



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

UNIVERSITE ECHAHID MOSTEFA BEN BOULAID BATNA 2  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE  
SPECIALITE : MECANIQUE

**Année Universitaire 2019/2020**

**OPTION : Génie des matériaux**

**Master I**

**MODULE : Fatigue des matériaux**

Enseignant : R. Manaa

**I.1- Définitions :**

On entend par fatigue ou endommagement par fatigue la modification des propriétés du matériau suite à l'application de cycles d'efforts, dont la répétition peut conduire à la rupture des pièces [3].

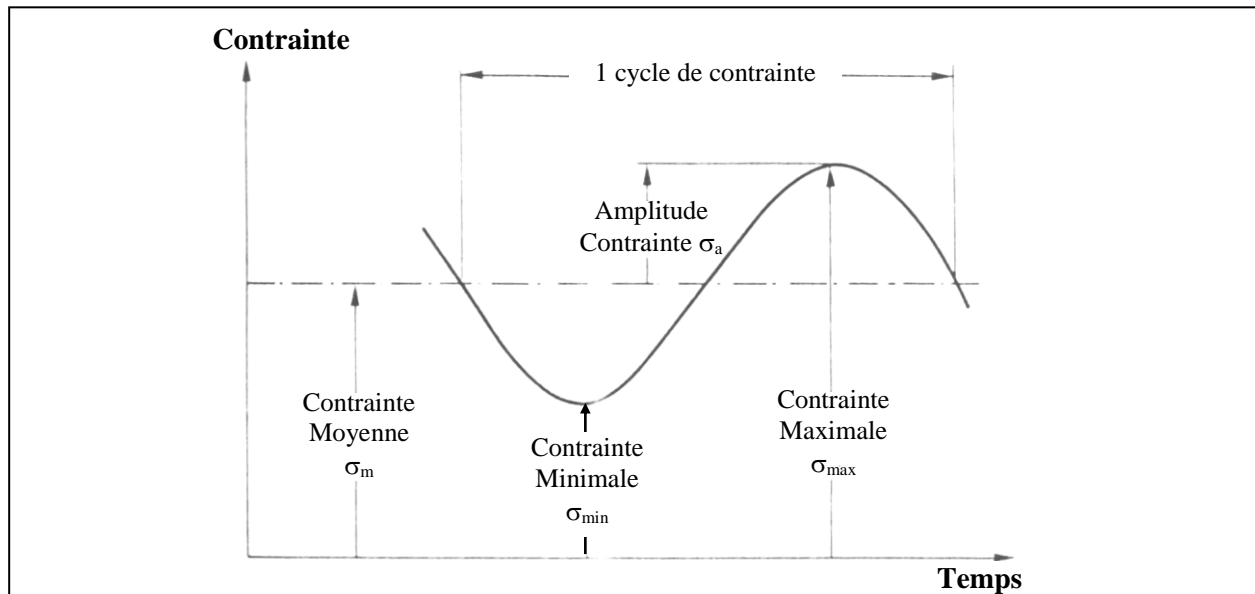
Les contraintes seront définies par l'amplitude maximale atteinte au cours d'un cycle et  $\sigma$  par la valeur moyenne de la contrainte  $\sigma_m$ , et par le rapport de la contrainte minimale à la contrainte maximale :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.1)$$

On est parfois conduit à distinguer la composante alternative  $\sigma_a$  de la composante statique  $\sigma_m$ . Ainsi, selon des valeurs relatives de ces deux composantes on distingue les essais sous sollicitation :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (1.3)$$



**Figure (1.1)** – Exemple d'un cycle d'effort- temps

- Alternée symétrique :  $\sigma_m = 0$  ,  $R = -1$
- Alternée dissymétrique :  $0 < \sigma_m < \sigma_a$  ,  $-1 < R < 0$
- Répétée :  $\sigma_m = \sigma_a$  ,  $R=0$
- Ondulée :  $\sigma_m > \sigma_a$  ,  $0 < R < 1$

La durée de vie est généralement mesurée par le nombre de cycles à rupture **N**.

L'exécution de **n** cycles ( $n < N$ ) entraîne un certain endommagement de la pièce qu'il est important de définir car à titre préventif, il détermine sa vie résiduelle et donc peut indiquer s'il faut ou non remplacer la pièce pour éviter un accident [3].

On appelle endurance la capacité de résistance à la fatigue des pièces et des structures.

D'une façon générale, il y aura fatigue toutes les fois que l'on est en présence d'efforts variables dans le temps. Ce qui est bien particulier à la fatigue et qui en fait le danger, c'est que la rupture peut se produire pour des contraintes apparentes relativement faibles, souvent bien inférieures à la résistance à la rupture et même à la limite d'élasticité du métal. [3]

## I.2- Diagrammes représentatifs :

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

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

### I.2.1- Courbe de Wöhler:

(Courbe « S.N » dans les pays anglo-saxon (Sterss - Number of cycles)) :

Cette courbe représente la variation d'une des contraintes dynamiques précitées en fonction du nombre de cycles à rupture (reporté sur échelle logarithmique). [3]

Cette courbe partage le plan de coordonnées en trois domaines :

- 1- Domaine de la fatigue oligocyclique, ruptures surviennent après un petit nombre de cycle  $N \leq 10^5$  cycles.
- 2- Domaine d'endurance limitée ( $N > 10^5$  cycles) les ruptures surviennent systématiquement après un nombre de cycles croissants avec la décroissance des contraintes.
- 3- Domaine d'endurance illimitée où les ruptures ne se produisent pas avant un nombre de cycles supérieur à la durée de vie envisagée de la pièce.

Entre les deux derniers domaines la courbe de *Wöhler* présente un coude plus ou moins prononcé compris entre  $10^6$  et  $10^7$  cycles.

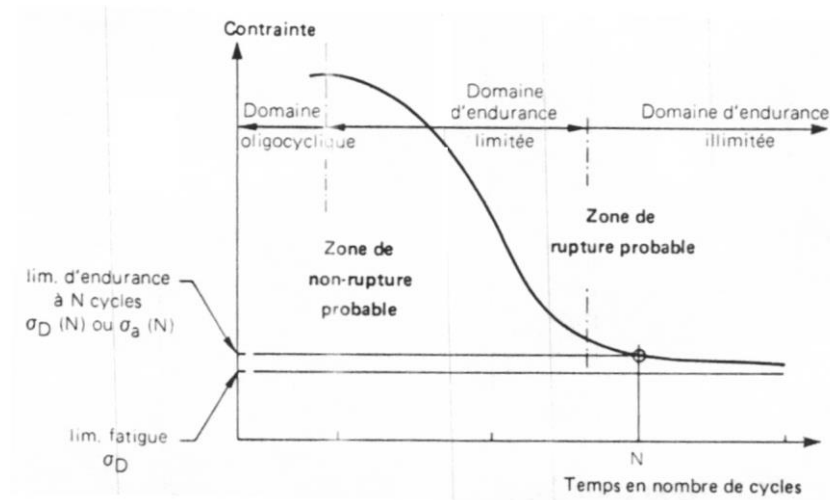


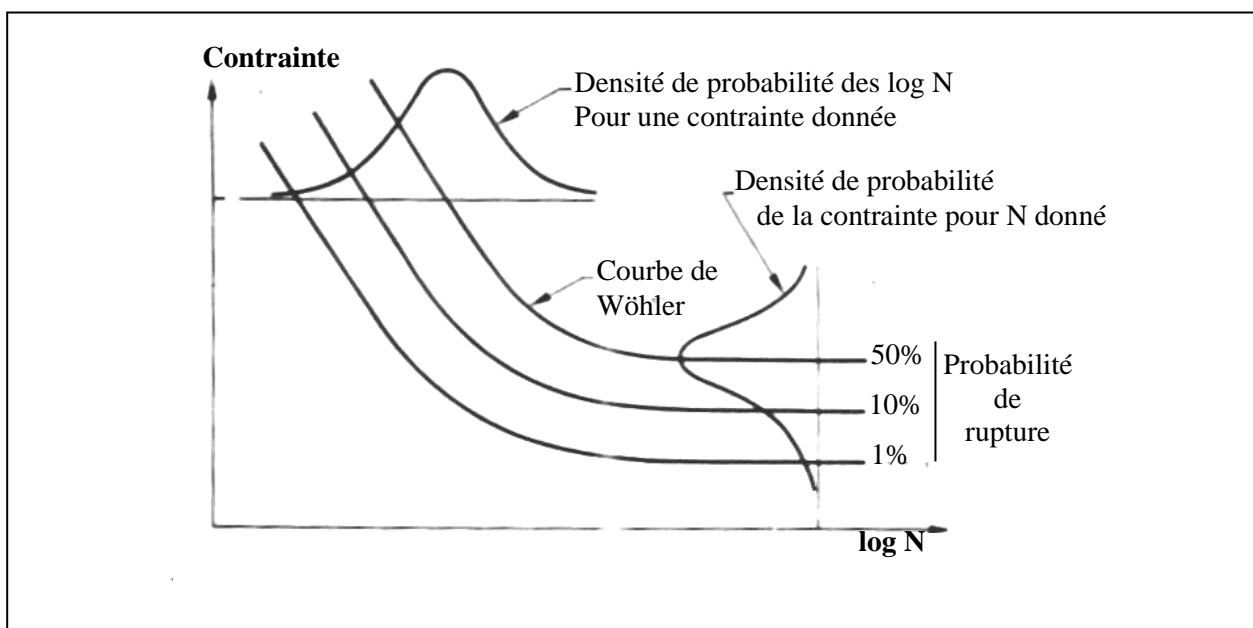
Figure (1-2) – Allure de la courbe de Wöhler

### I.2.2- Courbes d'équiprobabilité de rupture :

(Courbes (P.S.N) dans les pays anglo-saxon)

La courbe de *Wöhler* dont nous venons de parler étant une courbe moyenne, son utilisation peut s'avérer délicate du fait que les valeurs relevées indiquent seulement que la pièce a « autant de chances de se rompre que de ne pas se rompre ».

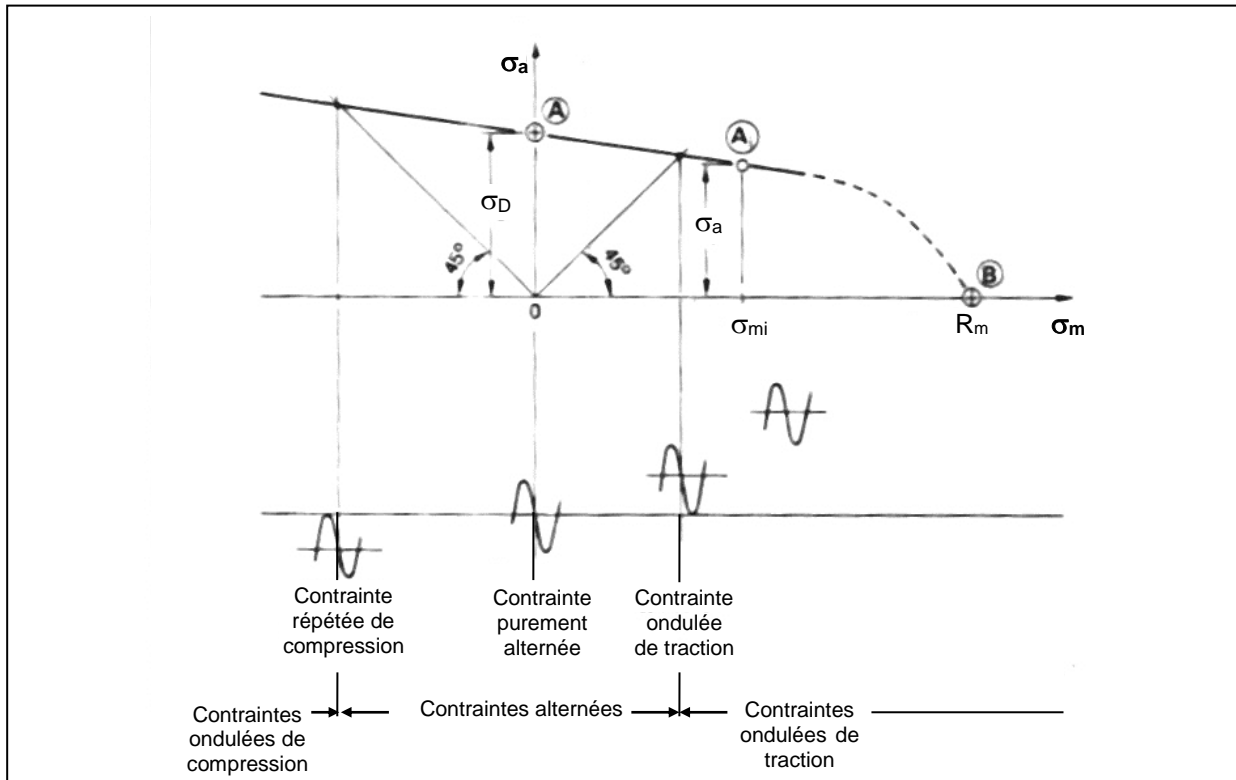
Les courbes d'équiprobabilité de rupture, dont la courbe de *Wöhler* constitue un cas particulier ( $p=50\%$  de rupture) sont alors tracées en sous trayant à la valeur moyenne une certaine valeur fonction de la probabilité de rupture recherchée.



**Figure (1-3) – Courbes d'équiprobabilité de rupture (résultats théoriques)**

### I.2.3- Diagramme de Haigh :

Ce diagramme représente la variation de l'amplitude de la contrainte  $\sigma_a$  en fonction de la contrainte moyenne  $\sigma_m$ , pour un nombre de cycles à rupture [3].



**Figure (1-4) – Diagramme de Haigh (résultats théoriques)**

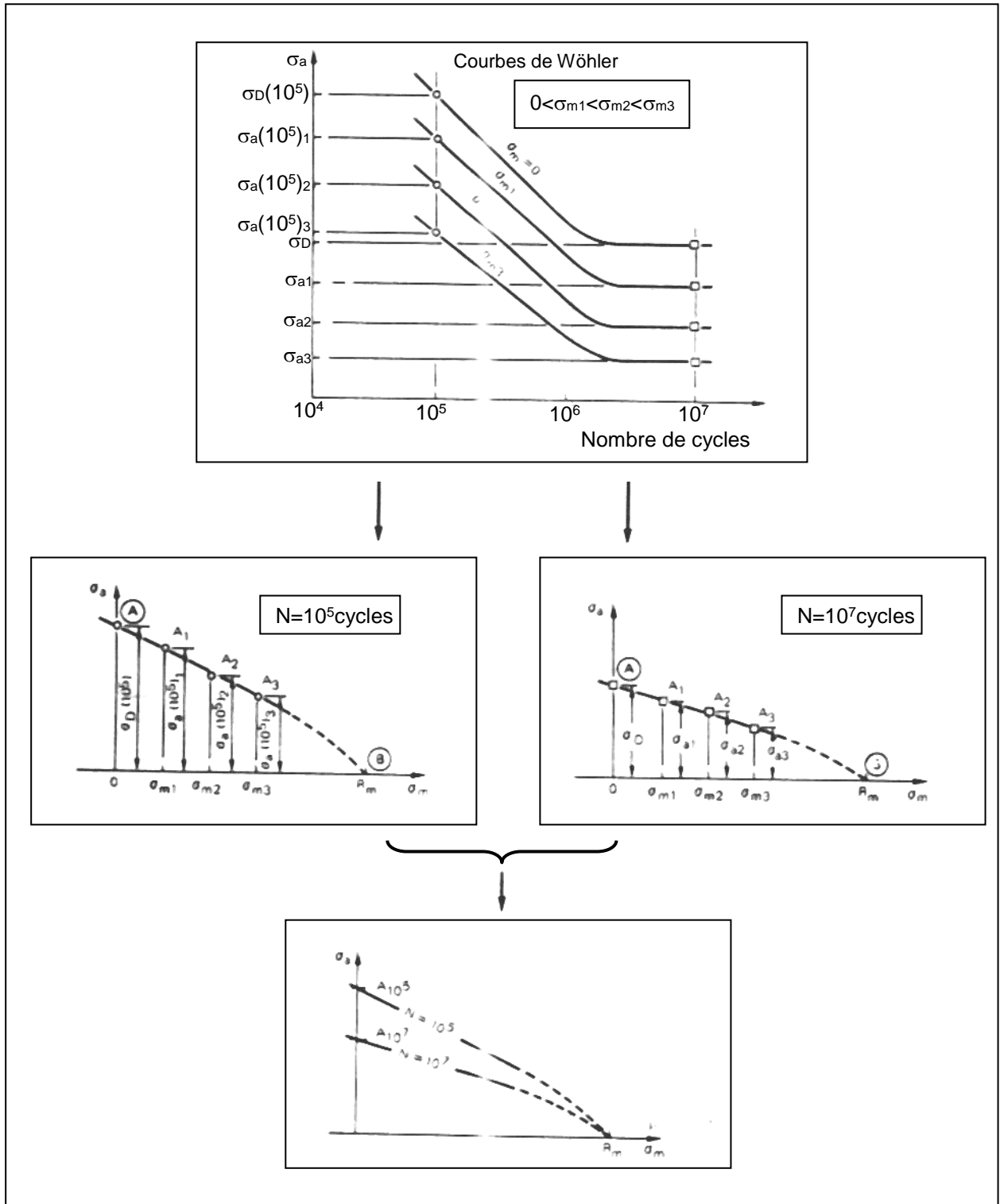


Figure (1-5) – Diagramme de Haigh

### I.2.4- Diagramme de *Goodman* :

Ce diagramme représente la variation des contraintes maximales  $\sigma_{\max}$  et minimales  $\sigma_{\min}$  en fonction de la contrainte moyenne figure (1.6)[3].

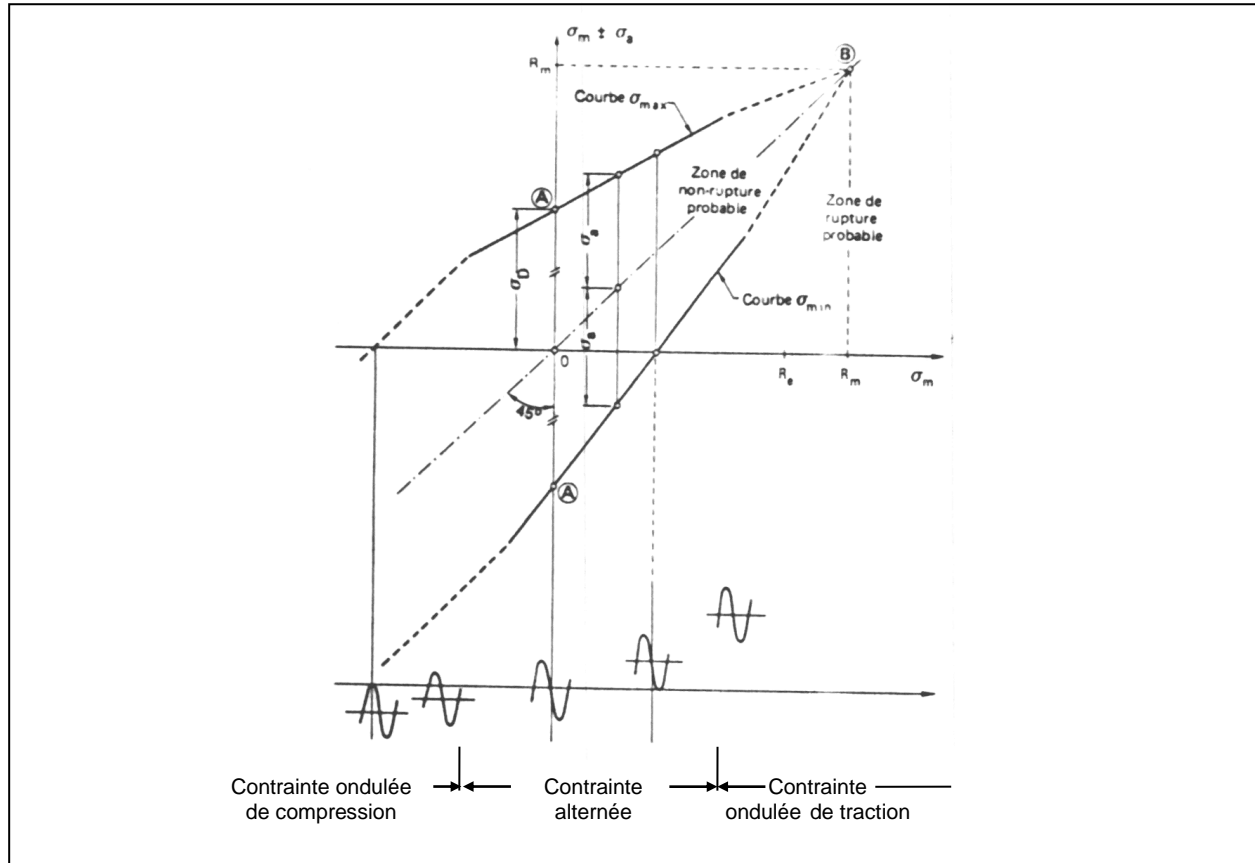


Figure (1-6) – Diagramme de Goodman

### I.2.5- Diagramme de *Rôts* :

Essentiellement utilisé dans les pays anglo-saxon ce diagramme représente la variation de la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  en fonction de la contrainte minimale  $\sigma_{\min}$  figure (1.7).





### I.3- Représentation mathématique de la courbe de Wöhler :

*D. Dengel* [46], en abordant les représentations mathématiques des courbes S-N. Il considère que la courbe de *Wöhler* est la plus ancienne :

$$\log(N) = a - b.S \quad (1.4)$$

Où **N** est le nombre de cycles à rupture, **S** l'amplitude de la contrainte appliquée, **a** et **b** des constantes.

- En 1910, *Basquin* a proposé : [3]

$$\log(N) = a - b.\log(S) \quad (1.5)$$

que l'on peut aussi écrire :  $S = (A/N)^c$

en pose  $A = e^a$  et  $c = 1/b$ .

- Dès 1914, *Stromeyer* [51], pour prendre en compte l'asymptote horizontale, introduit l'équation suivante :

$$\log(N) = a - b.\log(S - E_1) \quad (1.6)$$

Cette équation est plus réaliste que celle de *Wöhler* et *Basquin*.

En posant  $A = e^a$  et  $C = 1/b$  l'équation de *Stromeyer* peut encore s'écrire :

$$S = E_1 + \left(\frac{A}{N}\right)^c \quad (1.7)$$

- En 1924, *Palmgreen* [3] propose :

$$S = E_1 + \left(\frac{A}{N+B}\right)^c \quad (1.8)$$

- En 1955, *Corson* [47] introduit, malgré des bases expérimentales réduites, l'équation :

$$N = \frac{A}{(S - E_1)^d} \quad (1.9)$$

où **A**, **E<sub>1</sub>** et **d** sont des constantes.

En posant  $c = \log(d)$ , on obtient :

$$N = \frac{A \cdot e^{-c(S-E_1)}}{(S-E_1)} \quad (1.10)$$

- *Weibull* [3] propose:

$$\log(N+B) = a - b \cdot \log\left(\frac{S-E_1}{R_m - E_1}\right) \quad (1.11)$$

Où **a**, **b**, **B** et **E<sub>1</sub>** sont des constantes.

#### I.4- Relation entre l'endurance et les caractéristiques mécaniques (cas des aciers) :

De nombreuses formules ont été proposées [48] :

- *Mailander* :  $\sigma_D = (0,49 \pm 20\%) \cdot R_m$  (1.12)

$$\sigma_D = (0,65 \pm 30\%) \cdot \sigma_e \quad (1.13)$$

- *Strinbeck* :  $\sigma_D = (0,285 \pm 20\%) \cdot (R_m + \sigma_e)$  (1.14)

- *Rogers* :  $\sigma_D = 0,4 \cdot \sigma_e + 0,25 \cdot R_m$  (1.15)

- *Houdremont et Mailander* :  $\sigma_D = 0,25(\sigma_e + R_m) + 50$  (1.16)

- *Junger* :  $\sigma_D = 0,2(\sigma_e + R_m + Z)$  (1.17)

- *Lequis, Buchholtz et Schulz* :  $\sigma_D = 0,175(R_m + \sigma_e - A\% + 100)$  (1.18)

- *Fry, Kessner et Ottel* :  $\sigma_D = \alpha \cdot R_m + \beta \cdot \sigma_e$  (1.19)

Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  ne sont pas constants,  $\alpha$  est proportionnel à **R<sub>m</sub>** tandis que,  $\beta$  est inversement proportionnel à **R<sub>m</sub>**.

- *Heywood* :  $\sigma_D = \frac{R_m}{2}$  (1.20)

$$\sigma_D = 150 + 0,43 \cdot \sigma_e \quad (1.21)$$

- *Brand* :  $\sigma_D = 0,32 \cdot R_m + 121$  (1.22)

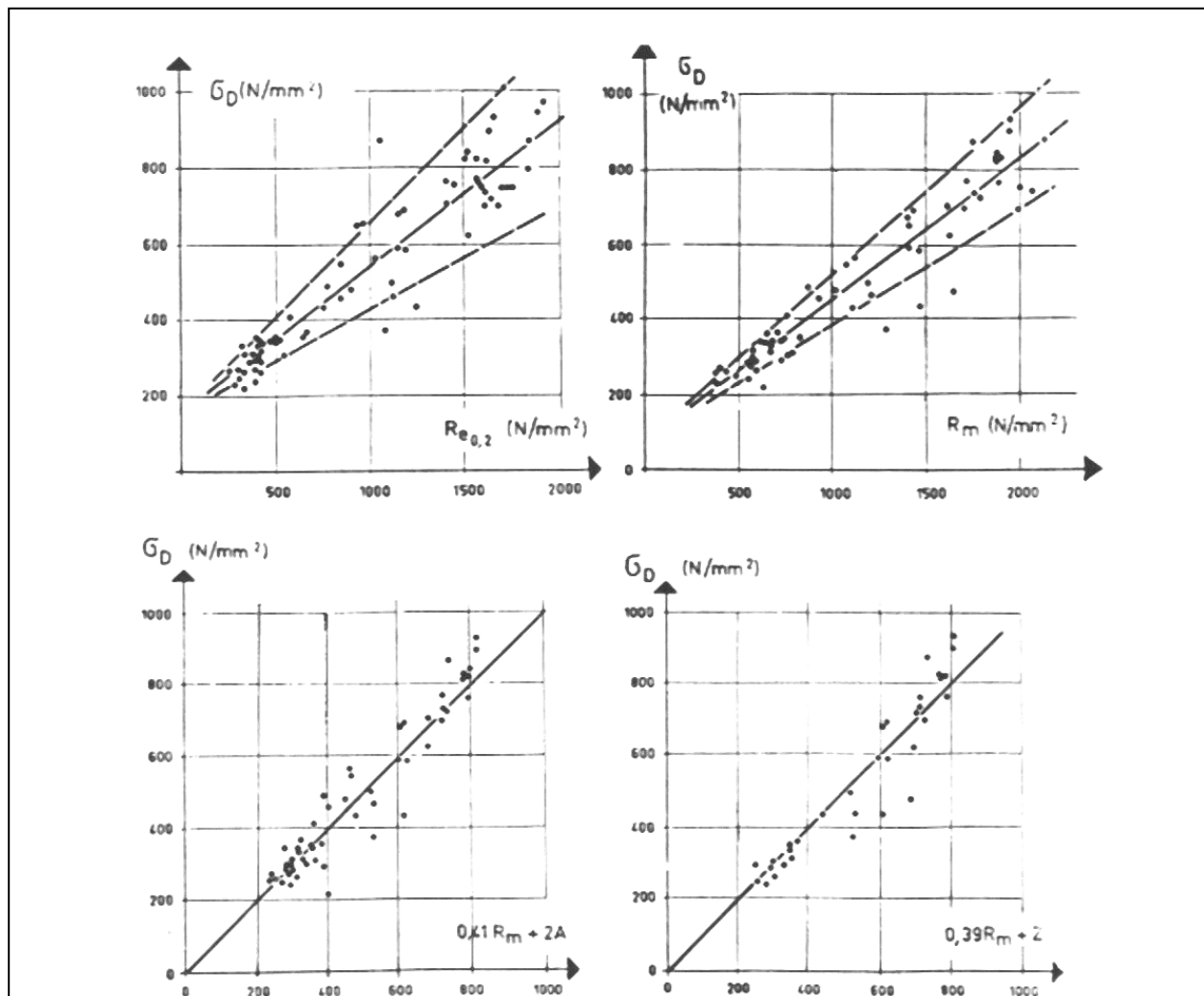


Figure (1.9) – Relation entre la limite d'endurance et les caractéristiques de traction (cas des aciers)[3].

### I.5- Phase de propagation d'une fissure en fatigue :

L'évolution d'une fissure de fatigue peut être divisée en trois phases [4] :

#### I.5.1- L'initiation (ou amorçage) de la fissure : (phase A dans la figure 1.10 )

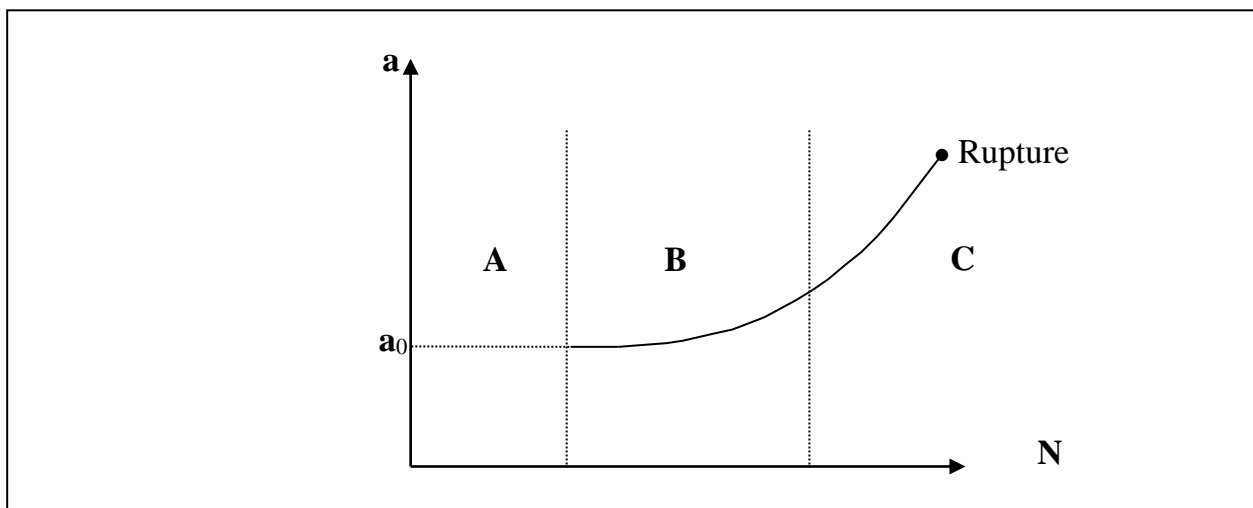
Est l'influencée principalement par la différence de contraintes  $\Delta\sigma$ , par le facteur de concentration des contraintes (facteur « normalisant » la géométrie du détail), par la microstructure du matériau, par la contrainte moyenne et par l'environnement, on admet que la phase d'initiation est terminée lorsque la fissure atteint une certaine dimension , souvent prise entre 0,1 mm et 0,25 mm. Pendant longtemps la dimension observable de la fissure minimale a été de 0,1mm.

**I.5.2- La propagation stable :** (*phase B dans la figure 1.10*)

Elle est influencée principalement par la différence de contraintes  $\Delta\sigma$ , par la géométrie du détail (pointe de la fissure), et par la géométrie de la fissure. Alors que la microstructure du matériau la contrainte moyenne et l'environnement ont une influence moindre.

**I.5.3- La propagation rapide :** (*phase C dans la figure 1.10*)

Qui conduit à la rupture de l'élément. Le nombre de cycles est ici très faible et la propagation très rapide. Mentionnons encore que la rupture fragile peut intervenir à n'importe quel moment, alors qu'une rupture ductile a lieu après la phase de propagation rapide. Ce qui ne peut pas être décrite par la mécanique de la rupture linéaire élastique traditionnelle.



**Figure (1.10)** – Représentation schématique de la propagation d'une fissure [4].

**I.6- Approches globales ou locales pour décrire la résistance à la fatigue :**

Les approches globales d'évaluation de la tenue en service dérivent directement des efforts et des moments externes appliqués à un composant et se traduisent en particulier par la détermination de la contrainte moyenne nominale dans la section critique, en supposant une distribution constante ou variable linéairement. Elles conviennent particulièrement bien pour rendre compte de phénomènes globaux tels que la plastification complète ou la rupture du composant.

Les approches locales sont basées sur des paramètres locaux en contrainte ou en déformation [5].

### **I.7- Facteurs de l'endurance des pièces :**

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

- D'une part, l'endommagement progressif du métal par suite de l'existence des concentrations des contraintes, qui entraîne des déformations plastiques.
- D'autre part, l'adaptation, c'est à dire la modification du régime des contraintes internes par relaxation consécutive à la déformation plastique localisée.
- Les facteurs qui agissent sur la fatigue sont très nombreux et on peut les classer en quatre catégories : [3]

#### **I.7.1- Facteurs métallurgiques :**

On peut classer dans cette catégorie tous les facteurs liés à la nature du métal qui constitue la pièce (composition chimique et structure cristallographique), à son élaboration et à sa mise en forme (inclusions, défauts...), ainsi qu'aux traitements thermiques (structure métallographique et caractéristiques mécaniques) subis par la pièces.

#### **I.7.2- Facteurs géométriques :**

L'influence de ces facteurs intervient par la dimension des pièces (effet d'échelle) et surtout par leurs formes (effet d'entaille et coefficient de concentration des contraintes).

#### **I.7.3- Facteurs de surfaces :**

Les fissures de fatigue prennent le plus souvent naissance dans les couches superficielles. Il convient donc, pour améliorer l'endurance des pièces, de relever dans la mesure du possible celle des couches superficielles, on peut y arriver en jouant soit sur la nature du métal, soit sur la résistance des couches superficielles par des traitements de durcissement et le développement de précontraintes [3].

**I.7.4- Facteurs de sollicitation :**

**-Nature des efforts** : Pour une même éprouvette, essayée sous une même amplitude de la contrainte périodique, à la même fréquence et à la même température, les gradients de contraintes à travers la section la plus chargée seront différents selon la nature des efforts appliqués. Pour des efforts axiaux, traction ou compression les contraintes sont uniformes dans la section, tandis qu'en flexion ou en torsion elle sont maximales en surface et nulles au centre, sur la fibre neutre [49].

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

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

**- Contraintes résiduelles** : les contraintes résiduelles peuvent aggraver dangereusement les valeurs des contraintes, inversement des précontraintes de compression permettent d'augmenter le taux de travail admissible.

Les contraintes résiduelles ne peuvent être déterminées de façon directe, elles sont toujours à déduire grâce à la mesure des quantités physiques ou mécaniques distinctes qu'elles produisent. Et qui sont les suivantes [3] :

- Les déformations macroscopiques qui se relâchent quand une partie du matériau est enlevé de la partie soumise aux contraintes résiduelles.
- La distribution des déformations résiduelles homogène dans le réseau cristallographique. C'est la base des méthodes des diffraction de rayon X.
- La vitesse de propagation des ondes ultrasonores qui sont influencées par les contraintes résiduelles.
- Les caractéristiques magnétiques du matériau.

- **Influence de la fréquence** : Dans le cas des contraintes périodiques, on voit apparaître alors un cycle d'hystérésis de la déformation en fonction de la contrainte dont l'inclinaison varie avec la fréquence des cycles. Si cette fréquence augmente, la déformation plastique maximale atteinte pour une même amplitude de la contrainte diminue et, par suite, l'endurance se trouve augmentée, tout au moins tant que cette augmentation de fréquence n'entraîne par un échauffement de l'éprouvette. Inversement, si la fréquence diminue, il en sera de même de l'endurance, principalement à cause de l'effet d'environnement.

#### **I.7.5- Facteur de l'environnement :**

- **Influence de la température** : La limite d'élastique et la résistance à la traction diminuant lorsque la température s'élève, il en sera de même de la limite d'endurance[50].

- **Fatigue sous corrosion** : On rencontre très fréquemment la fatigue-corrosion sur des pièces travaillant dans des conditions assez peu agressives en apparence, à titre d'exemple, les eaux saumâtres ou salées, les divers milieux acides [3].

#### **I.8- Faciès caractéristiques des ruptures par fatigue :**

L'examen attentif de toute rupture de pièces est une opération d'une grande importance dans le développement d'un produit. Pour l'observateur averti, de lui montrer les causes de rupture, donc envisager les remèdes à appliquer pour que cet état de fait soit supprimé [6].

##### **I.8.1- Faciès de fatigue à l'examen optique :**

Sur la section de la rupture, on observe à l'œil et à la loupe un nombre de caractéristiques (figure (1.11)) :

- Présence de deux zones distinctes d'importance variable selon l'amplitude des contraintes et la nature du matériau :
  - 1- La rupture brutale avec faciès à grains ou à nerfs.
  - 2- La fissure de surface avec une surface lisse.

- L'examen permet de déterminer aussi la nature des sollicitations (Tableau (1.1)).

### **I.8.2- Faciès de fatigue à l'examen microscopique :**

Le microscope électronique à balayage (**MEB**) présente l'avantage de permettre un examen direct avec une gamme large et continue de grossissements et sous des orientations qui peuvent varier dans de larges limites, l'observation est complètement différente de celle observée optiquement :

#### **- Rupture Brutale (finale) :**

**a- Fragile** : montre les clivages trans-granulaires lisses avec réamorçages par rivières lors des passages des joints de grains ou des clivages à languettes suivant des plans cristallographiques proches à forte densité, le sens de propagation de la rupture est indiqué par le sens des rivières.

**b- Ductile** : Montre des cupules (creux amorcés sur des précipitations) les deux faces de la rupture présentant ces cupules qui se produisent après une déformation plastique importante, lorsque les cupules ne sont pas équiaxes (ce qui généralement le cas sauf en traction pure), le sens de propagation est donné par le grand axe des cupules (figure (1.12)).



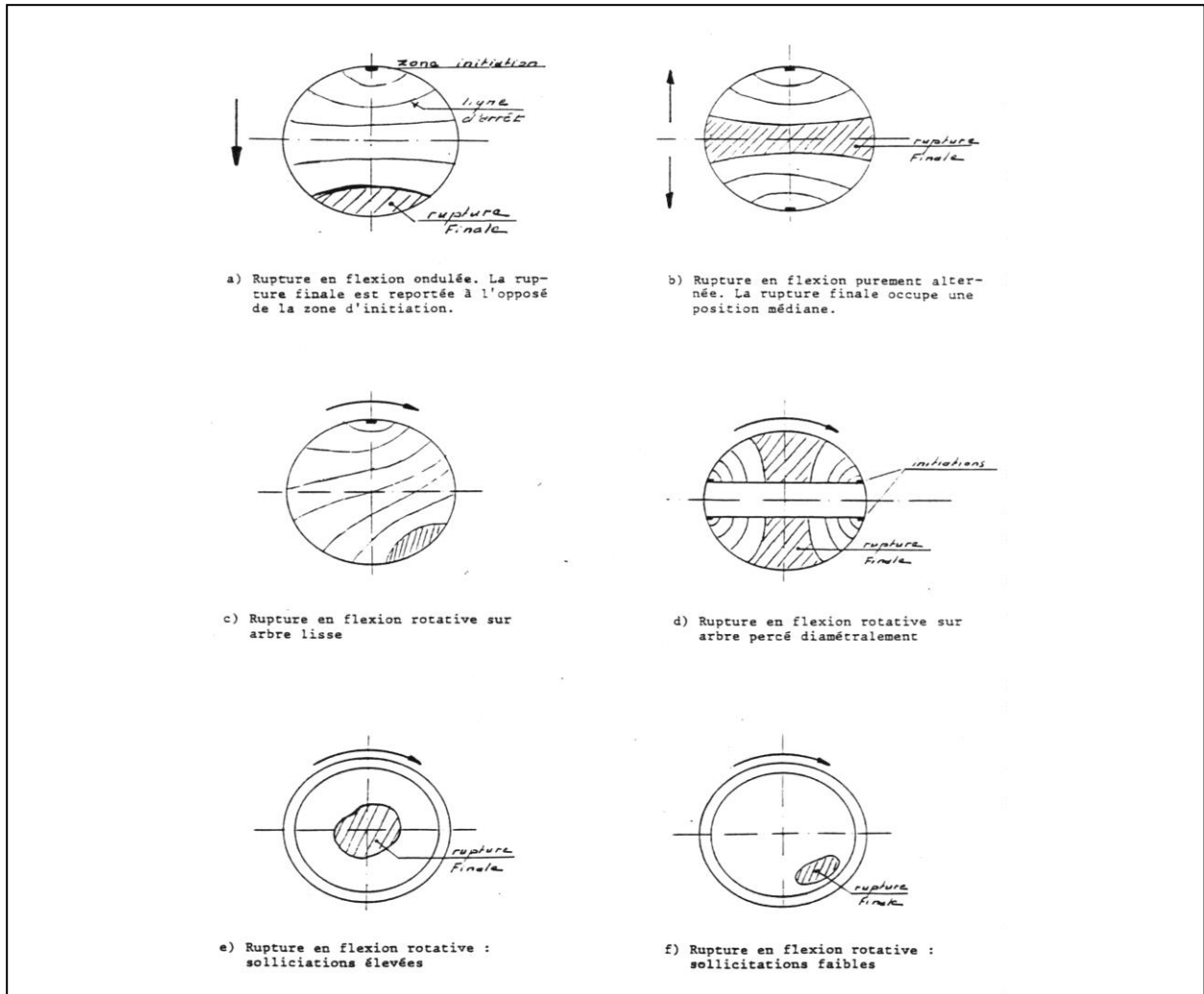


Figure (1.11) – Faciès de fatigue[6].

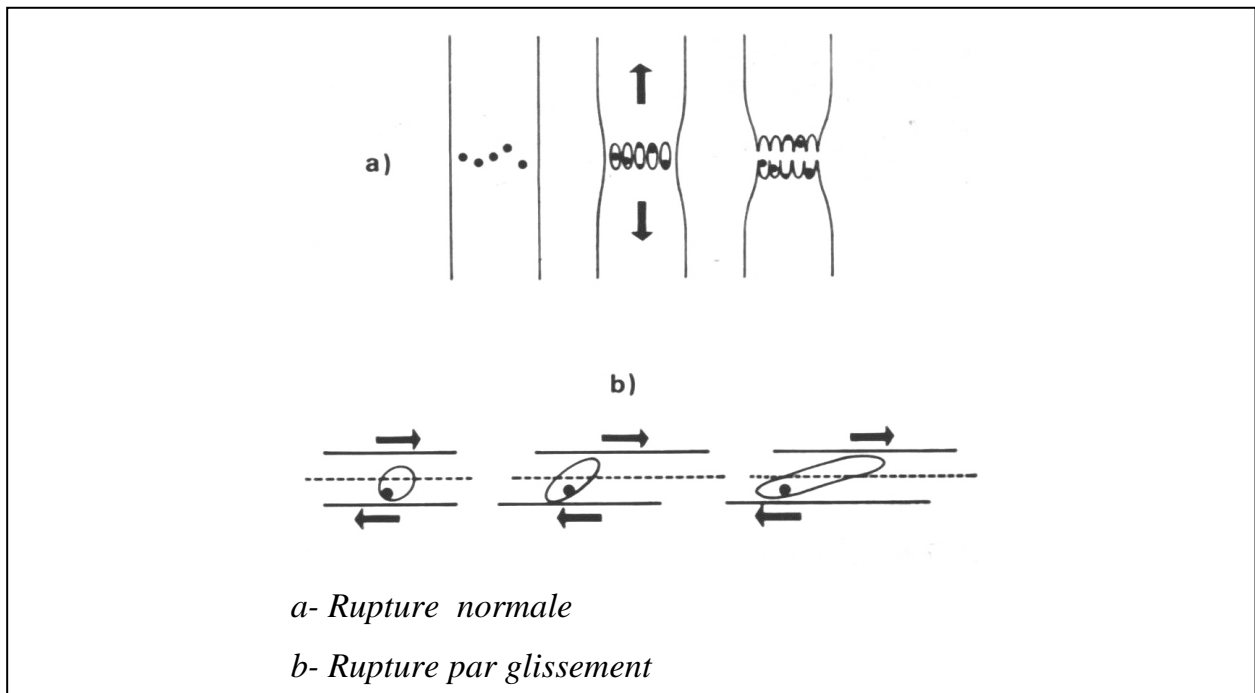


Figure (1.12) – Schéma de la formation des cupules[7].

Type de sollicitations	Contraintes nom. élevées			Contraintes nom. faibles		
	Concentration de contraintes					
	nulle	faible	élevée	nulle	faible	élevée
Traction-traction ou Traction-compression						
Flexion plane ondulée						
Flexion plane alternée						
Flexion rotative						
Torsion						

Tableau (1.1) – Faciès de rupture en fatigue[6].