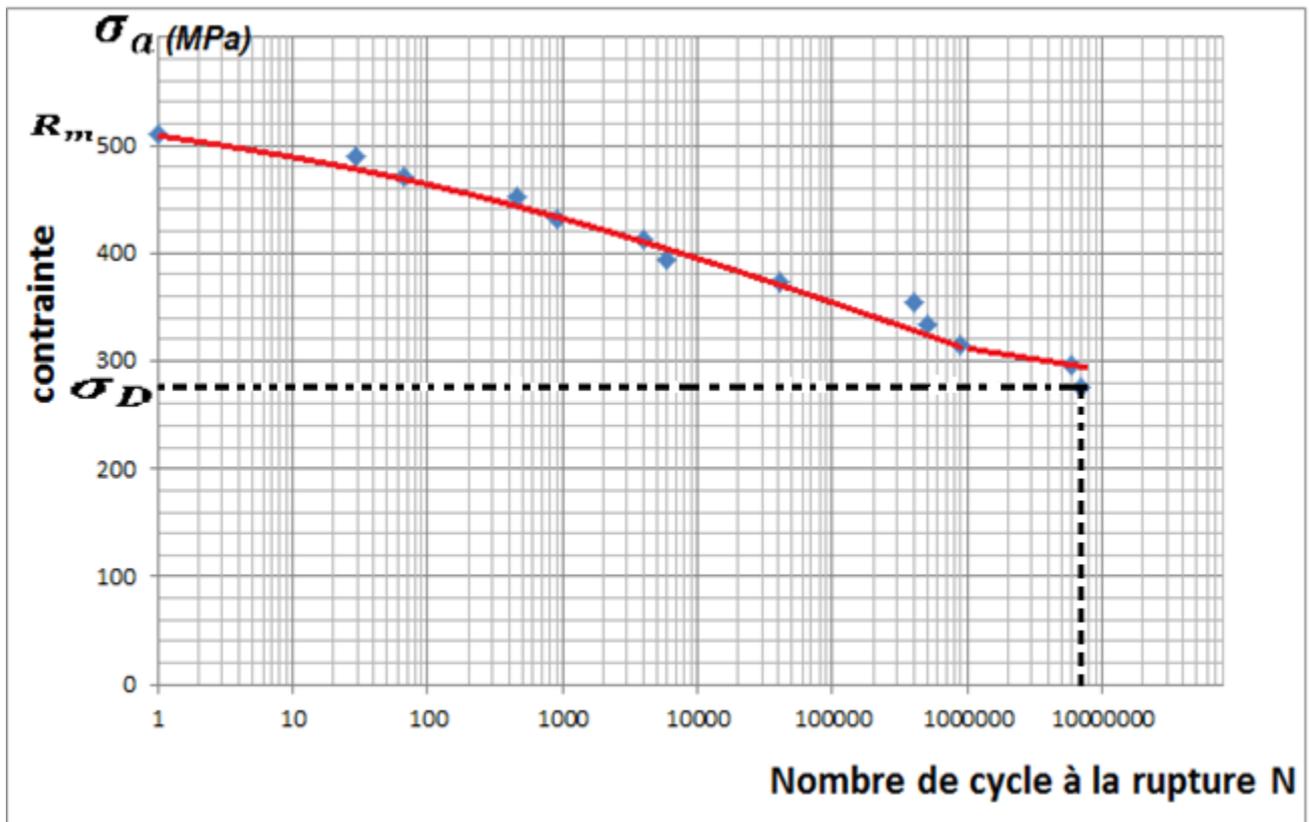


Figure 3.22 Courbe de fatigue ( $\sigma$ -N) section rectangulaire à (compression- traction).

$$\sigma_D = 276.125512(\text{MPa}) \text{ Pour } N=6991540 \text{ cycles.}$$

## 5. Analyse des résultats :

### 5.1 Flexion :

<b>Contrainte</b> <b>Forme de la section</b>	<b><math>R_m</math>(MPa)</b>	<b><math>\sigma_D</math>(MPa)</b>	<b><math>R_m - \sigma_D</math> (MPa)</b>	<b><math>\frac{\sigma_a}{R_m}</math> (%)</b>	<b>Nombre de cycles</b>
<b>Circulaire</b>	<b>509,18</b>	<b>252,92</b>	<b>256,26</b>	<b>49,67</b>	<b>6820120</b>
<b>Carrée</b>	<b>509,80</b>	<b>250,18</b>	<b>259,62</b>	<b>49,07</b>	<b>7000000</b>
<b>Rectangulaire</b>	<b>508,98</b>	<b>246,89</b>	<b>262,09</b>	<b>48,50</b>	<b>7268000</b>

**Tableau 3.7 Relation entre résistance statique  $R_m$  et limite d'endurance  $\sigma_D$  .**

### 5.2. compression-traction :

<b>Contrainte</b> <b>Forme de la section</b>	<b><math>R_m</math></b> <b>(MPa)</b>	<b><math>\sigma_D</math>(MPa)</b>	<b><math>R_m - \sigma_D</math></b> <b>(MPa)</b>	<b><math>\frac{\sigma_a}{R_m}</math> (%)</b>	<b>Nombre de cycles</b>
<b>circulaire</b>	<b>509 ,406252</b>	<b>275,545927</b>	<b>233,860325</b>	<b>54,0915873</b>	<b>68710710</b>
<b>Carré</b>	<b>510,587929</b>	<b>276,456816</b>	<b>234,131113</b>	<b>54 ,1448005</b>	<b>7135600</b>
<b>rectangle</b>	<b>509, 998051</b>	<b>276,125512</b>	<b>233,872539</b>	<b>54,1424641</b>	<b>6991540</b>

**Tableau 3.8 Relation entre résistance statique  $R_m$  et limite d'endurance  $\sigma_D$  .**

## 6. Combinaison des résultats:

### 6.1. Cas de la flexion.

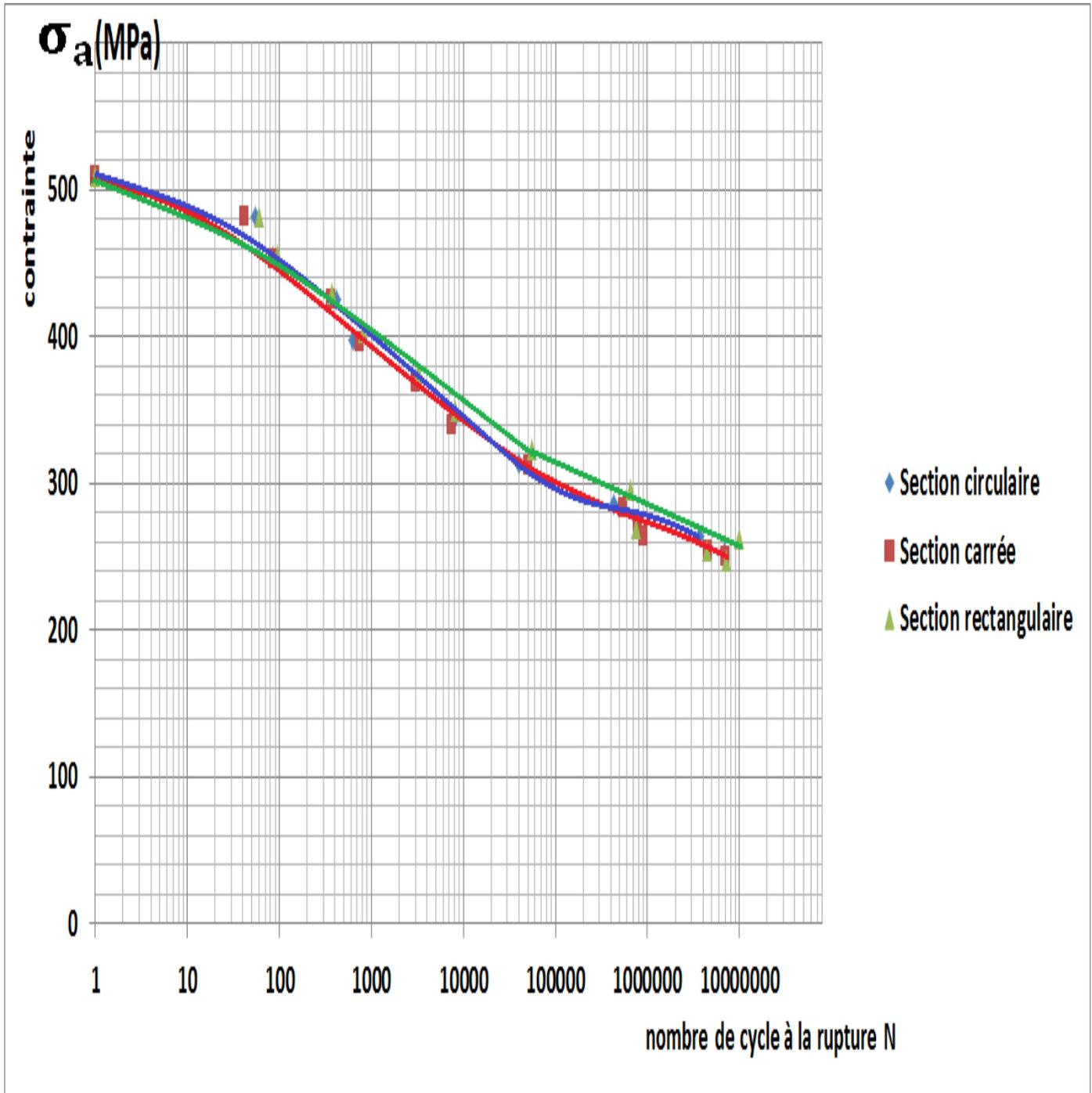


Figure 3.23 Confrontation des trois courbes de fatigue en flexion.

## 6.2. Cas de la compression-traction.

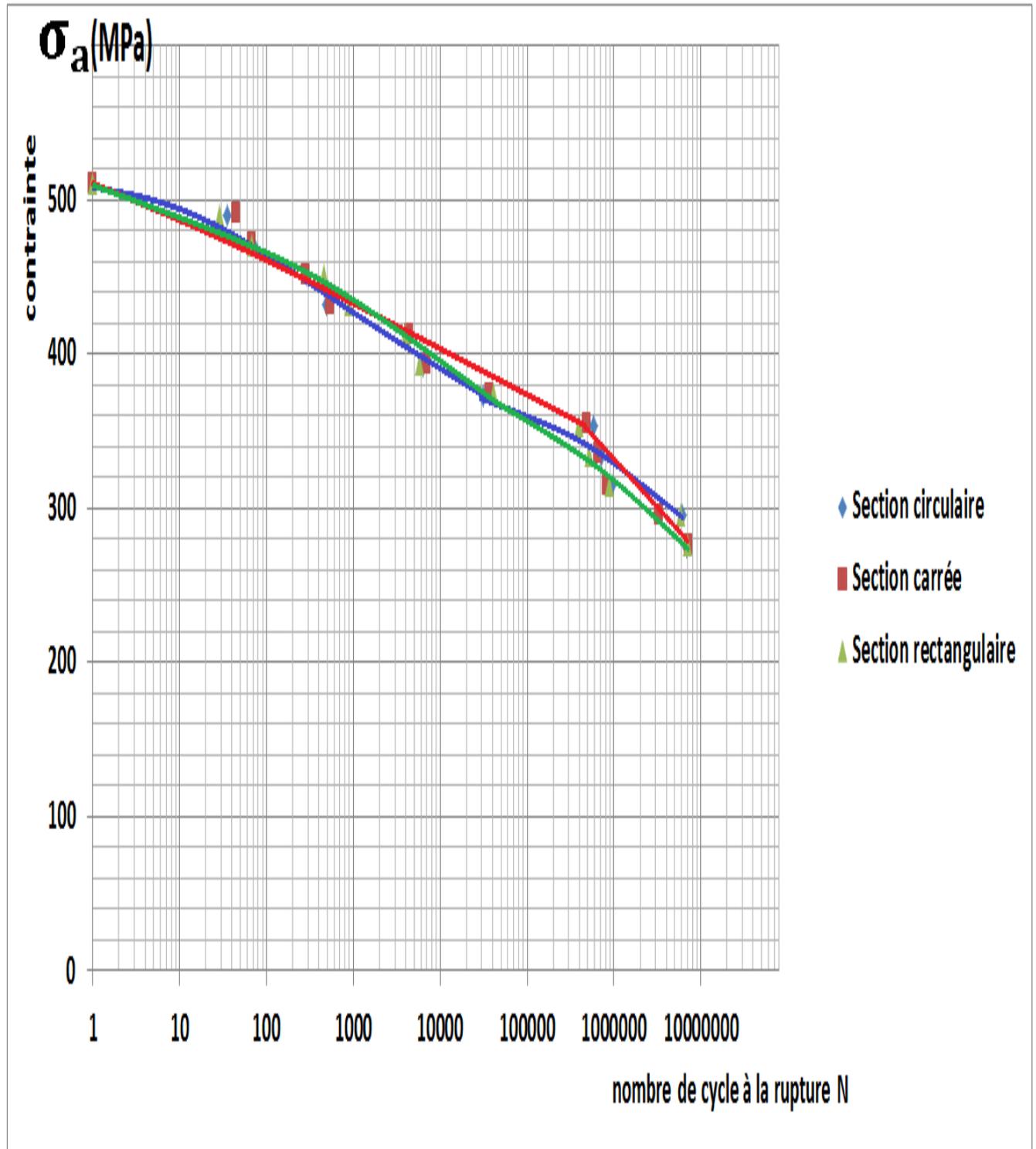


Figure 3.24 Confrontation des trois courbes de fatigue en traction- compression.

## 7. Conclusion Générale :

Après Analyse des résultats, les conclusions et les constatations suivantes peuvent être déclarées :

- Les courbes de fatigue des trois sections (circulaire, carrée, rectangulaire) sont presque identiques du point de vu comportement.
- Si la valeur de la contrainte appliquée est inférieure à  $\sigma_D$  elle ne conduit pas à la rupture quelque soit le nombre de cycles
- La limite d'endurance  $\sigma_D$  est estimée à 50 % de la résistance statique  $R_m$ .
- Dans les structures présentant des phénomènes de fatigue, on propose de vérifier le calcul du ferrailage avec limite d'endurance  $\sigma_D$  en plus de la résistance statique  $R_m$  pour assurer une durée de vie plus longue.
- Éventuellement la rupture par fatigue de la structure est souvent justifiée par la dégradation cumulée de la résistance et des caractéristiques physiques.

## Référence :

[1] MEMOIRE PRESENTE A L'ECOLE DE TECHNOLOGIE SUPERIEURE, PAR BOUSSAHA, Fateh

COMPORTEMENT EN FATIGUE DES POUTRES EN BETON ARME RENFORCEES EN CISAILLEMENT A L'AIDE DE MATERIAUX COMPOSITES AVANCES, MONTREAL, LE 29 AVRIL 2008, P 1-2-3- 36-37-38

[2] Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil

ETUDE DE LA PORTANCE D'UN PONT METALLIQUE ANCIEN A SABRA, Wilaya de TLEMCCEN. P36

URI: <http://dspace.univtlemcen.dz/bitstream/112/11996/1/Ms.Gc.Merad%20Boudia%20Bali.pdf>

[3] ALBERT W.

Über treibseile am Harz. Archive für Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde, Vol. 10, 1838, p. 215-234.

[4] PONCELET J.

Introduction à la mécanique industrielle physique ou expérimentale. Mme Thiel, Metz, 2<sup>ème</sup> édition, 1839. 719 p.

[5] WÖHLER A.

Versuche über die festigkeit der eisenbahnwagenachsen. Zeitschrift für Bauwesen, vol. 10, 1860

[6] GOODMAN J.

Mechanics applied to engineering. Longmas-Green, London, 1899. 605 p.

[7] BASQUIN O.

The exponential law of endurance tests. Proceedings of the American Society For Testing and Materials,

vol. 10, 1910, p. 625-630.

[8] PALMGREN A.

Die lebensdauer von kugellagern. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure,

vol. 68, 1924, p. 339-341.

[9] MINER M.

Cumulative damage in fatigue. Journal of Applied Mechanics,

vol. 12, 1945, p. 359- 365.

[10] MANSON S.

Behaviour of materials under conditions of thermal stress. National advisory commission on aeronautics : Report no 1170, 1954, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Cleveland.

[11] COFFIN L.

A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile material. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, vol. 76, 1954, p. 931-950

[12] Document Université de ABBAS Laghrour KHENCHELA

Fatigue des matériaux Cours & Exercices P 1 P5-6 P27

URI: <https://www.researchgate.net/publication/308162912>

[13] Livre

Résistance des matériaux André Bazergui · 2002 P 268

[14] Document

Propriétés mécaniques des matériaux 2<sup>nd</sup> partie P 49-52

URI: <https://www.slideserve.com/melodie-norman/propri-t-s-m-caniques-des-mat-riaux-2-nd-partie>

[15] livre

Fatigue des structures - Endurance, critères de dimensionnement, propagation des fissures, rupture - Matériaux - Structures - Niveau C P 42

[16]. Belkacem, Meddour. Fatigue des matériaux Cours & Exercices. KHENCHELA :

Université de ABBAS Laghrour, 16 Septembre 2016. P 1-2-5-13-27

[17] Document, tenue en fatigue, THALES / IAM Fatigue P 4

URI: [http://audace-reliability.crihan.fr/Ateliers\\_files/3-Fatigue%20-%20Martin%20RAYNAUD.pdf](http://audace-reliability.crihan.fr/Ateliers_files/3-Fatigue%20-%20Martin%20RAYNAUD.pdf)

[18] Schutz W. (1996) "A history of fatigue". Engineering Fracture Mechanics, **54**,

2, 263-300

- [19] Rabbe P., Lieurade H.-P. et Galtier A. (2000) "Essais de fatigue - Partie I". Techniques de l'ingénieur, M 4 170, 1-22
- [20] Basquin O. H. (1910) "The exponential law of endurance tests". Proc. Annual Meeting, American Society for Testing Materials, **10**, 625-630
- [21] Galtier A. et Cugy P. (2007) "La fatigue giga-cyclique : faut-il aller Plus loin et peut-on aller plus vite?" Colloque annuel MECAMAT, Aussois, 22-26 Janvier, 126-132
- [22] THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, PAR  
Georges EL-SAIKALY  
ÉVALUATION DU COMPORTEMENT EN FATIGUE DES POUTRES EN  
BÉTON ARMÉ RENFORCÉES À L'EFFORT TRANCHANT À L'AIDE DE  
POLYMÈRES RENFORCÉS DE FIBRES, MONTRÉAL, LE 6 JUILLET 2015 P 15-16-17-18
- [23] Eurocode 3
- [24] Eurocode 2
- [25] Wikipédia