



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
La République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche Scientifique



جامعة محمد الحميد بن باديس - مستغانم  
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة الميكانيكية  
Département Génie Mécanique

N° d'ordre : M96/GM/2021

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

## *Thème*

**Amélioration de la tenue en fatigue des pièces mécaniques sous  
chargement d'amplitude constante.**

Présenté par :

- ❖ Si ahmed Chahira
- ❖ Ramdane Rania

**Soutenu le 07/07/2021 devant le jury composé de :**

|           |                   |                               |
|-----------|-------------------|-------------------------------|
| Président | Pr.M.Zenasni      | Université de Mostaganem UMAB |
| Examineur | Dr. A.Khiat       | Université de Mostaganem UMAB |
| Encadrant | Dr. S.Benkabouche | Université de Mostaganem UMAB |

**Année Universitaire : 2020/ 2021**

---

## RESUME

Afin d'améliorer la résistance à la fatigue, en termes de durée de vie des pièces soumises à des contraintes mécaniques globales (notamment charge cyclique), un nouveau critère de fatigue basé sur le Crossland a été proposé, mais combiné avec l'effet des contraintes de compression résiduelle et des déformations plastiques. L'utilisation de la procédure proposée nécessite la connaissance de deux courbes de Wöhler alternées de torsion et de flexion. Un exemple d'application de calcul de durée de vie a été présenté. Il s'agit d'un échantillon d'acier de qualité SM 45 C qui porte une tension monotone uniforme superposée à une flexion alternée. Le programme de calcul proposé permet de déterminer différentes zones de sécurité dans l'espace de force en fonction de la durée de vie requise. Les fabricants peuvent utiliser ce diagramme pour sélectionner la charge la plus appropriée à appliquer à leur structure

Nous avons également comparé la durée de vie calculée dans deux cas de l'état du matériau : traité et non traité. Les résultats obtenus grâce à cette comparaison nous permettent de mettre en évidence l'apport bénéfique du grenailage. Le grenailage est un procédé mécanique contrôlé utilisé pour traiter la surface des matériaux. Il est principalement utilisé pour étendre la résistance à la fatigue des pièces métalliques. Il s'agit d'un impact industriel sur la surface des pièces avec des billes en acier ou en céramique. L'opération de grenailage à grande vitesse dépend des billes et des propriétés des matériaux (densité, dureté, propriétés plastiques viscoélastiques). Elle est également affectée par de nombreux paramètres liés au processus, qui doivent être bien maîtrisés pour assurer un bon niveau de contrainte résiduelle et éviter d'éventuels dommages aux pièces grenillées.

**Mots-clés :** durée de vie, contrainte résiduelle, déformation plastique, critère de fatigue, fatigue, traitement de surface, grenailage

## ABSTRACT

In order to improve the fatigue life of parts subjected to global mechanical stresses (especially cyclic loading), a new fatigue criterion based on Crossland has been proposed, but combined with the effect of residual compressive stress and plastic deformation. The use of the proposed procedure requires the knowledge of two alternating Wöhler curves of torsion and bending.

---

An example of a service life calculation application has been presented. It concerns a steel specimen of quality SM 45 C that carries a uniform monotonic tension superimposed on an alternating bending. The proposed calculation program allows to determine different safety zones in the force space depending on the required service life. Manufacturers can use this diagram to select the most appropriate load to be applied to their structure

We also compared the calculated life in two cases of the material condition in this case: treated and untreated. The results obtained from this comparison allow us to highlight the beneficial contribution of shot peening. Shot blasting is a controlled mechanical process used to treat the surface of materials. It is mainly used to extend the fatigue strength of metal parts. It is an industrial impact on the surface of parts with steel or ceramic balls. The high speed shot peening operation depends on the balls and parts material properties (density, hardness, viscoelastic plastic properties). It is also affected by many process parameters, which must be well controlled to ensure a good level of residual stress and avoid possible damage to the blasted parts.

**Keywords:** Keywords: fatigue life, residual stress, plastic strain, fatigue criterion. fatigue, surface treatment, shot peening.

### ملخص

من أجل تحسين عمر التعب للأجزاء المعرضة لضغوط ميكانيكية عالمية (خاصة التحميل الدوري) ، تم اقتراح معيار إجهاد جديد يعتمد على كروسلون ، ولكن تم دمجها مع تأثير الإجهاد الضاغط المتبقي وتشوه البلاستيك. يتطلب استخدام الإجراء المقترح معرفة منحني فولار بالتناوب والالتواء. تم تقديم مثال لتطبيق حساب عمر الخدمة. يتعلق بعينة فولاذية ذات جودة SM 45 C تحمل توتراً موحداً متراكباً على الانحناء بالتناوب. يسمح برنامج الحساب المقترح بتحديد مناطق الأمان المختلفة في مساحة القوة اعتماداً على عمر الخدمة المطلوب. يمكن للمصنعين استخدام هذا الرسم البياني لتحديد الحمل الأنسب لتطبيقه على هيكلهم.

قمنا أيضاً بمقارنة العمر المحسوب في حالتين من الحالة المادية في هذه الحالة: المعالجة وغير المعالجة. تسمح لنا النتائج التي تم الحصول عليها من هذه المقارنة بتسليط الضوء على المساهمة المفيدة للفداف بالكريات على مقاومة الكلال للقطع المعالجة. السفع بالخرندق هو عملية ميكانيكية مضبوطة تستخدم لمعالجة سطح المواد. إنها تستخدم بشكل أساسي لزيادة قوة الإجهاد للأجزاء المعدنية. إنه تأثير صناعي

---

على سطح الأجزاء بكرات من الصلب أو السيراميك. تعتمد عملية السفع بالخردق عالية السرعة على الكرات وخصائص مواد الأجزاء (الكثافة والصلابة وخصائص اللدائن اللزجة المرنة). يتأثر أيضًا بالعديد من معلمات العملية، والتي يجب التحكم فيها جيدًا لضمان مستوى جيد من الإجهاد المتبقي وتجنب الضرر المحتمل للأجزاء المنفجرة.

الكلمات المفتاحية: عمر التعب, الإجهاد المتبقي, التشوه البلاستيكي, معيار الكلال, التعب, معالجة سطحية, إطلاق الكريات (السفع بالخردق)

---

## REMERCIEMENT

*Au terme de ce travail, on tient à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience pour achever ce travail.*

*Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Notre encadreur Docteur à l'université de Mostaganem pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Nous **tenons** à témoigner toute ma reconnaissance à personne suivante, pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire :*

*Mr Ben Khatab qui nous a partagé ses connaissances et expériences dans ce domaine.*

*Nous remercions par ailleurs vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance.*

*à nos parents pour leur amour , leur soutien et leurs encouragements, ainsi qu' à nos familles en général.*

*Enfin, nous remercions nos amis Khoussa et seddaoui qui ont toujours été là pour nous. Et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.*

---

## **DEDICACES**

*Avant tout, Elhamdolah puisque c'est grâce a dieu je suis*

*Arrive-la*

*Je dédie ce modeste travail a :*

*La mémoire de mon cher frère HAMADA, atous les moments  
d'enfance que nous avons passéeensemble, aucune dédicace ne  
saurait exprimer l'amour, lerespect, et la reconnaissance*

*Que J'ai toujours eue pour lui.*

*Tu nous as quitte il y'a peu de temps et tu resteras don mon cœur  
et dons mon esprit. Qu'ALLAH, le tout puissant, t'accepte dans ses  
vastes paradis.*

*A mes parents, à mon adorable mère,  
à mes cher frères dieu les protégés et toute ma famille*

*Et mes chers amis.*

**S. CHAHIRA**

---

## **DEDICACES**

*A la mémoire de mes grands parents*

*Puisse dieu les accueillir dans son infinie Miséricorde*

*A l'être le plus cher de ma vie, ma mère ta présence a toujours été  
ma source de force.*

*A mon cher papa qui m'ont comblé de bonheur par son douce  
affection.*

*A mes chères sœurs et toute ma famille*

*A mes amis*

*A tous les gens que je connais de mon profond respect.*

**R.RANIA**

---

## Table des matières

LISTES DE FIGURES

LISTES DU TABLEAUX

NOTATION

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCTION GENERALE .....   | 1  |
| CHAPITRE I GENERALITES SUR LA FATIGUE.....  | 3  |
| I.1. Introduction.....  | 3  |
| I.2. Définition de la fatigue .....   | 4  |
| I.2.1 .Cycle de contrainte en fatigue .....   | 4  |
| I.3. Limite de fatigue.....   | 6  |
| I.4. Durée de vie en fatigue.....   | 6  |
| I.5. Diagrammes représentatifs .....  | 7  |
| I.6. Courbe de Wöhler .....   | 7  |
| I.7. Étude de la courbe de Wöhler .....   | 10 |
| I.8. Expression mathématique de la courbe d'endurance.....  | 10 |
| I.8.1. Les formules de Fatigue pour les domaines limités : .....                                  | 10 |
| I.9. Limite d'endurance .....   | 11 |
| I.10. Effet d'entaille .....  | 11 |
| I.11. Facteurs influençant la résistance à la fatigue .....                                       | 12 |
| I.11.1. Concentration de contrainte : .....   | 12 |
| I.11.2 État de surface .....  | 13 |
| I.11.3. L'effet d'échelle.....  | 13 |
| I.11.4. Contraintes résiduelles.....  | 13 |
| I.11.5. Facteurs influençant la résistance à la fatigue (Corrosion, température, fréquence) ..... | 13 |
| I.12. Classification des critères de fatigue multiaxiaux.....                                     | 14 |



---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>I.12.1. Approche empirique :</b>                                  | <b>15</b> |
| <b>I.12.1.a Critère de Hohenemser et Prager</b>                      | <b>15</b> |
| <b>I.12.2. Approche plan critique :</b>                              | <b>16</b> |
| <b>I.12.2.a Critère de Mataka</b>                                    | <b>16</b> |
| <b>I.12.3. Approche globale :</b>                                    | <b>16</b> |
| <b>I.12.3.a. Critère de Sines :</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>I.12.3.b Critère de Crossland</b>                                 | <b>17</b> |
| <b>CHAPITRE II LES TRAITEMENTS DE SURFACE</b>                        | <b>18</b> |
| <b>II.1. Introduction</b>  | <b>19</b> |
| <b>Tableau I.1 Traitement de précontrainte</b>                       | <b>20</b> |
| <b>II.2.1. Traitements thermiques</b>                                | <b>20</b> |
| <b>II.2.2. Traitements thermochimiques</b>                           | <b>20</b> |
| <b>II.2.3. Traitement mécanique</b>                                  | <b>20</b> |
| <b>II.3. Grenailage de précontrainte (shot peening)</b>              | <b>21</b> |
| <b>II.3.1. Grenailleuses</b>   | <b>22</b> |
| <b>II.3.1.1. Grenailleuses à air comprimé</b>                        | <b>22</b> |
| <b>II.3.1.2. Grenailleuses à turbine</b>                             | <b>23</b> |
| <b>II.3.2. Nature et dimensions des grenailles</b>                   | <b>24</b> |
| <b>II.3.3. Paramètres du grenailage</b>                              | <b>25</b> |
| <b>II.3.3.1. Paramètres intrinsèques au procédé :</b>                | <b>25</b> |
| <b>II.3.3.2. Paramètres intrinsèques aux matériaux</b>               | <b>26</b> |
| <b>II.3.4. Contrôle du procédé de grenailage (Intensité d'Almen)</b> | <b>26</b> |
| <b>II.4. Effet mécanique du grenailage</b>                           | <b>28</b> |
| <b>II.5. Facteurs influençant un traitement de grenailage</b>        | <b>29</b> |
| <b>II.6. Effets des traitements de grenailage</b>                    | <b>29</b> |
| <b>II.7. Les principales conséquences du grenailage</b>              | <b>30</b> |
| <b>II.7.1. Répartition de contraintes résiduelles</b>                | <b>30</b> |

---

|  |           |
|--|-----------|
| II.7.2. Etat de surface .....  | 30        |
| <b>CHAPITRE III CALCUL DE LA DUREE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT</b>                        | <b>28</b> |
| III.1. Introduction .....  | 29        |
| III.2. Le critère de Crossland [11] .....  | 29        |
| III.3. Description de la méthode de travail : .....  | 31        |
| III.4. Caractéristiques du matériau étudié : .....   | 32        |
| III.6. Calcul la durée de vie sans traitement de surface : .....                             | 35        |
| III.6-1. Droites limites du critère : .....  | 35        |
| III.6.1.1. Droite limite du domaine de durée de vie illimitée : .....                        | 35        |
| III.6.1.2. Droite limite du domaine de durée de vie limitée : .....                          | 35        |
| III.7.3. Méthode de calcul des durées de vie des structures : .....                          | 36        |
| III.7.4. La fonction inverse de torsion : .....  | 36        |
| III.8. Structure sollicitée à une traction statique superposée à une traction alternée : ... | 38        |
| III.8.1. L'éprouvette : .....  | 38        |
| III.8.2. Chargement et conditions aux limites : .....  | 38        |
| III.8.3. Maillage de la structure : .....  | 39        |
| III.8.5. Raffinement du maillage de la structure : .....                                     | 43        |
| III.8.6.a Calcul durée de vie Sans traitement : .....  | 43        |
| III.8.7. Présentation graphique des résultats : .....  | 45        |
| III-9 Calcule durée de vie avec traitement : .....   | 45        |
| III.9-1 Structure d'application du grenailage : .....  | 45        |
| III.9-2- Paramètres de grenailage : .....  | 46        |
| Conclusion Générale et Perspectives .....  | 54        |
| BIBLIOGRAPHIE.....   | 55        |

---

## LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1.Cycle de contrainte en fatigue  | 5  |
| Figure I.2.Formes de cycle de contrainte   | 6  |
| Figure I.3.Représentation schématique de la courbe de Wöhler définissant les domaines de Fatigue oligocyclique et polycyclique | 8  |
| Figure I.4.accommodation et Figure I.5 .Rochet   | 9  |
| Figure I.6.Adaptation  | 10 |
| FigureI.7.Ensemble des critères multiaxiaux de fatigue et leur classification  | 15 |
| Figure I.8.Diagramme de Sines  | 17 |
| FigureII.1Contrainte résiduelle générée par l'effet du grenaillage   | 22 |
| FigureII.2.Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé   | 24 |
| Figure II.3.Grenailleuse à turbine et Figure.II.4 roue à palettes  | 24 |
| FigureII.5.Influence du diamètre des billes sur les contraintes résiduelles  | 25 |
| Figure II.6.Mesure de la flèche d'Almen  | 27 |
| FigureII.7.Courbe de saturation  | 27 |
| Figure II.8. Point de saturation obtenu selon la règle des 10%   | 28 |
| Figure II.9.Représentation schématique de l'état de contrainte résiduelle provoquées par le grenaillage de précontrainte       | 29 |
| FigureIII.1.Représentation schématique de l'état de contrainte résiduelle provoquée par le grenaillage de précontrainte        | 31 |
| Figure III.2.Courbes d'endurance en torsion alternée de SM45C  | 34 |
| Figure III.3.Courbes d'endurance en flexion alternée de SM45C  | 34 |
| Figure III.4.Droites limites du domaine du critère de Crossland  | 36 |
| Figure III.5.Organigramme de calcul de durée de vie  | 37 |
| Figure III.6.la géométrie d'éprouvette   | 38 |
| Figure III.7. Le chargement et les conditions aux limites  | 38 |
| Figure III.8.Forme du signal de la force alternée.   | 39 |
| Figure III.9.Présentation la moitié de l'éprouvette avec maillage ordonné(Maillage grossier)                                   | 40 |
| FigureIII.10 Position de l'élément 20511   | 40 |
| FigureIII.11.Zone Critique pour une contrainte monotone (R10)  | 41 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figure III.12. Zone Critique pour une contrainte alternée (R10)          | 42 |
| Figure III.13. Position d'élément 20511 plus claire                      | 42 |
| Figure III.14. Diagramme de Crossland : ligne de durée de vie            | 44 |
| Figure III.15. raffinement de la zone critique.                          | 46 |
| Figure III.16. Profil avant traitement                                   | 47 |
| Figure III.17. Profil avant et après traitement                          | 48 |
| Figure III.19. Diagramme de crossland après le traitement de surface     | 49 |
| Figure III.20. Position de nœud critique 260.                            | 49 |
| Figure III.21. Profil avant traitement                                   | 51 |
| Figure III.22. Profil avant et après traitement                          | 51 |
| Figure III.24. Diagramme de crossland (après le traitement superficiel). | 52 |
| Figure III.25. Position de nœud critique 260.                            | 53 |

## *Liste des tableaux*

|   |    |
|---|----|
| Tableau II.1. Traitement de précontrainte                                       | 20 |
| Tableau II.2. Différents traitements mécaniques de surface                      | 21 |
| Tableau III.3. Caractéristiques mécaniques des billes de grenailage             | 24 |
| Tableau III.1. Caractéristiques mécaniques du matériau                          | 32 |
| Tableau III.2. Composition chimique de l'acier SM45C                            | 33 |
| Tableau III.3. Détermination de la zone critique                                | 41 |
| Tableau III.4. Chargements appliqués et résultats obtenus                       | 43 |
| Tableau III.5. les résultats avant et après le traitement de D=0.6mm et Al=0.4. | 46 |
| Tableau III.6. les résultats avant et après le traitement de D=0.8 AL=0.28:     | 47 |
| Tableau III.7. les résultats de D=0.6mm et Al=0.4:                              | 50 |

## NOTATION

| <b>NOMENCLATURE</b>   |                              |
|---|------------------------------|
| Amplitude de la contrainte                                    | $\sigma , \sigma_a$          |
| Nombre de cycles correspondent à une durée de vie limitée.    | $N_l$                        |
| Nombre de cycles correspondent à une durée de vie illimitée.  | $N_k$                        |
| Nombre de cycles à la rupture                                 | $NR$                         |
| Contrainte minimale et maximale à la traction                 | $\sigma_{min}, \sigma_{max}$ |
| Paramètres de fatigue à $N$ Cycles                            | $a(N) , b (N)$               |
| Paramètres de fatigue liés aux critères de fatigue.           | $a, b, c, \alpha , \beta$    |
| Coefficient de concertation contrainte                        | $Kt$                         |
| Facteur effectif de concentration de contrainte en fatigue    | $K_f$                        |
| Module de Young   | $E$                          |
| Coefficient de Poisson  | $\nu$                        |
| Limite d'élasticité   | $\sigma_e$                   |
| Limite d'endurance en traction alternée symétrique            | $f_{-1}$                     |
| Limite d'endurance en torsion alternée symétrique             | $\tau_{-1}$                  |
| module de cisaillement  | $G$                          |
| Pression hydrostatique maximal                                | $P_{max}$                    |
| Pression hydrostatique moyenne                                | $P_m$                        |
| Contrainte monotone   | $\sigma_m$                   |
| Deuxième invariant du tenseur déviateur de contraintes        | $J_2$                        |
| Deuxième invariant du tenseur déviateur des amplitudes        | $J_{2a}$                     |
| Limite de fatigue en flexion alternée symétrique à $N$ Cycles | $f_{-1} (N)$                 |

---

|   |                 |
|---|-----------------|
| Limite de fatigue en torsion alternée symétrique à $N$ Cycles     | $\tau_{-1} (N)$ |
| la racine carrée de deuxième invariant du déviateur de contrainte | $\xi_a$         |
| Contrainte équivalente de Crossland                               | $\sigma_{eq}$   |

---

# ***INTRODUCTION GENERALE***

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

Améliorer le comportement des pièces d'un équipement est un paramètre recherché dans le domaine industriel, ou l'ensemble de ces constituants supporte différents types de charges sous intensité et directions variables. Cette amélioration se traduit par la prolongation de la tenue des pièces sous les mêmes conditions de charges, il s'agit d'augmenter la durée de vie par l'application d'un traitement de surface.

La détermination de la durée de vie entre dans le cadre de la fatigue des structures, qui se caractérise par une dégradation progressive des propriétés du matériau sous l'effet de l'application des efforts cycliques au cours du temps, la rupture se produit lorsque la pièce ne peut plus supporter ces charges. L'organisation d'une maintenance efficace est basée sur la connaissance des comportements des organes des équipements afin de prévoir leurs changements durant les périodes de révisions.

L'étude envisage dans ce mémoire est la continuité d'un travail déjà réalisé, en vue d'améliorer la tenue en fatigue des pièces mécaniques, en déterminant la durée de vie de ces pièces, avant et après un traitement de surface, en l'occurrence le grenailage de précontrainte (shot peening). Ce traitement sera appliqué au niveau des zones de forte concentration de contraintes, déterminées par le critère de fatigue de Crossland, via le code d'éléments finis Ansys.

Le premier chapitre est consacré à une introduction sur la fatigue, en développant les domaines de la courbe de fatigue de Wöhler, les facteurs influençant la tenue en fatigue, ainsi qu'un aperçu sur les différents critères de fatigue, qui comptent les moyens de convertir les chargement multiaxiaux appliqués en une contrainte équivalente, afin de calculer par la suite la durée de vie des structures.

Le deuxième chapitre est réservé aux différents traitements mécaniques, en particulier le grenailage de précontrainte, qui sont appliqués sur les pièces mécaniques en vue d'amélioration leurs durées de vie, et en retardant l'apparition et la naissance de fissures.

Le dernier chapitre est destiné à l'application du traitement de surface : le grenailage de précontrainte, qui engendre des contraintes de compression, en dessous de la surface, et en



## ***INTRODUCTION GENERALE***

---

étudiant les paramètres influençant les profils des contraintes résiduelles, ainsi que l'effet apporté sur la durée de vie de la structure de forme rectangulaire.

Le travail sera finalisé par une conclusion générale, et présentation de quelques perspectives.

# *CHAPITRE I*

## *GENERALITES SUR LA FATIGUE*

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

Toute pièce mécanique en fonctionnement normal est soumise à un certain nombre de sollicitations d'origines diverses, de valeurs maximales généralement connues mais variables dans le temps. La répétition de ces efforts mène la pièce ou la structure à la rupture, ce qui est appelé phénomène de fatigue[1].

Les premières études systématiques de ce phénomène, furent effectuées en 1869 par l'ingénieur des chemins de fer bavarois A. Wöhler, dans le cadre de recherches sur la rupture des essieux de wagon. Il supposa que, comme dans un organisme vivant, la répétition de contraintes « fatiguait » le matériau en diminuant ses capacités de résistance[1].

La fatigue des pièces mécaniques est définie par l'apparition de fissures macroscopiques et leur croissance sous des sollicitations répétées. Par conséquent, un nombre suffisant de telles charges peut provoquer de grandes fissures et provoquer une destruction partielle ou totale. La fatigue représente toujours le mode de base de la défaillance structurelle et à la nature particulière de la défaillance, car la défaillance est le résultat d'une accumulation de dommages, généralement sans aucun signe extérieur observable.

L'étude de la fatigue des matériaux est particulièrement importante, elle permet de déterminer la résistance mécanique des composants et structures des machines soumis à des contraintes ou vibrations périodiques.

Dans de nombreuses situations pratiques (contrainte de flexion ou de torsion, contrainte périodique ou Statique, dans un environnement donné), la surface peut se fissurer et provoquer une défaillance des composants par fatigue ou rupture, sous contraintes appliquées. La durée de vie des composants est un paramètre recherché, afin de déterminer les périodes de vérification ou changement en cas de présence des signes de défaillances.

**I.2. Définition de la fatigue**

Le terme de fatigue englobe un ensemble de mécanismes physiques responsables de la dégradation progressive d'une pièce mécanique soumise à des chargements mécaniques répétés. Deux phases principales peuvent être distinguées, l'initiation et la propagation des fissures jusqu'à la rupture. L'initiation peut être le résultat d'une micro-plasticité cyclique dans certains grains défavorablement orientés ou au voisinage d'inclusions agissant comme une concentration de contraintes[2].

La fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou déformations cycliques, répétées ou alternées, modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. Les étapes principales de la fatigue sont [3]:

- Amorçage de fissures,
- Propagation des fissures,

Elle suit d'abord approximativement le plan de scission maximale. La vitesse de propagation est alors très faible. Les défauts ne sont décelables qu'au laboratoire, Puis elle suit le plan perpendiculaire à la contrainte de tension maximale. La vitesse de propagation s'accélère. Pendant cette période, les contrôles décèlent la fissure.

- La rupture finale.

**I.2.1 .Cycle de contrainte en fatigue [4]**

Les essais de fatigue sont définis par des normes, et ils sont de plusieurs types :

- Traction – compression
- Flexion plane
- Flexion rotative
- Flexion trois points
- Torsion

Les éprouvettes sont soumises à des sollicitations périodiques. La contrainte passe par un maximum  $\sigma_{max}$  et par un minimum  $\sigma_{min}$ .

On en déduit :

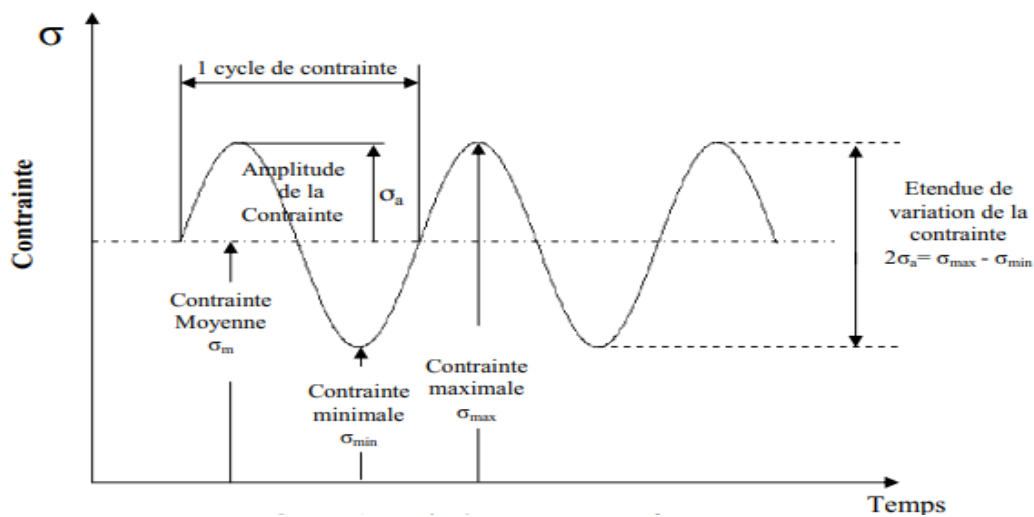
La contrainte moyenne :  $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$  (I.1)

L'amplitude de contrainte :  $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$  (I.2)

L'étendue de variation de contrainte  $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$  (I.3)

C'est le rapport de la contrainte minimale sur la contrainte maximale.

Dans **Figure I.1**. Nous présentons les termes et symboles utilisés pour décrire le cycle de contrainte



**Figure I.1 Cycle de contrainte en fatigue [4]**

Les formes possibles de cycle de contraintes sont présentées dans la **Figure I.2**.

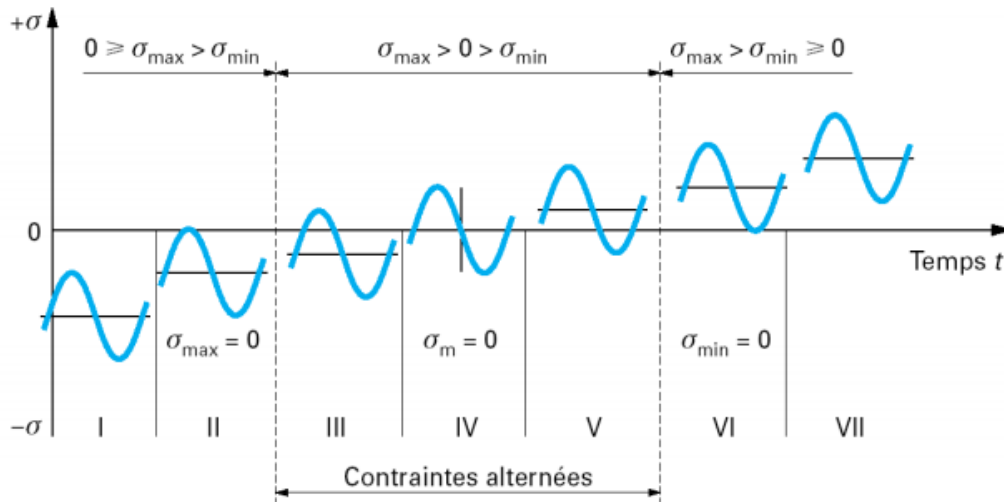


Figure I.2 Formes de cycle de contrainte [4]

Contrainte ondulée de compression :  $1 < R_\sigma < +\infty$

Contrainte répétée de compression :  $R_\sigma \rightarrow +\infty$

Contrainte alternée dissymétrique :  $-\infty < R_\sigma < -1$  .

Contrainte purement alternée :  $R_\sigma = -1$  .

Contrainte alternée dissymétrique :  $-1 < R_\sigma < 0$  .

Contrainte répétée de traction :  $R_\sigma = 0$  .

Contrainte ondulée de traction :  $0 < R_\sigma < 1$

### I.3. Limite de fatigue

La valeur maximale de la contrainte variable qu'un matériau peut supporter dans un cycle de fatigue infini. Généralement déterminée par le diagramme S-N, la limite de fatigue est égale à la contrainte asymptotique de la trajectoire géométrique des points de résistance à la fatigue nominale de plusieurs éprouvettes lors de l'essai de fatigue. En d'autres termes : la limite d'endurance.

### I.4. Durée de vie en fatigue

La durée de vie en fatigue, pour un niveau de contrainte alternée donnée et une moyenne alternée, représente le nombre de cycles nécessaires pour entraîner une rupture résultant de la fatigue[5]

**I.5. Diagrammes représentatifs**

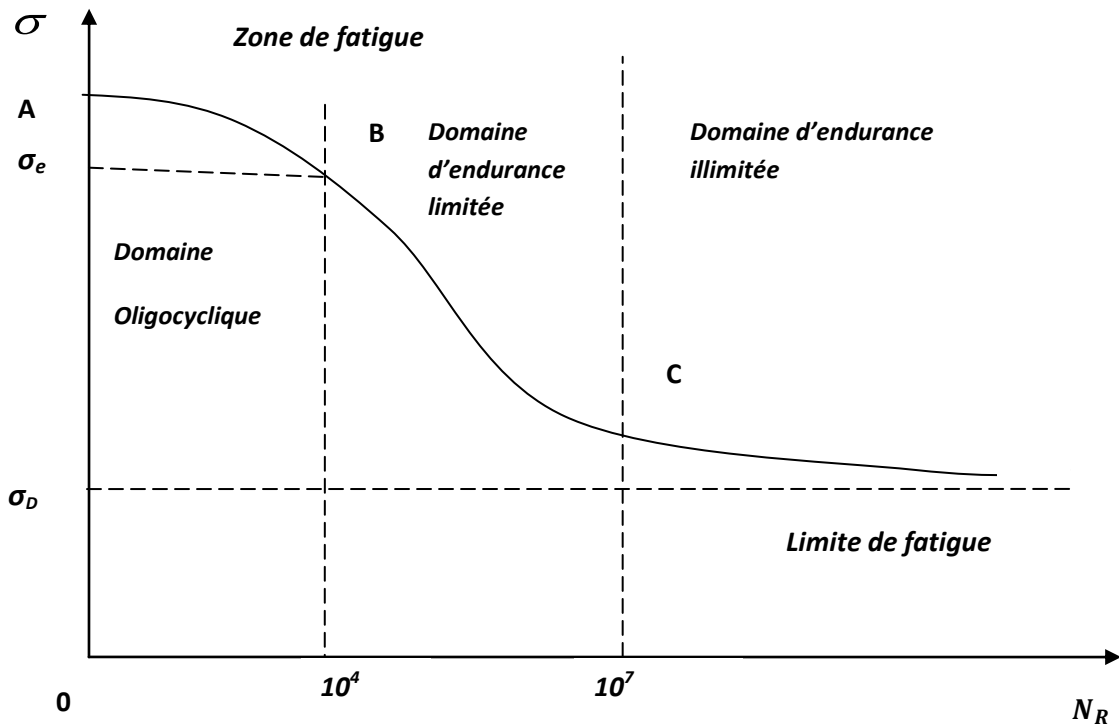
Il existe un certain nombre de représentation possible des résultats obtenus au cours d'essais de fatigue [1]:

- Courbes de Wöhler.
- Courbes d'équiprobabilité de rupture (courbes P.S.N).
- Diagramme de Haigh.
- Diagramme de Goodman.
- Diagramme de Rôts.
- Diagramme de Moore, Kommers et Jaspers.

**I.6. Courbe de Wöhler**

Le dimensionnement d'une pièce pour une sollicitation en fatigue se fait à partir des courbes de Wöhler ou courbe S-N (Stress ; Number of cycles). Ces courbes sont définies pour chaque type de matériau[6].

Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule permettant de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée  $\sigma_a$  et le nombre de cycles à la rupture  $N_R$ . Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples, qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles d'efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et de noter le nombre de cycles à la rupture  $N_R$ . Pour plus de commodité, ce nombre  $N_R$  est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte  $\sigma_a$  est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire. Ainsi, à chaque éprouvette testée, correspond un point du plan  $(N_R, \sigma_a)$ . A partir d'un certain nombre d'essais, nous établissons la courbe de Wöhler[4].



**Figure.I.3 Représentation schématique de la courbe de Wöhler définissant les domaines de fatigue oligocyclique et polycyclique [7]**

La courbe de Wöhler divisée en 3 zones figure :

#### I.6.1. Zone de fatigue oligocyclique (en général moins de $10^4$ cycles)

- Fortes amplitudes de contraintes, durée de vie faible (Rupture précédée d'une déformation plastique notable).
- En conception, il faut alors appliquée la limite élastique du matériau en statique.

Dans ce domaine on distingue deux comportements pour le matériau : l'accommodation et le rochet.

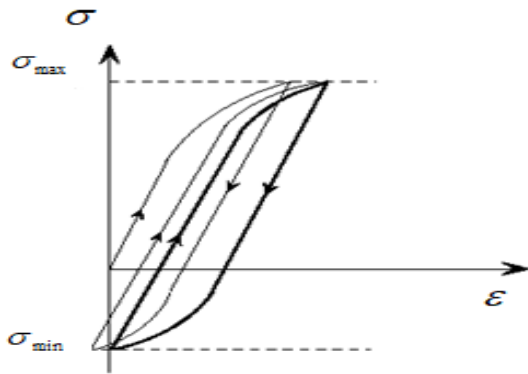


Figure I.4 Accommodation [8]

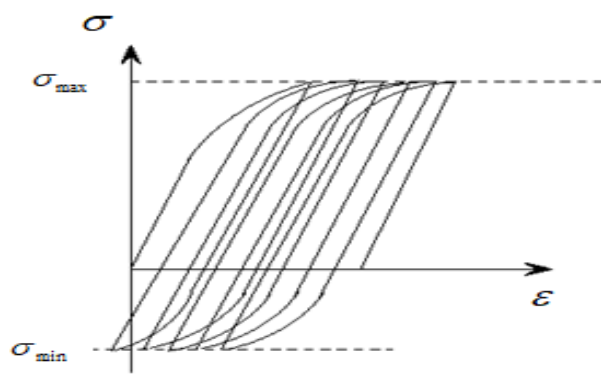


Figure II.5 Rochet [8]

### I.6.2. Zone de fatigue ou d'endurance limitée (en général entre $10^4$ et $10^6$ cycles) :

- La rupture se produit après un nombre de cycle qui croît quand la variation de contraintes décroît.
- La contrainte appliquée est inférieure à la limite d'élasticité, ou la rupture est atteinte après environ  $10^4$  à  $10^6$  (à  $10^7$ ) cycles. La fracture ne s'accompagne pas d'une déformation plastique globale mesurable. Dans ce cas, la réponse de l'éprouvette atteint un état d'adaptation élastique. L'adaptation élastique est l'état où la réponse du tube à essai devient purement élastique. Une déformation plastique peut se produire au cours du premier cycle. Mais après un certain nombre de cycles, il reste inchangé en raison de l'effet d'écrouissage du matériau.



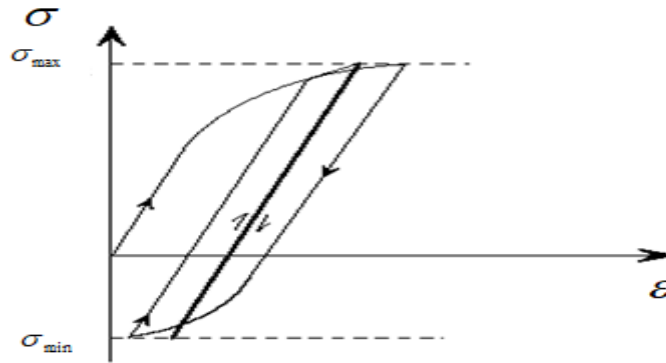


Figure I.6 Adaptation [8]

### I.6.3. Zone d'endurance illimitée ou zone de sécurité :

- Faibles amplitudes de contraintes, pas de rupture, même après  $10^7$  cycles.
- La valeur cible à atteindre en conception est  $N = 10^7$ .

### I.7. Étude de la courbe de Wöhler

La dispersion des résultats peut provenir de plusieurs sources, on en peut citer :

- La géométrie de l'éprouvette
- L'état de surface
- Les dimensions
- L'homogénéité du matériau des éprouvettes

### I.8. Expression mathématique de la courbe d'endurance

#### I.8.1. Les formules de Fatigue pour les domaines limités :

- **Formule de Wöhler**[7] :

Historiquement le premier modèle mathématique donnant la contrainte  $\sigma_a$  provoquant une rupture après  $N$  cycles a été proposé par Wöhler :

$$a - b \sigma = \log(N) \quad (\text{I.4})$$

Avec  $a, b > 0$

- **Formule de Basquin (1910)**[7]:

$$a - b \cdot \log(\sigma) = \log(N) \quad (\text{I.5})$$

Ou

$$N \cdot \sigma^\beta = C \quad (I.6)$$

Avec :

$$\beta = 1/b \quad \text{et} \quad \ln C = a / \beta$$

$b$  est nommé index de la courbe de fatigue.

### I.8.2. Les formules de Fatigue pour les domaines illimités

➤ **Formule de Stromeyer (1914)[7] :**

$$a - b \cdot \log(N) = \ln(\sigma - \sigma_D) \quad (I.7)$$

Ou :

$$\sigma = \sigma_D \left( \frac{C}{N} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (I.8)$$

On remarque  $\sigma$  que tend vers  $\sigma_D$  quand  $N$  tend vers l'infini.

$N$  : Nombre de cycle,

$\sigma$  : Contrainte appliquée,

$\sigma_D$  : Limite d'endurance,

$A, B, C, a, b$  : Constantes déterminées à partir des données expérimentale.

### I.9. Limite d'endurance

A mesure que la contrainte alternée se réduit, le matériau peut prendre plus de cycles de contrainte avant de se rompre en raison de la fatigue. La limite d'endurance est la contrainte alternée la plus élevée qui n'entraîne pas de rupture par fatigue. En d'autres termes, si la contrainte alternée est égale ou inférieure à la limite d'endurance, le nombre de cycles de contrainte causant la rupture devient très grand (pratiquement infini). La limite d'endurance est généralement définie pour des contraintes alternées d'une moyenne nulle. On l'appelle aussi limite de fatigue. Il n'est pas toujours possible de mesurer la limite de fatigue des

### I.10. Effet d'entaille [9]

Le terme < entaille > définit une discontinuité imposée ou accidentelle de la forme de la pièce ou une hétérogénéité du matériau. Les entailles peuvent avoir trois types de cause :

- métallurgiques,
- mécaniques,
- de service (naissance au cours de l'utilisation).

En général, les discontinuités sont des trous, une rainure, etc.. Ces discontinuités amènent à la modification du champ de contrainte.[9]

La présence d'une discontinuité géométrique entraîne une modification du champ de contraintes dans l'élément de structure. Le processus de rupture est gouverné non seulement par l'amplitude locale de contrainte, mais aussi par l'influence du gradient de contrainte qui règne dans la structure, et notamment au voisinage du fond d'entaille. Pour une optimisation du matériau, tout en garantissant la fiabilité que requièrent les applications dans le domaine des technologies de pointe, de nombreuses structures sont dimensionnées avec des méthodes faisant intervenir les concepts de la Mécanique de la rupture. Ces concepts définissent une approche permettant d'évaluer le risque de ruine des structures et composants industriels, en tenant compte de la présence de zones de discontinuité géométrique de tailles et formes différentes, tels les micro défauts, des trous ou des entailles.

### **I.11. Facteurs influençant la résistance à la fatigue [10]**

Outre la contrainte moyenne  $\sigma_m$  prise en compte par les diagrammes d'endurance, les facteurs qui influencent la résistance à la fatigue sont nombreux:

- Concentration de contraintes,
- Etat de surface,
- Effet d'échelle,
- Contraintes résiduelles,
- Corrosion,
- Température,
- Fréquence,

#### **I.11.1. Concentration de contrainte :**

En fatigue, l'influence de la concentration de contraintes dépend de ce facteur  $K_t$  mais aussi de la nature du matériau : plus il est ductile, plus il s'adaptera par des microplasticités cycliques à la sollicitation. Le pic de contrainte  $\sigma_{max}$  sera alors « Écrêté », de sorte qu'on définit un facteur effectif de concentration de contrainte en fatigue.

- Pour la plupart des matériaux utilisés en mécanique  $K_f < K_t$ ,
- Pour les matériaux durs et résistants ( $R_m > 1\ 800$  MPa), on considère que  $K_f = K_t$ .

$K_t$  : (augmentation locale de contrainte)

$K_f$  : (facteur effectif de concentration de contrainte en fatigue)

### **I.11.2 État de surface [10]**

L'état de surface d'une pièce mécanique conditionne sa résistance à la fatigue. Plus cet état sera grossier, plus la limite d'endurance sera abaissée d'un facteur  $K_s$  du fait de la présence des défauts superficiels.

Ce phénomène est d'autant plus sensible que le matériau est plus résistant. Sur une pièce soumise à un chargement de fatigue, on devra soigner d'autant plus l'état de surface final que le matériau qui la constitue présente de hautes caractéristiques mécaniques.

### **I.11.3. L'effet d'échelle**

L'effet d'échelle se traduit en fatigue par le fait qu'à contrainte superficielle égale, une pièce de plus grande dimension présentera une plus faible durée de vie. Cela tient à deux facteurs : effet de gradient et effet statistique.

Pour les pièces travaillant en flexion, en torsion ou en traction avec présence d'entaille, l'évolution de la contrainte sous la surface influence la résistance à la fatigue : plus une pièce est de faible dimension, plus le gradient est élevé et plus la résistance à la fatigue sera grande.

Par ailleurs, plus une pièce est de grande dimension, plus on a statistiquement de chance de trouver un défaut qui conduira à l'amorçage d'une fissure de fatigue.

### **I.11.4. Contraintes résiduelles**

Les contraintes résiduelles qui résultent de la fabrication (moulage, soudage, estampage) restent présentes dans la pièce mécanique en l'absence de tout effort extérieur. Elles vont se superposer au chargement de fatigue et donc modifier la contrainte moyenne.

On peut tenir compte de ces contraintes dans un calcul en utilisant les diagrammes d'endurance vus précédemment.

### **I.11.5. Facteurs influençant la résistance à la fatigue (Corrosion, température, fréquence)**

Des facteurs liés à l'environnement comme la corrosion ou la température influencent négativement la résistance à la fatigue.

La limite d'endurance a également tendance à s'élever lorsque la fréquence des contraintes de chargement augmente, mais cet effet reste très limité.[10]

**I.12. Classification des critères de fatigue multiaxiaux**

Une étude bibliographique a permis de recenser 37 critères de fatigue qui constituent la base de données

.L'ensemble des critères sont répartis en trois approches distinctes qui se différencient par leur concept

**Source spécifiée non valide..**

**La figure I.7.** Récapitule l'ensemble des critères multiaxiaux de fatigue répertoriés dans la littérature ainsi que leur classification.

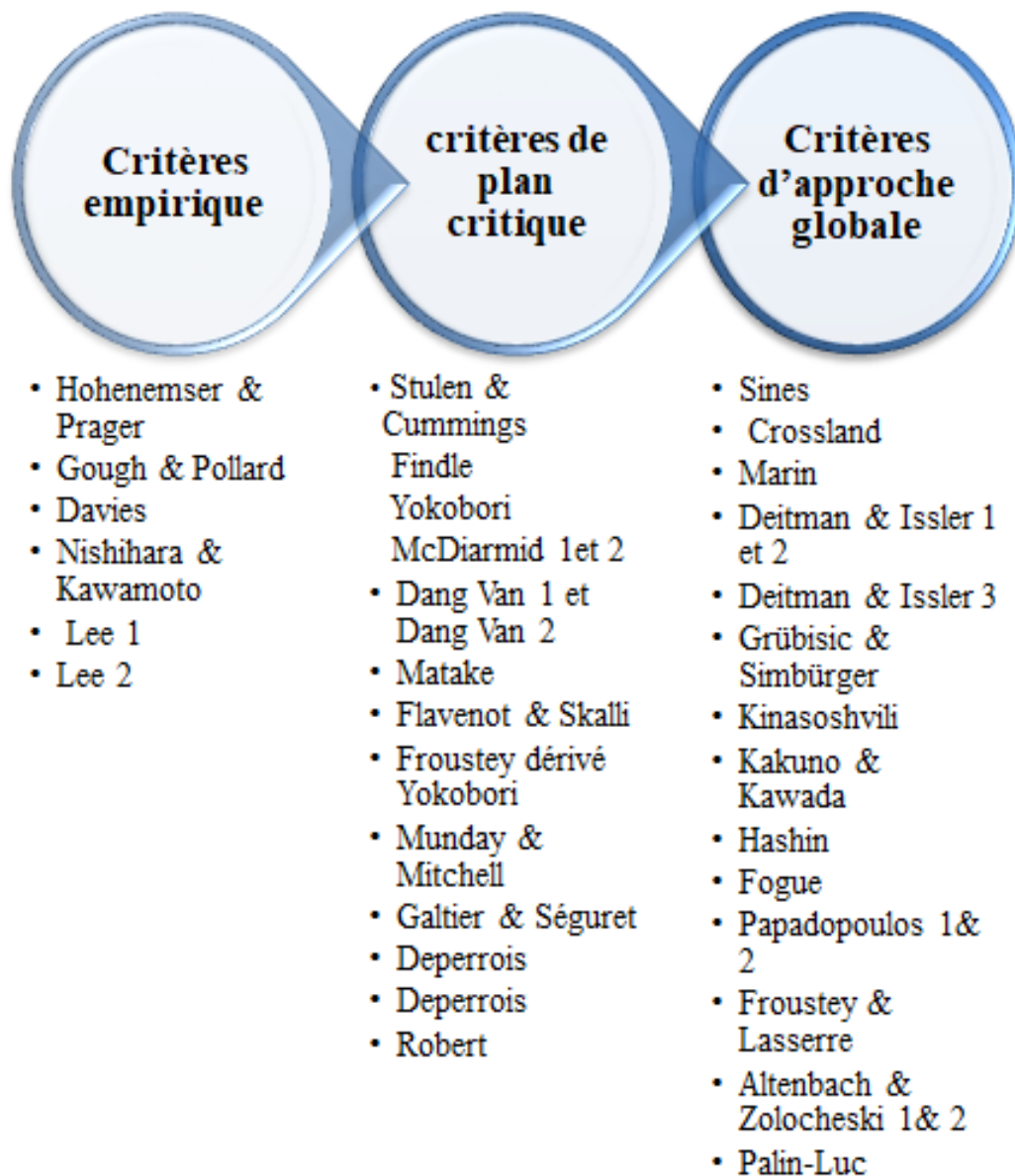


Figure.I.7 Ensemble des critères multiaxiaux de fatigue et leur classification

**I.12.1. Approche empirique :**

Les critères basés sur l'approche empirique sont issus de résultats expérimentaux obtenus généralement pour un type de sollicitation multiaxiale bien déterminé.

**I.12.1.a Critère de Hohenemser et Prager**

Ce critère est obtenu à partir des essais de traction, torsion ou le cisaillement qui est variable et la contrainte normale de traction  $\sigma_n$  est statique :

$$\left( \frac{\tau_a}{\tau_{-1}} \right)^2 + \frac{\sigma_n}{R_m} \leq 1 \quad (\text{I.9})$$

### I.12.2. Approche plan critique :

Les critères basés sur l'approche plan critique admettent l'existence d'un plan physique où le dommage de fatigue sur l'ensemble de la vie de la structure est maximum et considèrent que ce seul plan critique gouverne le comportement en fatigue du matériau. Cette démarche apparaît logique quand l'hypothèse de départ qui admet l'unicité du plan est vérifiée.

#### I.12.2.a Critère de Mataka [7]

Mataka a formulé son critère à la base de ceux de Stulen – Cummings et de Findly, la différence réside dans le choix du plan critique, celui où l'amplitude de cisaillement est maximale dans le plan normal ; la fonction de fatigue est donnée par :

$$\tau_a + \alpha \sigma_n^{\max} \leq \beta \quad (\text{I.10})$$

Les constantes  $\alpha, \beta$  sont déterminés par :

$$\alpha = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_{-1}}{2}}{\frac{f_{-1}}{2}} \quad (\text{I.11})$$

$$\beta = \tau_{-1} \quad (\text{I.12})$$

### I.12.3. Approche globale :

Les critères basés sur l'approche globale font intervenir des grandeurs telles que les invariants des tenseurs de contraintes ou de leur déviateur. Ces quantités représentent l'ensemble des contraintes sous un scalaire. Le premier invariant représente à un facteur près la moyenne arithmétique de la contrainte normale sur tous les plans possibles et le deuxième invariant est proportionnel à la moyenne quadratique des cisaillements qui agissent sur tous les plans.

**I.12.3.a. Critère de Sines :**

Selon Sines la contrainte équivalente est une combinaison linéaire de  $\tau_a$ , amplitude de  $\sqrt{J_2}$  et de  $P_m$  qui est la valeur moyenne de la pression hydrostatique. Ce critère est représenté sur la figure I.11.

$$\tau_a + aP_m \leq b \tag{I.13}$$

Les constantes a, b sont identifiables par des essais en torsion alternée et en flexion répétée :

$$b = \tau_{-1} \tag{I.14}$$

$$a = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_0}{\sqrt{3}}}{\frac{f_0}{3}} \tag{I.15}$$

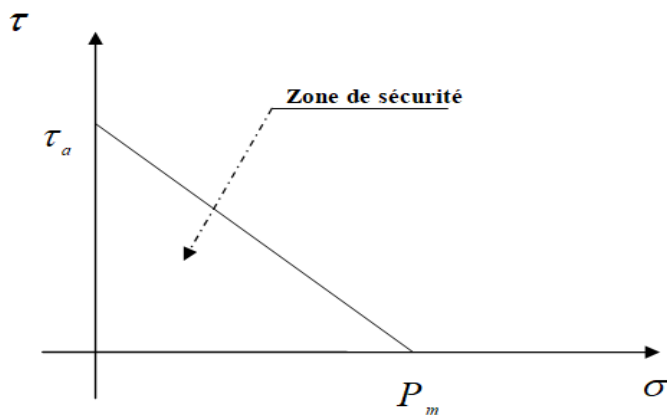


Figure I.8 Diagramme de Sines [7]

**I.12.3.b Critère de Crossland**

Ce critère sera étudié en détail dans le chapitre trois et fait l'objet d'un test de simulation d'un échantillon sous chargement multiaxial pour prédire sa durée de vie.



**CHAPITRE II**

**LES TRAITEMENTS**

**DE SURFACE**

**II.1. Introduction**

Les propriétés locales d'un matériau peuvent être améliorées par un traitement de surface tel que : traitement thermique, thermochimique ou par une action mécanique. La dureté garantit significativement une bonne résistance aux efforts de fatigue en minimisant les dommages causés par l'usure et les effets en sous-couches dus aux chargements répétés. Ces contraintes entraînent une amélioration de la limite d'endurance lorsque les pièces seront sous chargements cycliques.

Les traitements de surface mécaniques sont des procédés qui permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression à la surface des composants mécaniques. Les traitements les plus utilisés ont le grenailage de précontrainte, le galetage, le martelage, le choc laser. Le principe de base est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation soit par un outil de forme comme pour le grenailage ou le galetage, soit par une onde de choc comme pour le traitement par choc laser. Une opération de grenailage consiste à soumettre la surface d'une pièce à un bombardement contrôlé de particules généralement sphériques.

Si la dureté et la taille des grains sont des paramètres bien connus, des mécaniciens et des métallurgistes et communs par rapport aux autres traitements de surface, l'introduction des contraintes résiduelles de compression constitue une particularité. L'autre caractéristique particulière de ces traitements de surfaces mécaniques est l'état de surface des pièces traitées. En effet, après le traitement, l'état de surface et la géométrie locale des pièces sont souvent modifiés par rapport à l'état initial. Dans le cas du grenailage et du martelage, une détérioration de l'état de surface est fréquemment observée.

Cette étude a pour but de comprendre l'effet du grenailage de précontrainte sur la surface avec la génération des champs mécaniques.

**II.2. Les traitements superficiels**

Les caractéristiques locales du matériau peuvent être améliorées des manières suivantes  
Traitement de surface, tel que : thermique, thermochimique ou Par action mécanique. Les avantages de ces traitements sont, Par écrouissage ou par Transformation métallurgique. Le tableau suivant représente les différents types de traitement.

**Tableau II.1 Traitement de précontrainte [11]**

| Type de Traitement | Origines principales des contraintes résiduelles                | Noms des traitements                                      |
|--------------------|---|---|
| Thermique          | Dilatation différentielle et transformation de                  | Trempe et trempe superficielle                            |
| Thermochimique     | Diffusion, dilatation différentielle et transformation de phase | Cémentation, carbonituration, nitruration, etc.           |
| Mécanique          | Déformation plastique<br>Locale                                 | Sablage, grenailage, martelage, galetage, polissage, etc. |

**II.2.1. Traitements thermiques [12]**

Le procédé de traitement thermique d'un acier consiste à lui faire subir une variation de la température en fonction du temps. Le but étant d'améliorer les caractéristiques des matériaux pour une meilleure adaptation aux conditions en service. Il permet également de réduire les contraintes internes des matériaux, générées de par son histoire, qui peuvent être néfastes pour la pièce.

**II.2.2. Traitements thermochimiques [12]**

Le traitement thermochimique consiste en une modification de la composition chimique de la couche superficielle par enrichissement d'un métal en éléments tels que carbone azote. Le milieu extérieur sature les couches superficielles en cet élément et celui-ci sera transporté par diffusion vers l'intérieur de la pièce. Il est utilisé pour obtenir une dureté superficielle encore plus élevée, tout en gardant la ductilité au cœur.

**II.2.3. Traitement mécanique**

Le traitement de surface mécanique est de plus en plus utilisé dans l'industrie pour améliorer les performances des pièces mécaniques, notamment leur résistance à la fatigue. C'est en raison des contraintes de contraintes résiduelles introduites dans la pièce qu'elles sont efficaces, mais les modifications de la microstructure et de la rugosité qu'elles provoquent sont également importantes. Il existe une série de méthodes de traitement entre les méthodes de traitement bien connues (telles que le grenailage) et les méthodes de traitement plus récentes (telles que le traitement par explosion). Il comprend le traitement de surface des pièces et des composants utilisez des billes d'acier, de céramique ou de verre pour effectuer

des impacts multiples industriels, lancés à grande vitesse. Ces diverses méthodes sont présentées dans le tableau II.2.

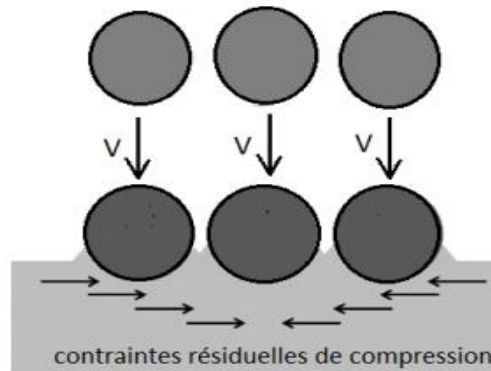
**Tableau II.2 Différents traitements mécaniques de surface [11]**

| <b>Dénomination</b> | <b>Mises-en oeuvre</b>                                 | <b>Profondeur de traitement</b>                  | <b>Avantages et inconvénients</b>   |
|---------------------|--|--|---|
| Grenaillage         | Projection contrôlée de billes                         | De 0,1 à 0,6 suivant les conditions et Matériaux | Quelques problèmes d'incrustation, de micro défauts et parfois de rugosité. Adaptation à toutes les géométries                    |
| Martelage           | Impact d'aiguille à extrémité sphérique                | De 1 à 2 mm                                      | Problèmes d'état de surface, ne s'applique qu'aux géométries simples  |
| Ondes de choc       | Explosion laser impulsionnelle de très forte puissance | Jusqu' à 4 mm                                    | S'adapte à toutes les Géométries (pour le laser), pas de modification de l'état de surface (traitement en cours de développement) |

### **II.3. Grenaillage de précontrainte (shot peening)**

Le grenaillage (shot peening) est un procédé mécanique contrôlé utilisé pour traiter les surfaces Matériel. Principalement utilisé pour étendre la résistance à la fatigue Composants métalliques. Il comprend le traitement de surface des pièces et des composants utilisez des billes d'acier, de céramique ou de verre pour effectuer des impacts multiples industriels, lancés à grande vitesse. Le projectile est propulsé à travers une turbine ou un jet à grande vitesse Injection d'air comprimé. Chaque particule est considérée comme un petit marteau, ou la déformation plastique est plus ou moins profonde par rapport à la surface de la pièce.

Lorsque l'opération est terminée la surface est entièrement recouverte d'un réseau de bosses suffisamment dense.



**Figure II.1. Contrainte résiduelle générée par l'effet du grenailage [13]**

### **II.3.1. Grenailleuses**

Deux types principaux de grenailleuses sont utilisés dans l'industrie : les machines à air comprimé et les machines à turbine[12].

#### **II.3.1.1. Grenailleuses à air comprimé**

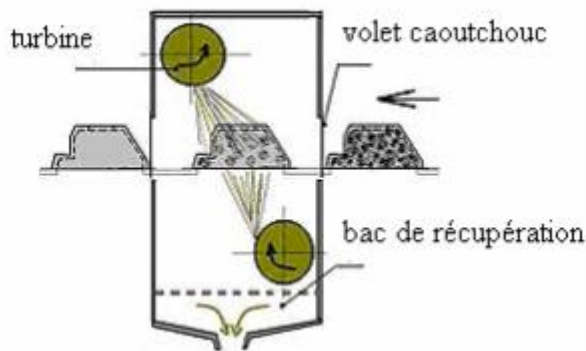
Les billes sont propulsées par de l'air comprimé au travers d'une buse (**figure II.2**). Cette machine présente l'intérêt d'être maniable et automatisable. Les paramètres sont bien maîtrisés. Elle propose un jet de billes relativement directionnel. Ce procédé est ainsi utilisé pour des pièces à géométrie complexe ou pour des zones peu accessibles (surfaces intérieures). Les pièces sont traitées de manière unitaire. On peut également intégrer plusieurs buses d'orientations différentes pour traiter une pièce de forme complexe. Toutefois, cette machine nécessite un investissement et une maintenance lourde. Elle présente par ailleurs une capacité de production faible[12].



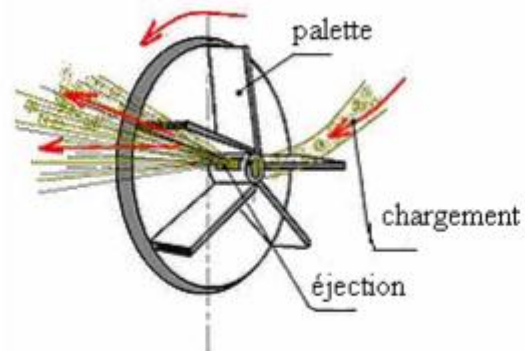
**Figure II.2.Exemple d'une buse de grenailleuse à air comprimé [15]**

### **II.3.1.2. Grenailleuses à turbine**

Dans ces machines, les billes sont introduites au centre de la turbine, qui tourne à une vitesse de rotation bien définie. Sous l'effet de la force centrifuge, les billes sont entraînées et accélérées vers l'extérieur de la turbine pour enfin être projetées en gerbe sur la pièce. Comme on peut le voir sur la Figure II-3, la zone grenillée est beaucoup plus importante qu'avec le procédé précédent. Les paramètres sont moins maîtrisables, et plus particulièrement l'angle d'incidence (qui sera, du coup, compris dans une fourchette de valeurs). Ce procédé est plutôt destiné à des pièces de géométrie plus simple, ou à des pièces plus massives. Il est adéquat pour les chaînes de production où l'on traitera des quantités importantes de pièces similaires. Il en est de même pour des structures longues défilant en continu dans des machines en tunnel prévues à cet effet[12].



**Figure II.3. Grenailleuse à turbine [11]**



**Figure II.4 roue à palettes [11]**

**II.3.2. Nature et dimensions des grenailles [11]**

Selon la nature des grenailles, on peut les classer en 3 familles :

- grenaille d'acier.
- grenaille de céramique.
- grenaille de verre.

Ces trois familles se distinguent par leurs caractéristiques mécaniques, leur masse volumique et leur dureté (tableau II.3.)[11].

**Tableau II .3. : Caractéristiques mécaniques des billes de grenailage [11]**

| Nature de la bille | Masse volumique (g/ cm3) | Module de Young (MPa) | Coefficient de Poisson | Dureté Vickers (daN /mm2) |
|--------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| Acier              | 7.5                      | 210 000               | 0.23                   | 470-540                   |
| Céramique          | 3.8                      | 80 000                | 0.20                   | 800-10                    |
| Verre              | 2.5                      | 65 000                | 0.23                   | 500-53                    |

Le choix de la bille dépend des critères technologiques et économiques. Le diamètre de la bille est choisi en fonction de la géométrie de la pièce à traiter et de la profondeur de la couche à écrouir.

### II.3.3. Paramètres du grenailage

Le grenailage est affecté par plusieurs paramètres, dont la nature des pièces à traiter Le procédé et les conditions de projection des billes sont connues. Nous citons quelques paramètres de base.

#### II.3.3.1. Paramètres intrinsèques au procédé :

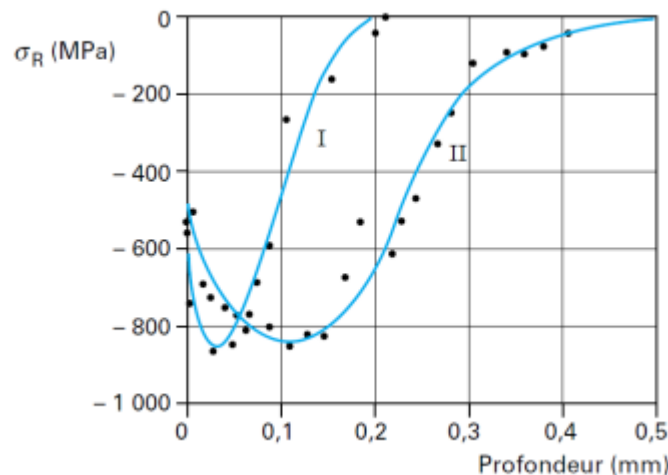
##### ➤ Vitesse de projection des billes[11]

La vitesse des billes c'est un paramètre essentiel. La vitesse et la masse volumique de la bille déterminent l'énergie cinétique de celle-ci. La mise en vitesse de la bille peut être obtenue de deux façons:

- la vitesse de rotation de la turbine pour des machines à turbines.
- Pression d'air, le diamètre de la buse pour le cas du grenailage par air comprimé.

##### ➤ Diamètre de la bille

L'influence du diamètre de la bille est illustrée dans la **figure II.5**. L'augmentation de diamètre des billes accroît la zone affectée par les contraintes de compression, mais sans changer les valeurs des contraintes résiduelles engendrées (en surface et en profondeur)[8].



**Figure II.5 Influence du diamètre des billes sur les contraintes résiduelles [8]**

##### ➤ Débit

Le débit correspond au nombre de billes projetées par unité de temps. Il dépend des réglages de la grenailleuse : diamètre de la buse ou de l'injecteur, pression d'utilisation,



de la granulométrie du produit rejeté et du nombre de turbines. Il influence considérablement l'intensité du grenailage.[12]

➤ **Durée d'exposition**

C'est le temps pendant lequel la surface à traiter est soumise à la projection des grains. La durée conditionne le nombre d'impacts sur la pièce. Le temps ayant une incidence directe sur le coût, on s'efforcera de le réduire.[12]

### **II.3.3.2. Paramètres intrinsèques aux matériaux**

Ces paramètres correspondent aux caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux utilisés, tant pour la bille que pour la pièce. Le choix de billes à employer doit être fait selon les caractéristiques du matériau à traiter[12].

➤ **Masse volumique (billes):**

Elle détermine le poids de la bille pour une dimension donnée, et donc, entrera en compte dans l'énergie cinétique de la bille[12].

➤ **Duretés (billes et pièce) :**

Le procédé étant basé sur la déformation plastique, il est souvent nécessaire que les billes soient au moins aussi dures que la pièce afin que ce soit cette dernière qui subisse les déformations principales. La rugosité superficielle finale est influencée par la dureté de la bille et de la pièce. Une bille de faible dureté est, dans certain cas, utilisée en augmentant l'intensité afin de répondre aux exigences particulières de l'état de surface[12].

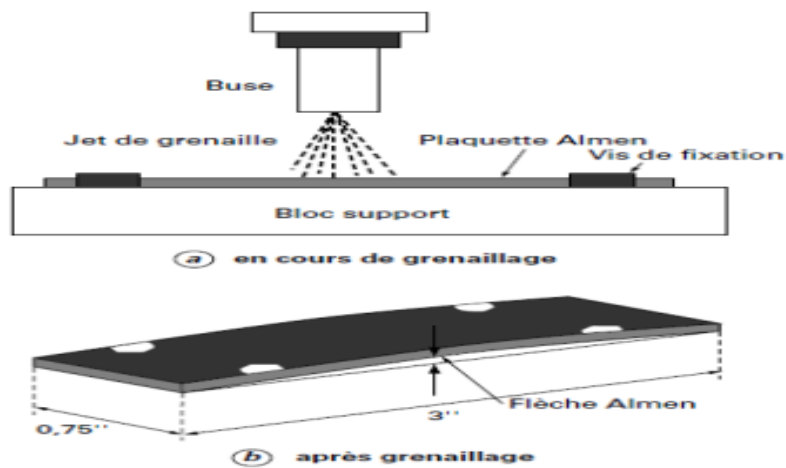
➤ **Loi de comportement :**

Chaque point de la surface peut être impacté plusieurs fois pour assurer un bon recouvrement, pour les matériaux dont la dureté est inférieure à celle de la bille, cet effet dynamique n'affecte qu'une petite couche proche de la surface. Il augmente la valeur de contrainte résiduelle en extrême surface[12].

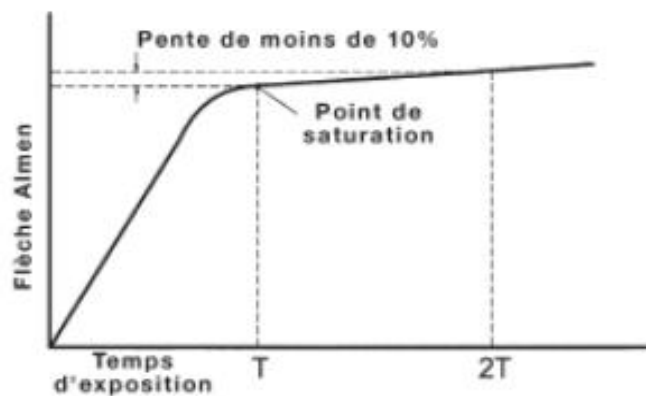
### **II.3.4. Contrôle du procédé de grenailage (Intensité d'Almen)**

L'intensité d'Almen est une mesure indirecte de l'énergie du jet de projectile, obtenue par l'analyse de la déformation générée par le jet sur une plaque d'acier SAE 1070 appelées plaques Almen . Cette courbure est due aux contraintes de compression résiduelles induites

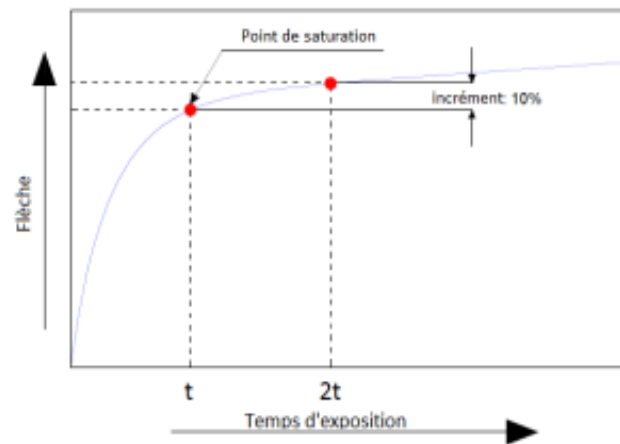
par les impacts des projectiles sur la plaque, qui font que la surface traitée adopte une courbure convexe. En traçant la flèche des plaques en fonction du temps d'exposition, on obtient une courbe de réglage appelée «courbe de saturation». Sur cette courbe, on a obtenu le «point de saturation» défini par la SAE en 1993 comme le premier point de la courbe, de sorte que, en doublant le temps d'exposition, la flèche de la plaque d'Almen augmente de 10% [13].



**Figure II.6** Mesure de la flèche d'Almen [8]



**Figure II.7** Courbe de saturation [12]

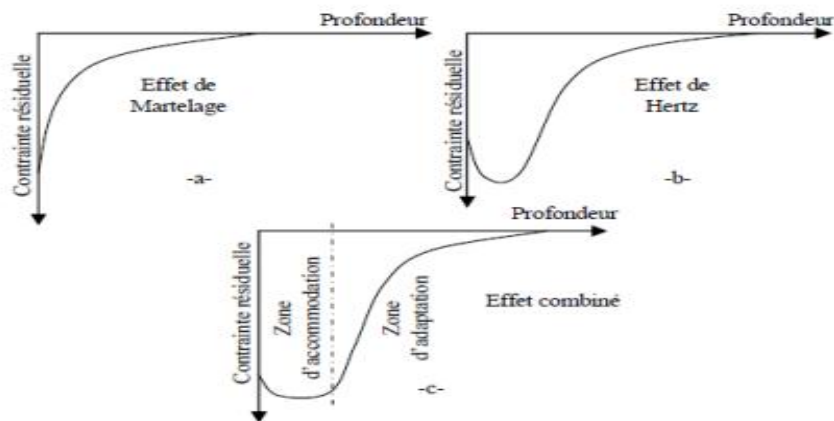


**Figure II.8 Point de saturation obtenu selon la règle des 10% [13]**

L'essai Almen permet de contrôler la reproductibilité d'une opération de grenailage dans des conditions données. Ce test n'est valable que dans des conditions précises appliquées à un matériau donné. En d'autres termes, deux flèches d'Almen obtenues dans des conditions d'essais différentes ne caractérisent pas le même effet. La flèche Almen ne définit ni le taux de recouvrement ni les contraintes résiduelles de la pièce. Elle ne prédit pas non plus l'évolution du matériau à traiter. Chaque matériau possède en effet sa propre loi de comportement[12].

#### **II.4. Effet mécanique du grenailage**

La création des contraintes résiduelles de compression sur la couche superficielle est le but principal du grenailage. Les contraintes résiduelles de compression permettent au matériau de subir des sollicitations plus importantes en service, et par conséquent d'améliorer la résistance de fatigue[11].



**Figure II.9 Représentation schématique de l'état de contrainte résiduelle provoquée par le grenailage de précontrainte [11]**

### II.5. Facteurs influençant un traitement de grenailage

Le processus de grenailage a fait l'objet d'une vaste étude expérimentale au cours des dernières décennies. Tous les auteurs coïncident pour souligner la complexité du processus, en raison des multiples facteurs impliqués: vitesse de l'impact, angle d'impact, flux massique des projectiles, type de projectile utilisé, degré de couverture (pourcentage de matériau ayant subi au moins un impact) et, bien sûr, les caractéristiques du matériau à traiter. La difficulté de mesurer certains de ces facteurs a conduit à la définition et au contrôle du processus en définissant les paramètres dits "de contrôle": intensité d'Almen, type de projectile (matériau et diamètre) et degré de couverture[13].

### II.6. Effets des traitements de grenailage [13]

Les traitements de grenailage induisent, dans une plus ou moins grande mesure, des effets différents sur les pièces traitées. Les principes fondamentaux sont :

- la modification de l'état de surface,
- la génération d'un champ de contraintes résiduelles de compression à la surface de la pièce.
- le durcissement de la surface.

**II.7. Les principales conséquences du grenailage****II.7.1. Répartition de contraintes résiduelles**

Ces contraintes peuvent résulter de l'effet de sollicitations extérieures ou être résiduelles. Les contraintes résiduelles de compression sont déplacées au cœur de la pièce, et sont par conséquent, moins dangereuses. L'efficacité de contraintes résiduelles produites par le grenailage dépend de sa bonne répartition dans le matériau, du niveau maximal de contraintes de compression atteint et de sa position, de la zone déformée plastiquement, et surtout de sa stabilité lors des chargements en service[12].

**II.7.2. Etat de surface**

Le grenailage peut permettre d'atténuer ou d'éliminer des effets de défauts dus aux procédés de fabrication, et de générer un état de surface isotrope dans toutes les directions du plan de la pièce. L'état de surface dépend de l'intensité du grenailage, donc de la vitesse de projection, de la nature de matériau de la bille et de la pièce. L'influence de la taille des grenailles sur l'état de surface n'est pas bien claire. Pour un matériau de dureté donnée, il existe une taille optimale de bille qui produit un meilleur état de surface. Afin d'améliorer l'état de surface, il est parfois nécessaire de recourir à un double grenailage, qui n'affecte pas énormément l'état de contraintes résiduelles obtenues avec un simple grenailage[12].

## **CHAPITRE III**

# **CALCULE DE LA DUREE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

## **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

### **III.1.Introduction**

Dans le domaine de la fatigue, il est nécessaire d'utiliser des critères de fatigue pour la conception des structures, leur rôle est convertir les charges multiaxiales en une charge équivalente. Le critère Crossland est utilisé pour estimer la durée de vie des structures soumises à des charges périodiques d'amplitude constante. Mais dans certains cas, la durée de vie est relativement courte. Dans ce cas, il est judicieux d'effectuer un traitement de surface pour améliorer la résistance à la fatigue. En effet, le traitement de surface, en l'occurrence le grenailage de précontrainte, peut introduire des contraintes résiduelles et des déformations plastiques dans le matériau. Les normes de fatigue doivent tenir compte de ce double effet.

### **III.2. Le critère de Crossland[11]**

Le critère de Crossland (1956) appartient à la série des normes de méthode globales. Elle est considérée comme l'un des critères les plus utilisés dans le domaine de la fatigue avec un grand nombre de cycles. Le critère Crossland est basé sur la combinaison linéaire entre la pression hydrostatique maximale et la racine carrée du deuxième invariant de l'écart de contrainte :

$$\xi_a + aP_{\max} \leq b \quad (\text{III.1})$$

Les constantes  $a$  et  $b$  sont identifiées à partir deux essais : de torsion et de flexion purement alternées.

Ces constantes sont déterminées par les relations suivantes :

$$b = \tau_{-1} \quad (\text{III.2})$$

$$a = \frac{\tau_{-1} - \frac{f_{-1}}{\sqrt{3}}}{\frac{f_{-1}}{3}} \quad (\text{III.3})$$

$N \geq N_k$   $N$  :  $\tau_{-1} = \tau_{-1}(N)$  et  $f_{-1} = f_{-1}(N)$

$\tau_{-1}(N)$  : Limite de fatigue à  $N$  cycles en torsion alternée

$f_{-1}(N)$  : Limite de fatigue à  $N$  cycles en flexion alternée

### **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

$\tau_{-1}$  : Limite d'endurance en torsion alternée

$f_{-1}$  : Limite d'endurance en flexion alternée

Le deuxième invariant du déviateur des amplitudes de contrainte  $\overline{\sigma}_a$  est exprimé par la relation suivante :

$$\xi_a = \sqrt{J_{2_a}} = \sigma_{eq_a} / \sqrt{3} \quad (\text{III.4})$$

La pression hydrostatique est définie par la relation suivante :

$$P_{\max} = 1/3[tr(\overline{\sigma}_m) + tr(\overline{\sigma}_a)] \quad (\text{III.5})$$

$\sigma_{eq_a}$ : Contrainte de Von-Misés du tenseur des amplitudes de contrainte  $\overline{\sigma}_a$ .

$\overline{\sigma}_m$  : Tenseur de contrainte moyenne.

$\overline{\sigma}_a$  : Tenseur des amplitudes de contrainte.

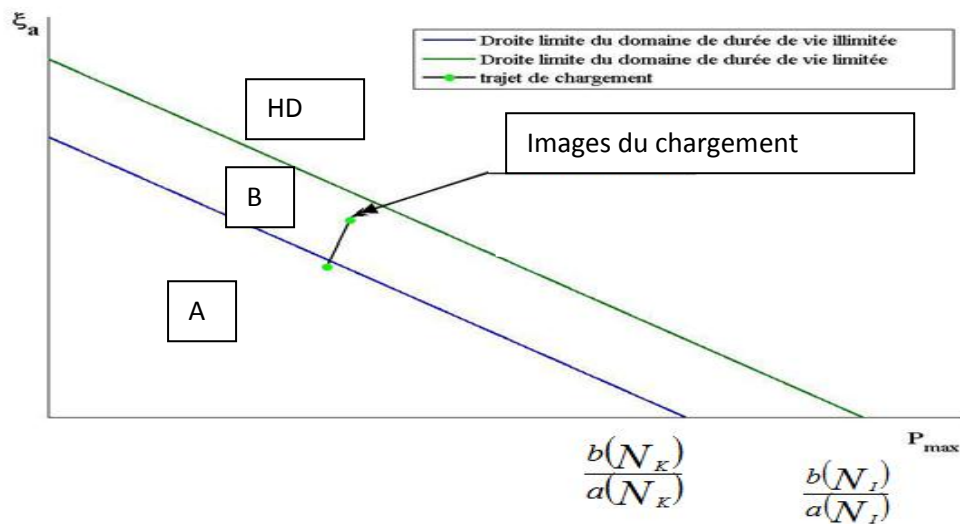
Pour appliquer le critère de Crossland à des matériaux, il faut que le matériau vérifie la condition suivante :

$$\frac{f_{-1}}{\tau_{-1}} < \sqrt{3} \quad (\text{III.6})$$

La même condition doit être vérifiée pour intégrer l'effet des contraintes résiduelles.

L'équation (III.1) permet de tracer le diagramme de Crossland dans lequel on peut distinguer Trois zones. La 1ère zone est la zone de sécurité (A), pour laquelle la durée de vie est illimitée (au-dessous de la droite) (figure III.1). La seconde zone est la zone d'endurance limitée (B) pour laquelle la durée de vie est limitée, la troisième zone (HD) c'est zone hors domaine de notre travail.





**Figure III.1. Représentation schématique de l'état de contrainte résiduelle provoquée par le grenailage de précontrainte [11]**

### **III.3. Description de la méthode de travail :**

Notre méthode de travail se divise en deux parties. La partie 1 est consacrée au calcul de la durée de vie d'une structure en acier de qualité SM45C. La deuxième partie est réservée au calcul de la durée de vie d'un même matériau avec un traitement de surface. Les étapes de calcul de la durée de vie dans la partie 1 et la partie 2 sont les mêmes, Cependant, dans la deuxième partie, on ajoute les contraintes résiduelles.

#### **Les étapes de travail sont :**

**La première étape :** comprend les propriétés mécaniques, à savoir le module de Young, le coefficient de Poisson et les courbes de Wöhler de torsion et de flexion purement alternées. Le calcul des constantes *a* et *b* utilisées pour tracer la ligne de Crossland qu'est déterminé par les équations (III.3) et (III.2), respectivement.

**La deuxième étape :** afin de déterminer le champ de contraintes, nous avons effectué les opérations suivantes :

- 1- Utiliser les données du module de Young et du coefficient de Poisson de la première étape pour calculer le paramètre de Crossland (saisir les données dans Ansys),
- 2- Créer la géométrie de l'éprouvette et appliquer les charges et conditions aux limites pour chaque type de contrainte (traction + flexion et extension + torsion),
- 3- Échantillon d'éléments finis discrétisés (Mesh),

### **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

4- Déterminer le champ de contrainte dû à la charge appliquée pour déterminer l'emplacement de la zone critique.

**La troisième étape :** Développer le programme sous Matlab pour calculer la durée de vie en le nombre de cycles. Dans cette étape, nous utilisons le paramètre Pmax du critère Crossland dans ce cas, et Il a été calculé par le code Ansys auparavant. Il faut aussi mémoriser la fonction inverse de torsion. L'organigramme est présenté à la figure III.6.

**La quatrième étape :** La quatrième étape consiste à dessiner le diagramme Crossland et le chemin de chargement.

**La cinquième étape :** est dédiée à la création d'une interface permettant aux deux logiciels Matlab et Ansys de communiquer entre eux.

#### **III.4. Caractéristiques du matériau étudié :**

Le matériau étudié est l'acier de nuance SM45C. Les caractéristiques mécaniques de ce matériau sont présentées dans le tableau III.1:

**Tableau.III.1. Caractéristiques mécaniques du matériau [11]**

|   |        |
|---|--------|
| Limite d'élasticité $\sigma_e$ (MPa)                                      | 638    |
| Coefficient de poisson $\nu$  | 0.29   |
| Module d'Young E (MPa)  | 213000 |
| Contrainte ultime à la traction $\sigma_u$ (MPa)                          | 824    |
| Module de cisaillement G (MPa)  | 82500  |
| Allongement à rupture A (%)   | 22     |
| Limite d'endurance en torsion alternée symétrique $\tau_{-1}$ (MPa)       | 311    |
| Limite d'endurance en flexion alternée symétrique $f_{-1}$ (MPa)          | 442    |
| Nombre de cycles correspondant à une durée de vie limitée $N_1$ (Cycles). | 81254  |
| Nombre de cycles correspondant à une durée de vie illimitée (Cycles).     | $10^7$ |

N.B : Les limites d'endurance (flexion et torsion) sont prises à  $10^7$  cycles.

-La composition chimique est présentée dans le tableau III.2

## **CHAPITRE III    CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

**Tableau.III.2. Composition chimique de l'acier SM45C [11]**

| <b>C</b> | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Cu</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> |
|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.42     | 0.28      | 0.73      | 0.02     | 0.012    | 0.13      | 0.18      | 0.14      |

### **III.5. Courbes de Wöhler :**

Les figures III.2 et III.3 montrent les courbes de Wöhler (essais de fatigue uniaxial) réalisées par Lee[11] dans le cas de flexion et torsion alternées.

Les courbes de Wöhler de l'acier SM45C sont données par les équations suivantes

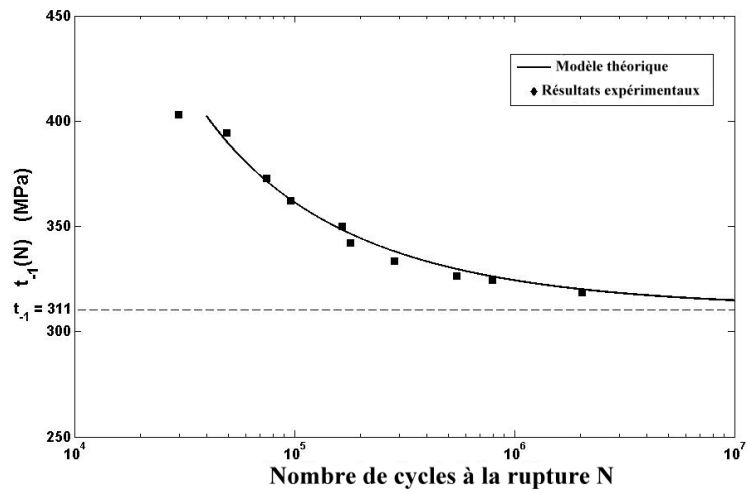
1- Torsion alternée :

$$\tau_{-1}(N) = \frac{311}{1 - 62.3 \cdot N^{-0.53}} \quad (\text{III.7})$$

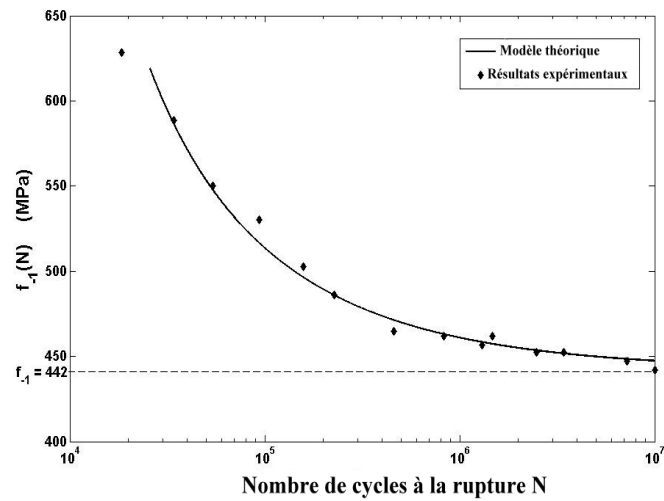
2- Flexion alternée :

$$f_{-1} = \frac{442}{1 - 62.3 \cdot N^{-0.53}} \quad (\text{III.8})$$

Les courbes de Wöhler sont présentées par les **figures III.2 et III.3.**



**Figure III.2 Courbes d'endurance en torsion alternée de SM45C [11]**



**Figure III.3 Courbes d'endurance en flexion alternée de SM45C [11]**

## **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

### **III.6. Calcul la durée de vie sans traitement de surface :**

Le critère Crossland est utilisé pour estimer la durée de vie d'une structure sollicitée par une charge périodique à amplitude constante superposée par une autre monotone. La méthode de calcul de la durée de vie est donnée par l'organigramme (Figure .III.5).

#### **III.6-1. Droites limites du critère :**

##### **III.6.1.1. Droite limite du domaine de durée de vie illimitée :**

L'utilisation des équations III.2 III.3 à  $N = N_K = 10^7$  cycles permet de calculer les constantes **a** et **b** pour déterminer la zone de sécurité (domaine illimité).

$$a = 0.3778$$

$$b = 368.34 \text{ MPa}$$

Le critère de Crossland s'écrit de la manière suivante :

$$\xi_a + 0.3778 P_{\max} \leq 368.34 \quad (\text{III.9})$$

Cette inéquation est représentée par une droite séparant la zone de sécurité et celle de non sécurité.

##### **III.6.1.2. Droite limite du domaine de durée de vie limitée :**

Le calcul des constantes a et b pour une durée de vie  $N = N_i$  se fait respectivement par les équations en prenant pour nombre de cycles  $N = N_i$ . Ce calcul donne:

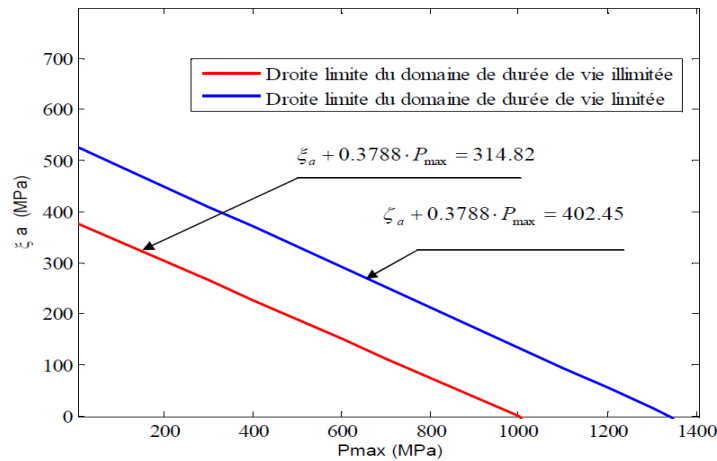
$$a = 0.3778$$

$$b = 402.45 \text{ MPa}$$

Par conséquent l'équation de la droite du domaine sécurité pour une durée de vie  $N = N_i$  est donnée par :

$$\xi_a + 0.3778 P_{\max} = 402,45 \quad (\text{III.10})$$

Le diagramme de Crossland est représenté par **la figure III.4.**



**Figure III.4 Droites limites du domaine du critère de Crossland**

**III.7.3. Méthode de calcul des durées de vie des structures :**

Pour les structures soumises à des contraintes de fatigue, la durée de vie doit être calculée par la formule suivante. Passez les lignes directrices Crossland. Pour cela, on calcule la contrainte Crossland  $\sigma_{eq}$  définie par  $P_{max}$  ;  $\xi_a$ .

**III.7.4. La fonction inverse de torsion :**

Si le nombre de cycles est connu, l'équation de la courbe de torsion de Wöhler est utilisée pour calculer la contrainte de torsion à la rupture. Mais si l'on veut calculer la durée de vie lorsque la contrainte est connue, on utilise la fonction inverse de (III.7).

$$N(\tau) = \frac{\tau - 311}{62.3 \cdot t} \tag{III.11}$$

Pour calculer la durée de vie, déterminez d'abord la contrainte équivalente. La contrainte doit être égale à la contrainte de torsion :

$$b = \xi_a + aP_{max} \tag{III.12}$$

$$b = \sigma_{eq} \tag{III.13}$$

$$\tau = \sigma_{eq} \tag{III.14}$$

### **CHAPITRE III    CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

On analysant les équations (III.11), (III.12), (III.13) et (III.14), on remarque l'existence d'une relation entre les paramètres  $P_{max}$ ,  $\xi_a$ ,  $\sigma_{eq}$  et  $N$ .

$$N(\sigma_{eq}) = \frac{\sigma_{eq}^{-311}}{62.3 \cdot \sigma_{eq}} \tag{III.15}$$

L'organigramme de calcul de durée de vie est donné par [4] :

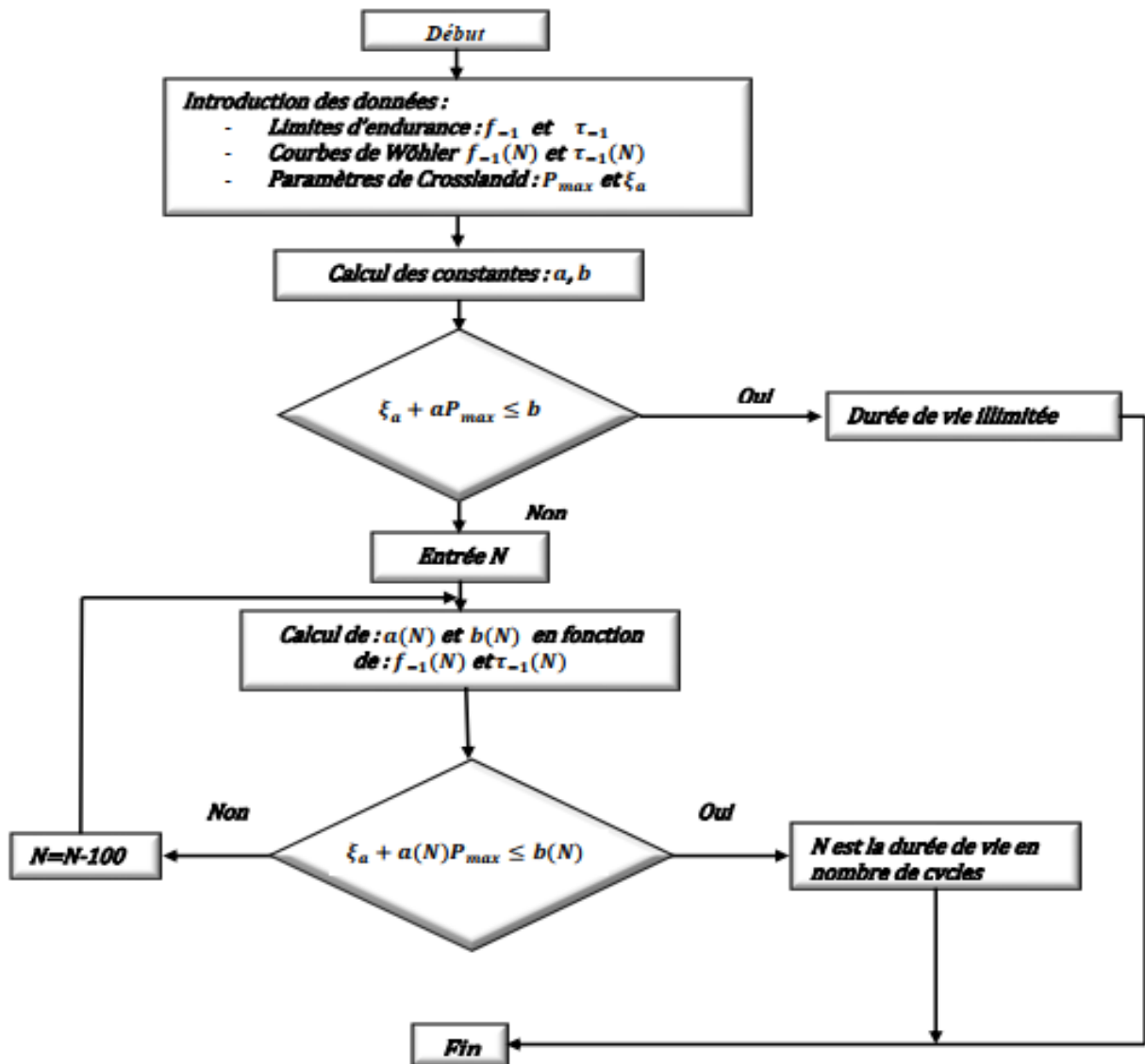


Figure III.5 Organigramme de calcul de durée de vie [8].

## CHAPITRE III CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT

### III.8. Structure sollicitée à une traction statique superposée à une traction alternée :

#### III.8.1. L'éprouvette :

La géométrie d'éprouvette est représentée par la figure III.6, est une plaque rectangulaire de faible épaisseur (5 mm), présentant un défaut de forme (cercle).

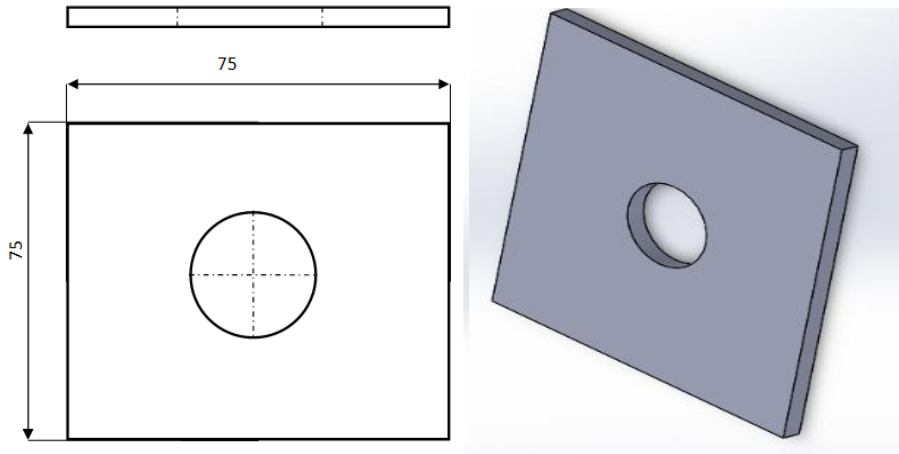


Figure III.6 La géométrie d'éprouvette

#### III.8.2. Chargement et conditions aux limites :

Le chargement et les conditions aux limites de l'éprouvette sont montrés sur la figure III.7.

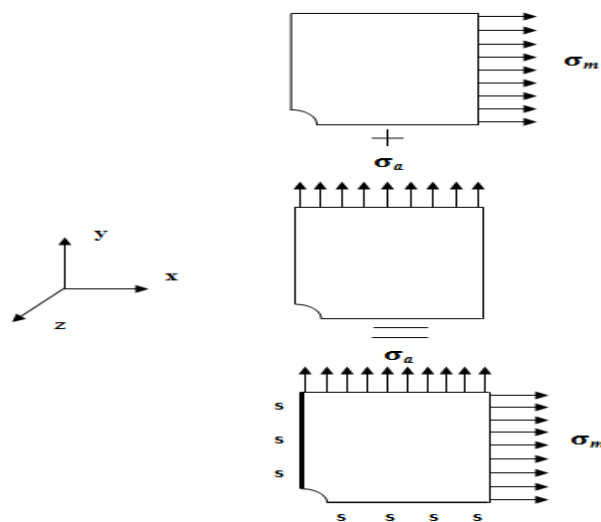


Figure III.7 Le chargement et les conditions aux limites [14]

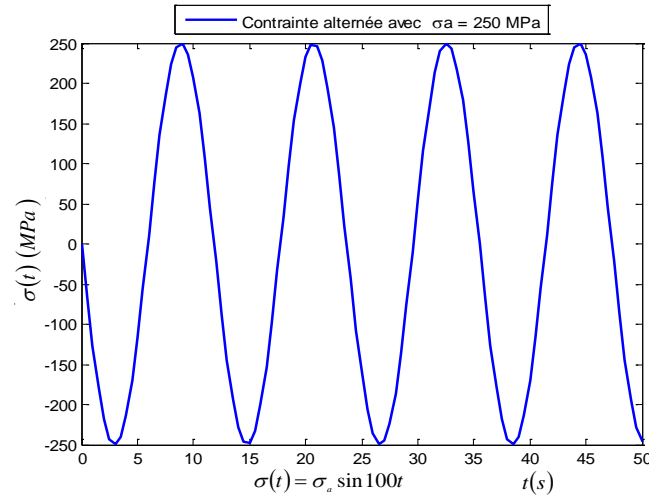


### CHAPITRE III CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT

---

L'existence d'une symétrie de l'éprouvette minimise le temps de calcul. Nous avons présenté seulement le quart de l'éprouvette avec le chargement et les conditions aux limites.

L'allure de la force alternée de traction est de la forme :



**Figure III.8** Forme du signal de la force alternée.

L'équation de ce dernier est de forme :

$$F(N) = F_a \cdot \sin(\omega t)(N) \quad (\text{III.16})$$

#### III.8.3. Maillage de la structure :

Afin de visualiser le champ de contraintes et de déterminer les paramètres de Crossland, on utilise la méthode des éléments finis en décomposant la géométrie de la structure en maille via le code Ansys. La figure III.9 montre un maillage ordonné. Nous avons utilisé un élément type sous la forme d'un quadrilatérale. Ce type d'élément est constitué de 8 nœuds (plan 183) et possède deux degrés de liberté : translation selon les axes (x) et (y).



**Figure III.9** Présentation **le quart** de l'éprouvette avec maillage ordonné (Maillage grossier)

#### **III.8.4. Détermination de la zone critique :**

La visualisation de la structure permet de localiser les zones **critiques** correspondant à l'élément (20511) et nœud (2). L'emplacement de cet élément est indiqué sur la figure III.10.



**Figure III.10** Position de l'élément (20511)

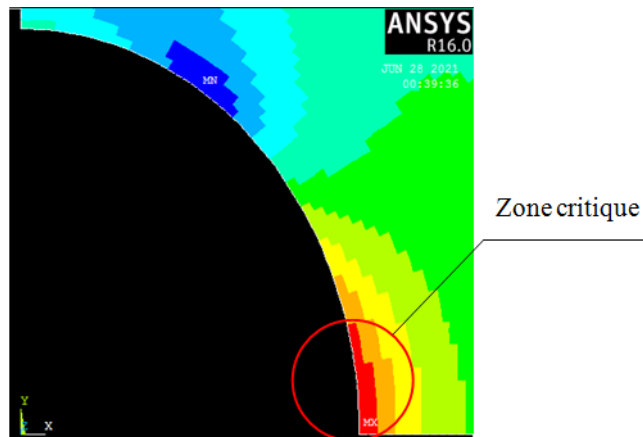
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.3.

**CHAPITRE III    CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET  
AVEC TRAITEMENT**

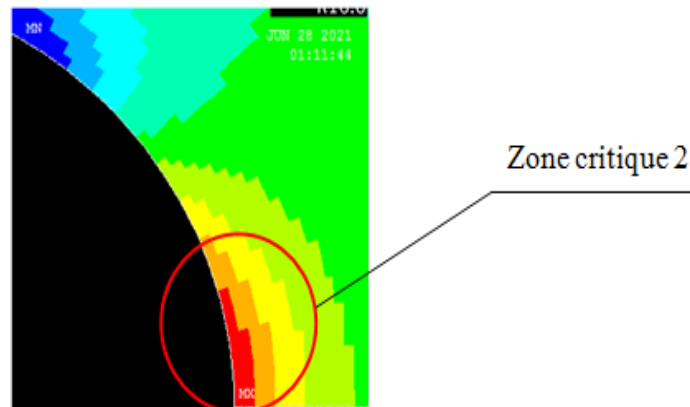
---

**Tableau.III.3. Détermination de la zone critique**

| R         | $\sigma_m$ (MPa) | Pmax<br>(MPa) | $\xi_a$<br>(MPa) | $\sigma_{eq}$<br>(MPa) | Elément<br>Critique |
|-----------|------------------|---------------|------------------|------------------------|---------------------|
|           | $\sigma_a$ (MPa) |               |                  |                        |                     |
| <b>10</b> | 60               | 90.555        | 201.91           | 236.21                 | 20511               |
|           | 100              |               |                  |                        |                     |
|           | 110              | 125.94        | 302.86           | 350.57                 | 20511               |
|           | 150              |               |                  |                        |                     |



**Figure III.11 Zone Critique pour une contrainte monotone (R10)**

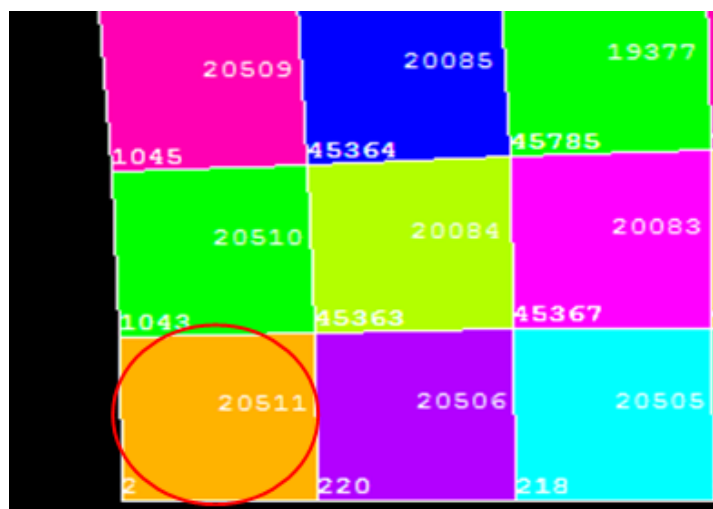


**Figure III.12 Zone Critique pour une contrainte alternée (R10)**

D'après les figures III.11 et III.12, nous remarquons que :

-Le champ de contraintes de la zone critique 1 est supérieur au champ de contraintes de la zone critique 2.

-Les zones 1 et 2 sont presque les mêmes (la position des zones critiques est la même), des deux charges. D'après les résultats obtenus en appliquant une série de charges (tableau III.3), on peut voir que quelle que soit la force de la charge appliquée, les zones critiques ne changent pas de position. La figure III.13 montre plus clairement l'emplacement de l'élément critique, dans ce cas l'élément 20511.



**Figure III.13 Position d'élément 20511 plus claire**

## **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

### **III.8.5. Raffinement du maillage de la structure :**

Le maillage est la discrétisation du milieu continu (structure) dans l'élément fini pour déterminer le champ de contraintes. Afin d'affiner et d'optimiser la grille, nous procédons comme suit :

- 1- Augmenter le nombre d'éléments finis en réduisant leur taille.
- 2- 2- Calculez le champ de contraintes et les paramètres Crossland pour chaque type de taille d'élément.
- 3- 3- Recherche de la convergence du paramètre Crossland. Pour notre cas, nous avons choisi un chargement.  $\sigma_m$  et  $\sigma_a$ .

### **III.8.6.a Calcul durée de vie Sans traitement :**

Nous avons testé le modèle sur la structure dont le diamètre du cercle prend deux valeurs (5 mm et 10 mm) avec variation des contraintes appliquées. Le tableau III.4 récapitule les résultats des durées de vie obtenues. Tableau III.4. Chargements appliqués et résultats obtenus

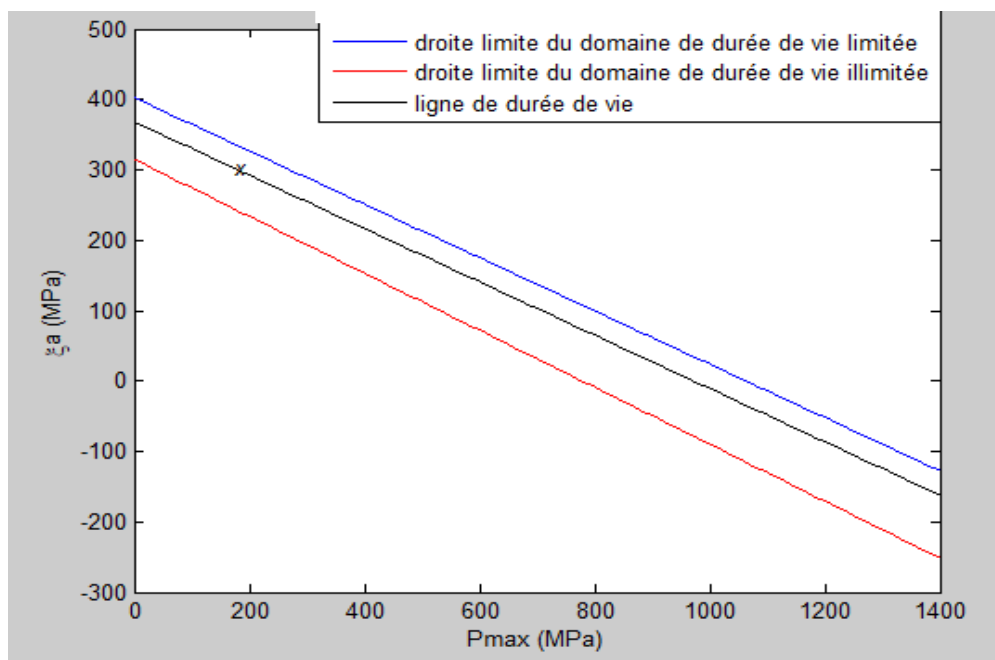
**Tableau.III.4. Chargements appliqués et résultats obtenus**

| R | $\sigma_m$ (MPa) | $\sigma_a$ (Mpa) | P <sub>max</sub> (MPa) | $\xi_a$ (MPa) | $\sigma_{eq}$ (MPa) | Nombre de cycle |
|---|------------------|------------------|------------------------|---------------|---------------------|-----------------|
| 5 | 60               | 300              | 277.00                 | 473.93        | 578.85              | HD              |
|   |                  | 250              | 227.75                 | 394.94        | 481.21              | HD              |
|   |                  | 240              | 217.91                 | 379.14        | 461.69              | HD              |
|   |                  | 230              | 208.06                 | 363.34        | 442.16              | HD              |
|   |                  | 220              | 198.21                 | 347.55        | 422.63              | HD              |
|   |                  | 200              | 178.51                 | 315.95        | 383.57              | 56200           |
|   |                  | 180              | 158.82                 | 284.36        | 344.52              | 197200          |
|   |                  | 170              | 152.49                 | 285.49        | 343.26              | Illimitée       |
|   |                  | 160              | 142.32                 | 268.70        | 322.61              | Illimitée       |
|   |                  | 200              | 207.83                 | 390.13        | 468.86              | HD              |

### **CHAPITRE III    CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

|    |    |     |        |        |        |           |
|----|----|-----|--------|--------|--------|-----------|
| 10 | 60 | 190 | 196.02 | 370.63 | 444.88 | HD        |
|    |    | 180 | 184.21 | 351.12 | 420.90 | HD        |
|    |    | 170 | 170.40 | 331.61 | 396.92 | 44200     |
|    |    | 160 | 160.59 | 312.11 | 372.94 | 71900     |
|    |    | 150 | 148.78 | 292.60 | 348.96 | 159800    |
|    |    | 140 | 136.97 | 273.09 | 324.97 | 920600    |
|    |    | 130 | 125.15 | 253.59 | 300.99 | Illimitée |
|    |    | 120 | 113.34 | 234.08 | 277.01 | Illimitée |

Dans le diagramme de Crossland on présente une image de chargement appliqué ( $\sigma_m = 150$ ,  $\sigma_a = 180$ ) ou  $P_{max} = 133.11$  MPA et  $X_{ia} = 327.08$  = pour la structure à R(5ou 10), on trace une ligne passant par cette indiquant la durée de vie le long de cette droite pour différents chargement.



**Figure III.14 Diagramme de Crossland ( la ligne du durée vie)**

L'analyse de la durée de vie nous permet de distinguer trois domaines :

1- durée de vie inférieure à 39810 cycles, on note ce type de chargement (Hors Domaine : «H.D ») ceci relève probablement du domaine de fatigue oligocyclique.

## **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

2-durée de vie limitée entre 39810 cycles et  $10^7$  cycles, on note ce type de chargement "Domaine limité". La valeur de contrainte équivalente est située dans ce domaine.

3-durée de vie est illimitée si elle est supérieure à  $10^7$  cycles, on note ce type de chargement "illimité".

### **II.8.7. Présentation graphique des résultats :**

La durée de vie dans le cas d'une sollicitation de traction statique superposée à une traction alternée est présentée graphiquement dans les figures III.14 à III.20. Ces figures montrent les Droites limites des domaines à durées limitée et illimitée ainsi que les trajets de chargement.

Chaque trajet de chargement peut être représenté par un point critique indiquant la charge maximale au cours d'un cycle. Nous appelons ce point "image de chargement". Pour un chargement donné relatif à un couple  $\sigma_m$  et  $\sigma_a$ , on détermine dans un premier temps "l'image de chargement".

Ensuite on cherche la droite du critère de Crossland qui passe par ce point. Enfin, on déduit la durée de vie correspondante à ce chargement par la relation III.15.

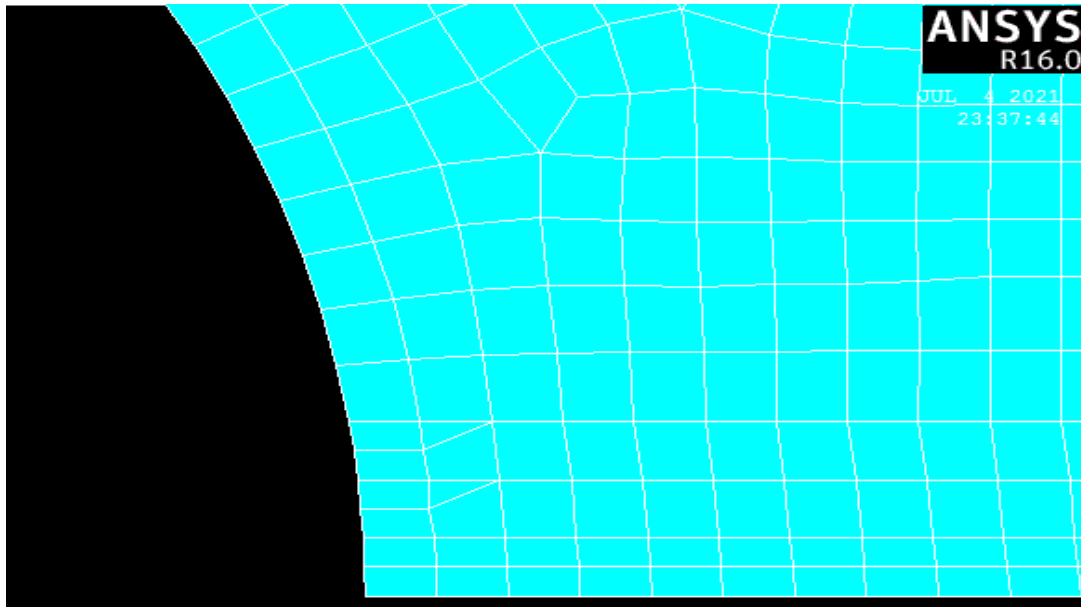
### **III.9 Calcul de durée de vie avec traitement :**

#### **III.9.1 Structure d'application du grenailage :**

Nous limitons le traitement de grenailage sur la structure rectangulaire dont le rayon du cercle de l'entaille est 5 mm.

Afin de réaliser l'opération du grenailage, nous avons introduit les contraintes résiduelles dues au grenailage comme une fonction scalaire, dans le calcul de la pression hydrostatique maximale. Pour ce faire nous allons procéder au raffinement de la zone critique où la contrainte équivalente de Crossland est maximale (figures III.11 et III.12).

Le raffinement est constitué par des lignes pour pouvoir transmettre le profil des contraintes résiduelles suivant la direction d'injection des grenailles, la figure III-15 présente le raffinement de zone à traiter de la structure.



**Figure III.15 raffinement de la zone critique.**

**III.9.2. Paramètres de grenailage :**

**Le premier cas :**

Dans le premier cas, nous utilisons des grenailles d'acier pour traiter les structures avec des paramètres ( $D = 0,6 \text{ mm}$ ,  $f = 0,4 \text{ mm}$  et  $D=0.8$  avec une flèche de 0.28). Les résultats obtenus sont les suivants : les figures III.16 et III.17 montrent la répartition des contraintes résiduelles en fonction de la profondeur avant et après traitement, et le tableau III.5 montre la comparaison des résultats obtenus par simulation sans traitement de surface.

**Tableau.III.5 montre les résultats avant et après le traitement de  $D=0.6\text{mm}$  et  $Al=0.4$**

| Chargement |                     | Résultats avant traitement |                        |                        |                  |              | Résultats après traitement |                        |                  |              |
|------------|---------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------|--------------|----------------------------|------------------------|------------------|--------------|
| N°         | $\sigma_m$<br>(MPa) | $\sigma_a$<br>(MPa)        | Paramètre de crossland |                        |                  | NR<br>Cycles | Paramètre de Crossland     |                        |                  | NR<br>Cycles |
|            |                     |                            | Pmax<br>(MPa)          | $\sigma_{eq}$<br>(MPa) | Nœud<br>critique |              | Pmax<br>(MPa)              | $\sigma_{eq}$<br>(MPa) | Nœud<br>critique |              |
| 1          | 150                 | 200                        | 154.12                 | 421.99                 | 2                | HD           | 164.52                     | 380.32                 | 260              | 60600        |
| 2          |                     | 190                        | 143.62                 | 399.82                 | 2                | HD           | 159.17                     | 362.40                 | 260              | 97400        |
| 3          |                     | 180                        | 133.11                 | 377.66                 | 2                | 64300        | 144.83                     | 341.06                 | 260              | 218200       |

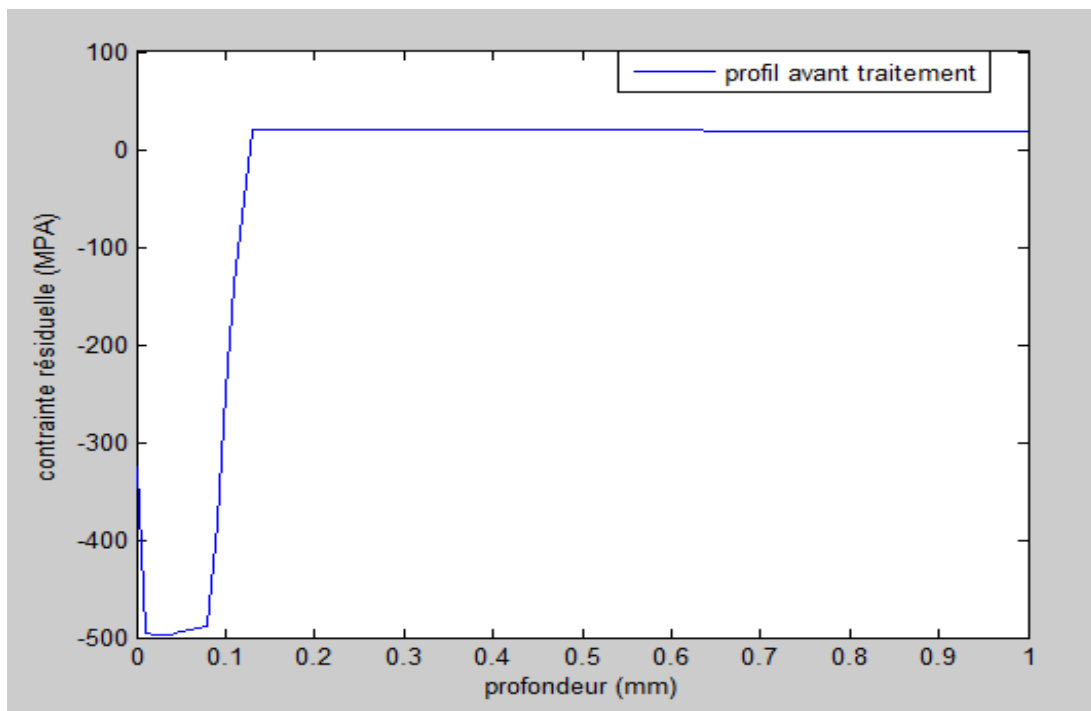


## *CHAPITRE III    CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT*

**Tableau.III.6** Présente les résultats avant et après le traitement de  $D=0.8$   $AL=0.28$ :

| Chargement |                     | Résultats avant traitement |                        |                        |                  |              | Résultats après traitement |                        |                  |              |
|------------|---------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------|--------------|----------------------------|------------------------|------------------|--------------|
| N°         | $\sigma_m$<br>(MPA) | $\sigma_a$<br>(MPA)        | Paramètre de crossland |                        |                  | NR<br>Cycles | Paramètre de Crossland     |                        |                  | NR<br>Cycles |
|            |                     |                            | Pmax<br>(MPA)          | $\sigma_{eq}$<br>(MPA) | Nœud<br>critique |              | Pmax<br>(MPA)              | $\sigma_{eq}$<br>(MPA) | Nœud<br>critique |              |
| 1          | 100                 | 200                        | 172.82                 | 429.09                 | 2                | HD           | 184.38                     | 387.870                | 260              | 51700        |
| 2          |                     | 190                        | 162.31                 | 406.92                 | 2                | HD           | 174.54                     | 368.24                 | 260              | 81900        |
| 3          |                     | 180                        | 151.80                 | 377.66                 | 2                | 55000        | 164.69                     | 341.06                 | 260              | 177200       |

**Profil CR :**



**FigureIII.16.** Profil avant traitement

### CHAPITRE III CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT

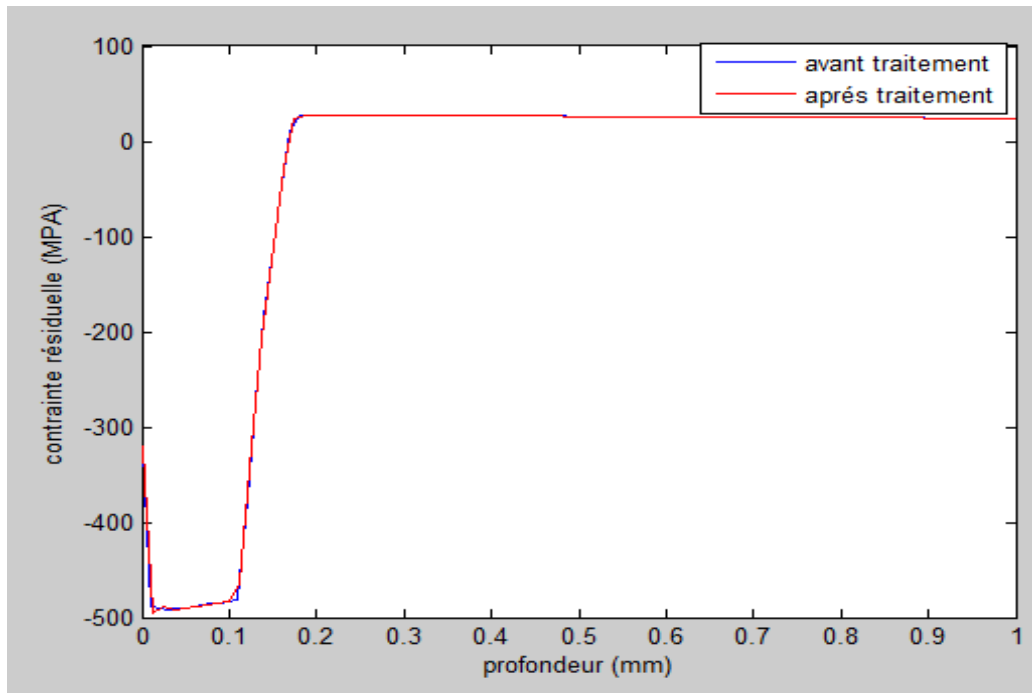


Figure III.17 Profil avant et après me traitement

Ligne de durée de vie :

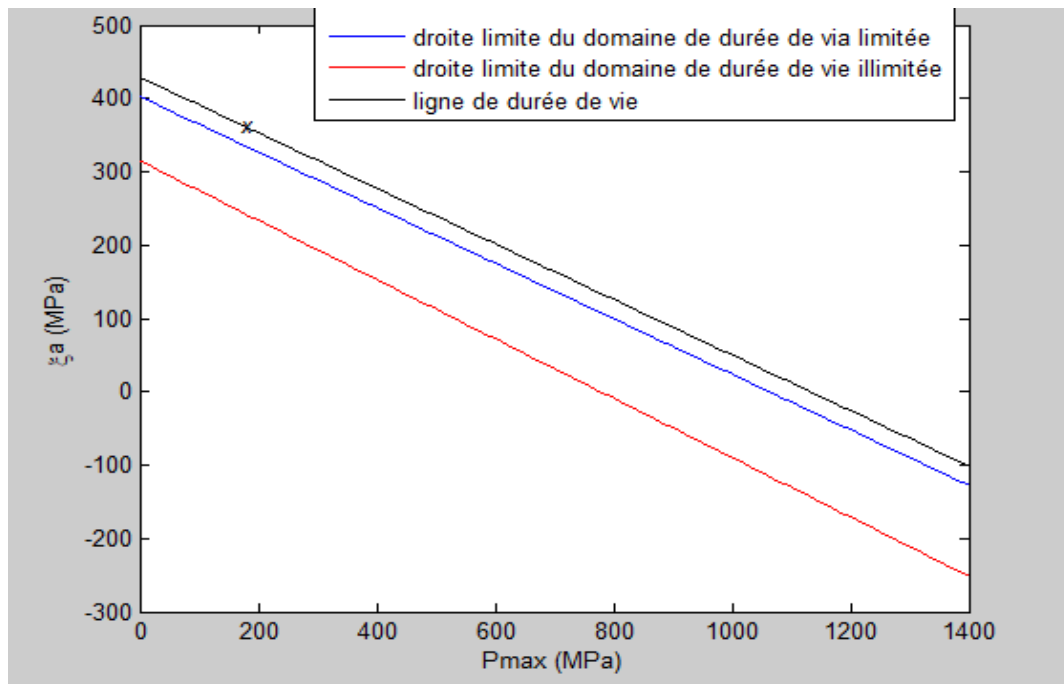


Figure III.18 Diagramme de Crossland (avant le traitement de surface)

### CHAPITRE III CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT

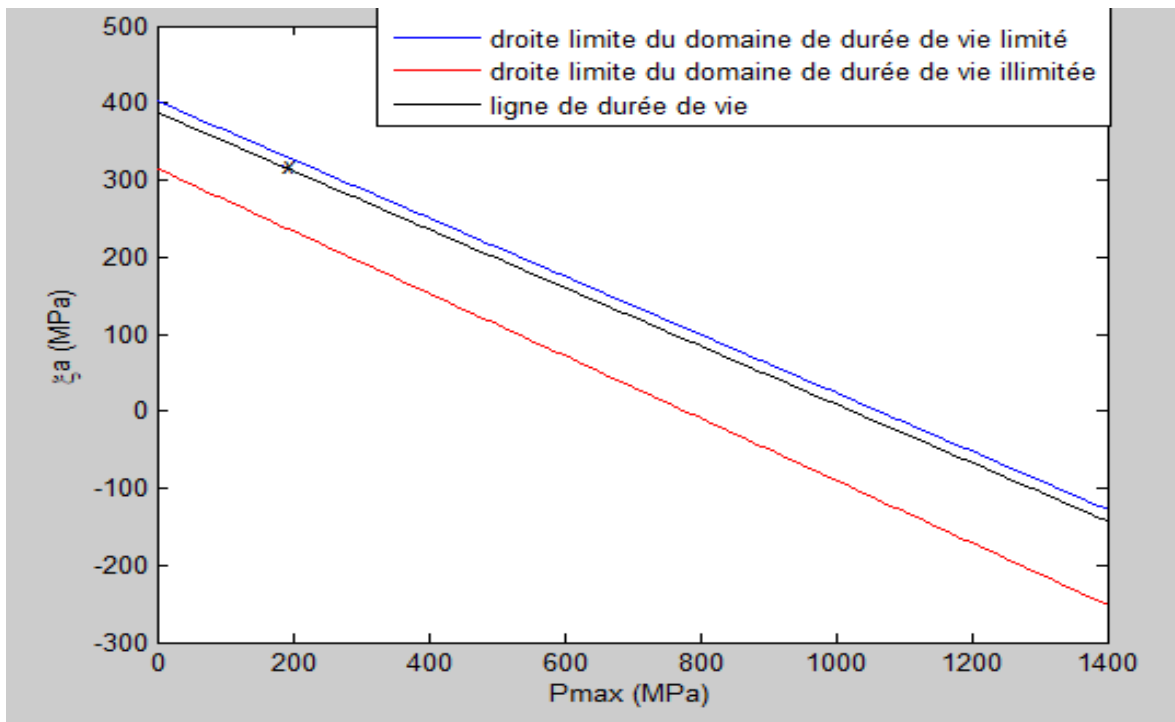


Figure III.19 Diagramme de Crossland (après le traitement de surface)

La zone critique est déplacée en profondeur, elle est représentée par le nœud critique 260. La figure III.20 représente cette position.

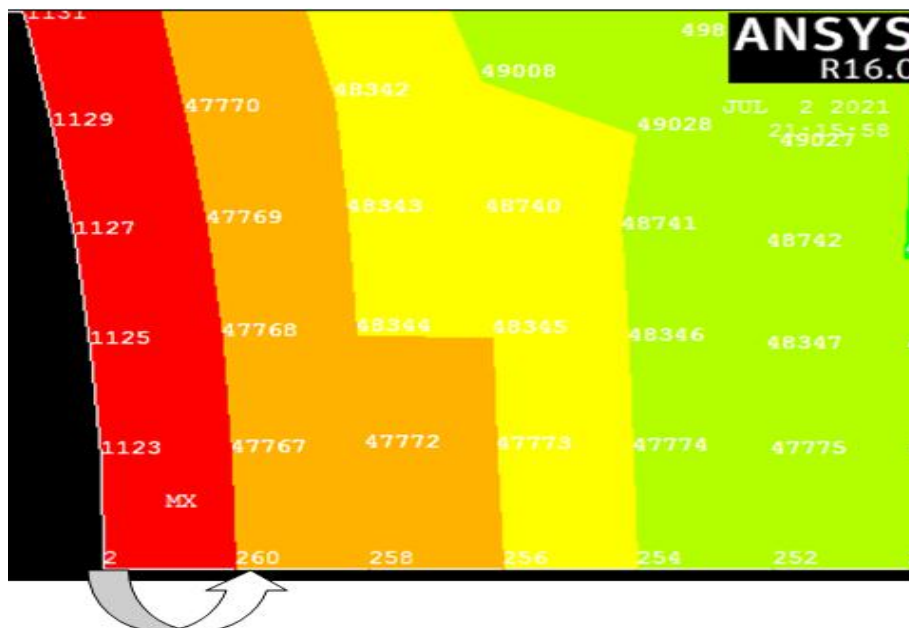


Figure III.20 Position de nœud critique 260.

D'après ce résultat on remarque :

### **CHAPITRE III      CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT**

---

- Une diminution de la valeur de la contrainte équivalant de crossland.
- Un changement de la position de la zone critique elle était en surface au nœud (2) et après le traitement elle déplace jusqu'à le nœud (260).
- Une claire amélioration des durées de vie calculées après traitement la première et la deuxième elles passent de **HD** a un nombre de cycle limitée **60600** et **97400** respectivement, ainsi que le 3ème cas change de **64300** à **218200**.

**Le deuxième cas :**

Dans ce cas, nous fixons les mêmes paramètres, en changeant la de la bille grenailles à une autre de céramique.

**Tableau.III.7. Présente les résultats de D=0.6mm et Al=0.4 :**

| Chargement |                     | Résultats avant traitement |                        |                        |                  | Résultats après traitement |                        |                        |                  |               |
|------------|---------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------|---------------|
| N°         | $\sigma_m$<br>(MPa) | $\sigma_a$<br>(MPa)        | Paramètre de crossland |                        |                  | NR                         | Paramètre de Crossland |                        |                  | NR            |
|            |                     |                            | Pmax<br>(MPa)          | $\sigma_{eq}$<br>(MPa) | Nœud<br>critique | Cycles                     | Pmax<br>(MPa)          | $\sigma_{eq}$<br>(MPa) | Nœud<br>critique | Cycles        |
| <b>1</b>   | <b>150</b>          | <b>200</b>                 | 154.12                 | 421.99                 | 2                | <b>HD</b>                  | 169.018                | 382.03                 | 260              | <b>58300</b>  |
| <b>2</b>   |                     | <b>190</b>                 | 143.62                 | 399.82                 | 2                | <b>HD</b>                  | 159.17                 | 362.40                 | 260              | <b>97400</b>  |
|            |                     | <b>180</b>                 | 133.11                 | 377.66                 | 2                | <b>64300</b>               | 149.32                 | 342.76                 | 260              | <b>218200</b> |

**Profil de Cr :**

### CHAPITRE III    CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT

---

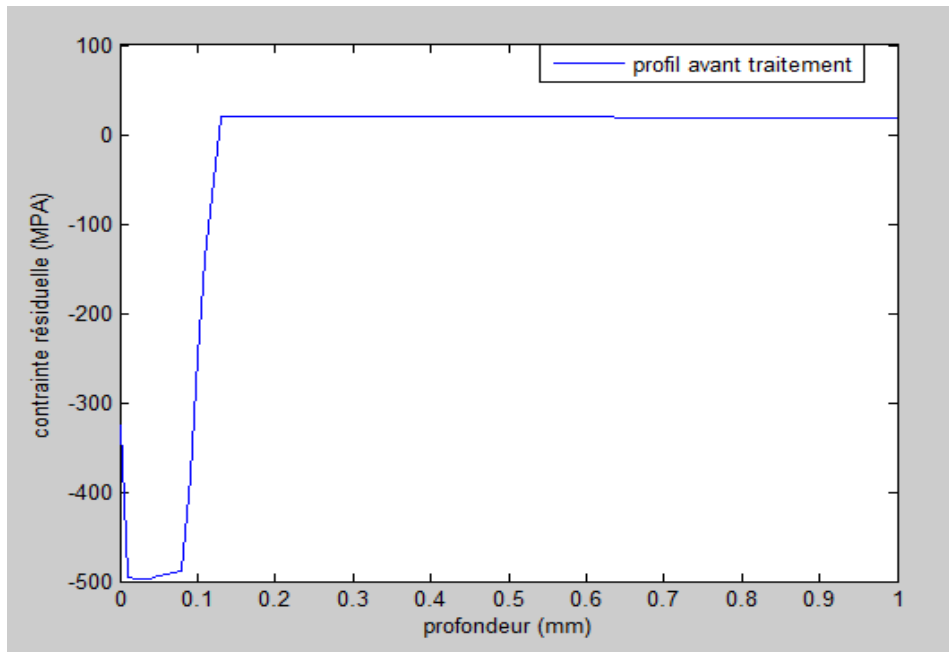


Figure III.21 Profil avant traitement

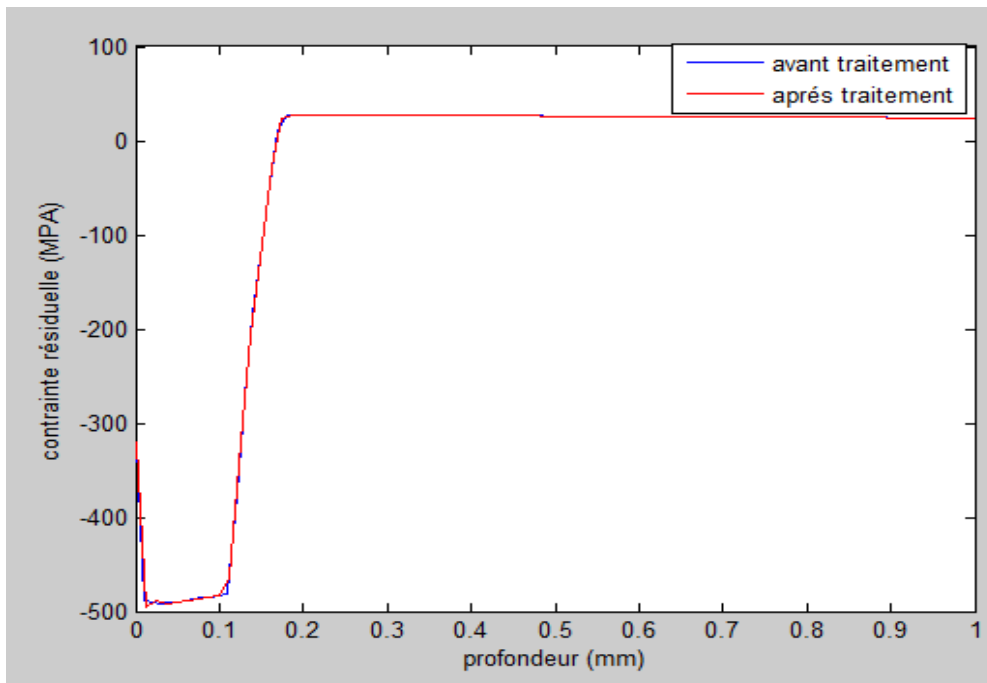


Figure III.22 Profil avant et après traitement

### CHAPITRE III CALCUL LA DURRE DE VIE SANS ET AVEC TRAITEMENT

Diagramme de CROSSLAND :

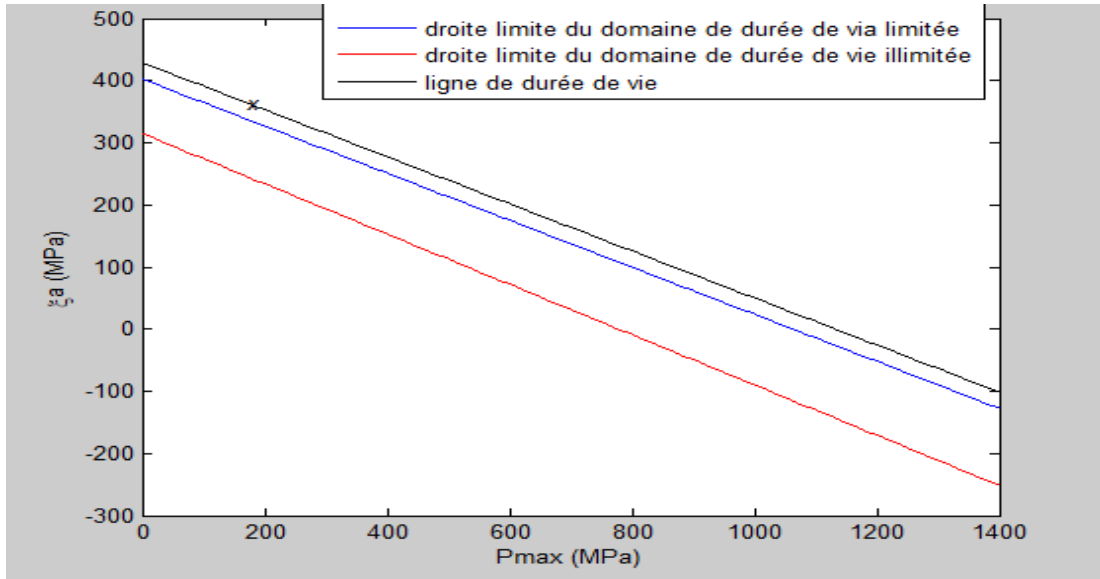


Figure III.23 Diagramme de crossland(avant traitement superficiele).

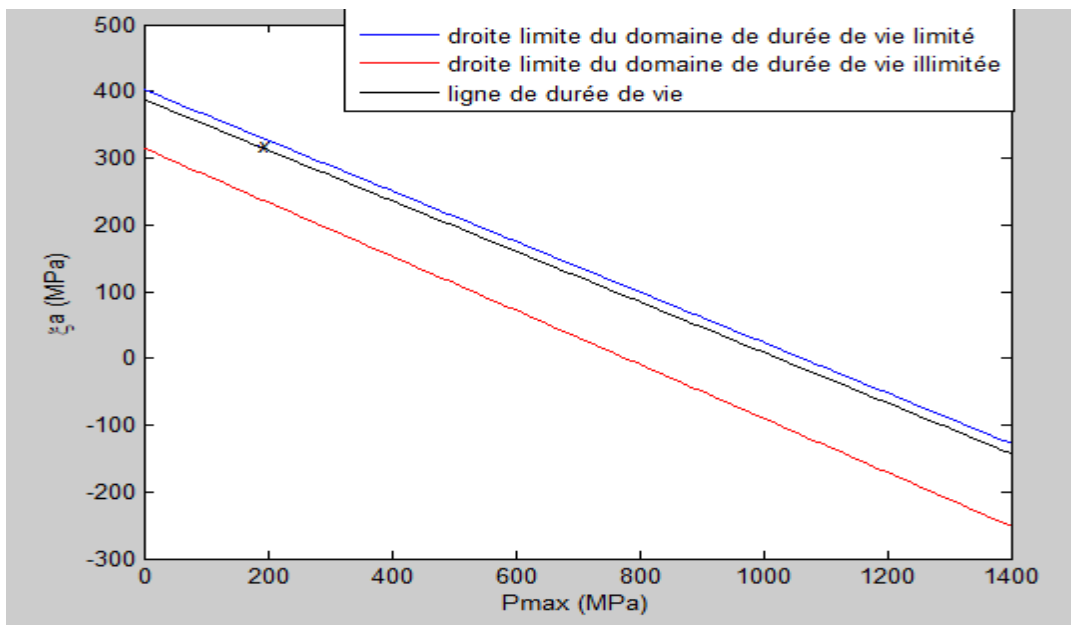
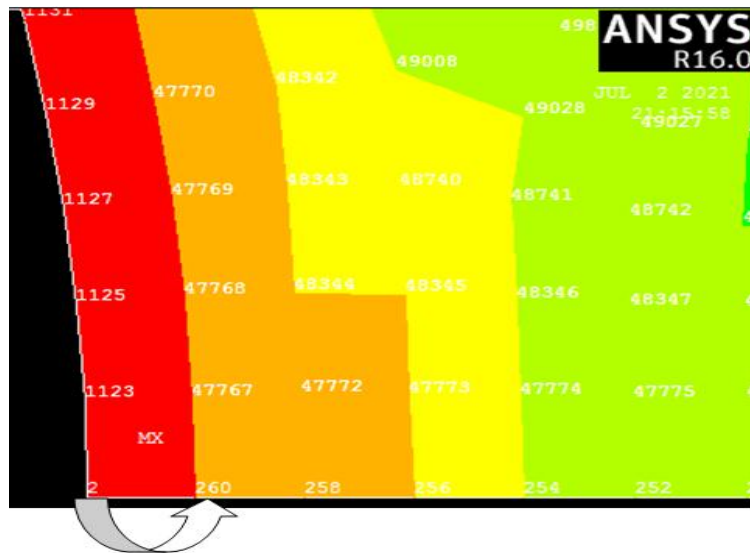


Figure III.24 Diagramme de crossland (après le traitement superficiele).



**Figure III.25 Position de nœud critique 260.**

**Résultat et Discussion :**

A partir des résultats obtenus, l'évolution de  $\xi_a$  peut être établie en fonction de P maximum. afin de Pour déterminer la durée de vie de la structure, nous appliquons le critère de Crossland aux deux états avec et sans traitement.

Nous voyons que la durée de vie après traitement est amélioré gras au le grenailage, mais la différence entre la bille en acier et en céramique est très faible et ça n'influe pas sur la durée de vie.

**III.9 Conclusion :**

Cette recherche nous permet de souligner l'effet du traitement de surface sur La résistance à la fatigue de l'acier SM45C. Pour cela, nous avons comparé les durées de vie respectives des matériaux traités superficiellement et non traité.

### **Conclusion Générale et Perspectives**

L'objectif de cette étude et la mise en évidence l'effet des contraintes résiduelles engendrées par le traitement de surface, en l'occurrence le grenailage de précontrainte, sur la tenue en fatigue, des pièces mécaniques. Pour ce faire, nous avons pris de la bibliographie [14], le modèle de prédiction de la durée de vie des structures sollicitées en fatigue multiaxiale, en tenant en compte les caractéristiques cycliques et mécaniques du matériau et de la géométrie de la pièce étudiée. Le modèle est basé sur le critère de Crossland qui permet de convertir les charges multiaxiales en une charge équivalente. Les durées de vie obtenue par ce modèle dépendent des intensités des charges appliquées.

Le traitement de grenailage de précontrainte est étudié comme un exemple de traitement de surface. Nous avons appliqué ce traitement au niveau de la zone critique, et avons décomposé la zone affectée par les contraintes résiduelles, sous forme d'un profil, en couches superficielles. Nous avons appliqué des billes en acier et autres en céramique.

Les profils des contraintes résiduelles sont obtenus en fonction des paramètres de grenailage tel que le diamètre des billes, la flèche Almen et la vitesse de projection. Dans les deux cas nous avons observé une augmentation de la durée de vie, et par conséquent l'amélioration de la tenue en fatigue.

En perspectives, il sera intéressant de poursuivre cette recherche, qui pourra s'appuyer sur Les points suivants :

- Etablir des chargements en blocs, en introduisant une loi de cumul pour évaluer le cumul de dommage.
- Etudier un autre acier en appliquant le modèle de calcul de durée de vie, avant et après grenailage.



## **BIBLIOGRAPHIE**

---

- [1] Y. HICHEM, «Etude expérimentale sur la Fatigue des Matériaux en Flexion Rotative,» 2013/2014.
- [2] M. R. d. M. Pinho, «Modélisation de l'endurance en fatigue sous chargement complexe, statique et vibratoire,» Paris-Saclay, soutenue le 20 décembre 2019 Thèse de doctorat.
- [3] GEURGUIT et LAMINE, «SIMULATION DE LA FATIGUE DES MATÉRIAUX PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENT FINIS,» 2017 / 2018.
- [4] A. Zalt, «Endommagement par fatigue et prédiction de la durée de vie des structures soudées de type caisson,» 2018.
- [5] «help.solidworks.com,» 2017. [En ligne]. Available: <https://help.solidworks.com>.
- [6] «www.mecastyle.com,» [En ligne]. Available: [www.mecastyle.com/calcul-de-structure-fatigue-courbe-de-wohler](http://www.mecastyle.com/calcul-de-structure-fatigue-courbe-de-wohler).
- [7] B. SALAH-EDDINE, «PREVISION DE LA DUREE DE VIE DES STRUCTURES SOLLICITEES EN FATIGUE MULTIAXIALE,» mostaganem, 2009;Soutenue le 07/07/2009 pour Diplôme de Magister.
- [8] B. SALAH-EDDINE, «ENDOMMAGEMENT EN FATIGUE MULTIAXIALE DES PIECES TRAITÉES SUPERFICIELLEMENT,» mostaganem, 2016,Soutenue le 11/12/2016 these doctorat.
- [9] D. Pigneaux, «Effet d'entaille en fatigue dans les joints soudés en aciers,» 2002.
- [10] V. BLANCHOT, «CALCUL DES SOUDURES EN FATIGUE,» 25 mars 2011 *CALCUL DES SOUDURES EN FATIGUEEN FATIGUE*, pp. 1-50 et 51-62, 25 03 2011.
- [11] B. MOHAMED, «OPTIMISATION DES PARAMÈTRES DES TRAITEMENTSMÉCANIQUES DE SURFACE EN VUE D'UNE DURÉE DE VIEDONNEE EN FATIGUE,» Mostaganem, 2020;these doctorat;Soutenue le 28 Juin 2020.
- [12] P. RENAUD, «MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU GRENAILLAGE DES PIÈCES INITIALEMENT CÉMENTÉES OU CARBONITRURÉES,» paris, 2011, soutenue le 17 juin 2011 THESE DE DOCTORAT.
- [13] B. KOUALEF et . B. S. BENAMAR , «Traitement de surface shotpeening sur différents types

## ***BIBLIOGRAPHIE***

---

d'aciers :simulation numérique,» Ain-Temouchent, 2018/2019, these de master.

[14] ABD ELHG LARBAOU et LADJAL HANDA, «ETUDE DE L'EFFET DU DEFATS DE FORME SUR LA TENUE EN FATIGUE DES PIECES MECANIQUE,» mostaganem, 2020; soutenu le 25/06/2020 ,these de master.

[15] P. RENAUD, «MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU GRENAILLAGE DES PIÈCES INITIALEMENT CÉMENTÉES OU CARBONITRURÉES,» PARIS, 2011.SOUTENUE LE 17 JUIN 2011 THESE DE DOCTORAT.

