

# Chapitre 5

## Description générale de l'analyse à la fatigue

Afin de suivre notre approche "intelligente", nous avons besoin de décrire chaque cas/problème initialement défini par sa représentation primitive (qui ne permet pas d'utiliser les résultats, obtenus à partir d'un cas, à un autre nouveau cas/problème) par une description intelligente. Il va falloir ensuite obtenir les règles à retenir sur ces nouveaux descripteurs à partir de certaines données expérimentales.

### 5.1 Description intelligente d'une analyse à la fatigue

Chaque cas/problème de fatigue peut comporter des différences au niveau de la géométrie de la structure, de ses nombreux matériaux en présence, de son état initial, et de son bloc de chargement (qui est le plus souvent multiaxial aléatoire). Cette représentation primitive dite passive doit être transformée en une représentation active/intelligente capable d'être appliquée à tout nouveau cas.

Dans notre problème, pour chaque cas, les descripteurs de sortie ou conclusions sont :

- i) fissure ou non fissure et,
- ii) si il y a fissure, quel est le nombre de blocs du chargement à appliquer ?

Nous proposons de suivre une analyse multi-niveaux, pour représenter de façon "intelligente" le comportement d'une structure générale. Par exemple, dans le cas d'une structure navale :

- 1) le premier niveau est celui de la structure. Une analyse élastique est conduite en considérant les nombreux chargements et un maillage grossier de la coque. Il n'est pas nécessaire dans cette étape de modéliser finement les cordons de soudures, les formes des détails soudés, les congés... Des simplifications de formes et un maillage plus fin au niveau des discontinuités géométriques suffisent.

2) le deuxième niveau est celui d'une sous-structure 3D que l'on aura relevée comme critique. Un maillage plus fin et une modélisation plus correcte des détails soudés et des discontinuités géométriques présents dans ce domaine peuvent être effectués. Des analyses élastiques ou élastoplastiques (par les méthodes directes/incrémentales ou par la méthode simplifiée) en considérant l'état initial de la structure et le chargement réel peuvent être conduites. A ce niveau, le chargement cyclique radial équivalent est caractérisé.

3) le troisième niveau correspond à celui d'un détail élémentaire 2D (obtenu après une coupe de la sous-structure par un plan) avec un éventuel maillage encore plus fin. Les formes des différentes zones peuvent correspondre dans le cas de structures soudées au matériau de base, au métal d'apport et à la zone affectée thermiquement. Les formes des cordons de soudure peuvent être décrites de façon plus précise. A ce niveau, les analyses doivent être faites avec un maillage convenable et peuvent utiliser la technique du "submodelling", qui consiste à affiner la représentation du chargement et à récupérer les résultats du champ de déplacement sur le bord du maillage grossier pour les appliquer au nouveau maillage raffiné.

4) enfin, nous considérons sur ce détail 2D, une fenêtre 2D virtuelle mobile. Cette fenêtre joue le rôle d'un filtre. Sa taille est telle que les quantités qui sont utiles deviennent relativement peu sensibles aux erreurs associées à la taille et à la distribution des éléments, et que de plus, le dommage doit concerner un certain volume caractéristique ; *la description du matériau, de certains champs (contrainte, gradient de contrainte, critère de fatigue...), dans cette fenêtre conduit à la description intelligente qui est applicable et unique sur toute structure complexe.*

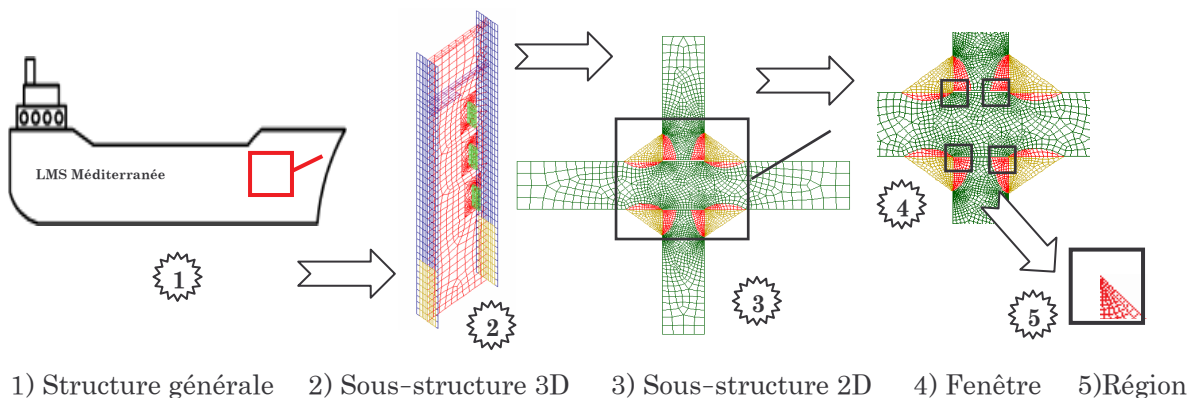


fig. 5.1 - Analyse multi-niveaux

Ces quantités champs que nous devons décrire sont les champs déduits du champ de contraintes et du gradient de ce champ de contraintes. Parmi elles, nous citons par exemple:

- les valeurs Maximum, Minimum et Moyenne du premier invariant  $I_1$  et du deuxième invariant  $J_2$ , le critère de Dang-Van... ;
- à l'intérieur de la fenêtre, les volumes où le critère de fatigue est violé par un facteur de 50%, 80% ou 100%.

Cette analyse multi-niveaux est applicable à la fois à l'éprouvette lisse, à l'éprouvette entaillée et surtout à toute structure complexe en général.

En effet, nous souhaitons utiliser les règles que nous aurons générées à partir de cas/problèmes connus à toute nouvelle structure faite de matériaux différents et soumise à des chargements quelconques.

## 5.2 Définition des descripteurs intelligents

Nous nous intéressons au comportement particulier d'une région  $\Omega$ , c'est à dire associée à un matériau à l'intérieur d'une fenêtre 2D de taille donnée. Dans cette partie, il s'agit de proposer une représentation "intelligente" de cette région.

Nous allons suivre les experts qui nous ont indiqué toutes les théories et caractéristiques à retenir dans l'analyse à la fatigue et les simulations numériques. Nous devons éviter une caractérisation en un point des différents champs caractéristiques compte tenu de la non maîtrise des erreurs liées au maillage et que de plus le dommage doit concerner un volume caractéristique. Nous devons donc décrire d'une manière "intelligente" dans chaque région  $\Omega$ :

i) les caractéristiques matériaux pendant des chargements cycliques, les courbes cycliques à différentes vitesses de déformations, les courbes de Wöhler et éventuellement les propriétés de rupture

ii) le champ de contraintes et son évolution

iii) quelques autres facteurs comme ceux indiqués par les experts en fatigue/rupture ou déduits à partir d'outils spécialisés comme ENDURE de EMRC ou SOLSTICE du LMS-X

Avec une telle description les conclusions sont :

- i) Fissure ou Non fissure
- ii) si Fissure, quelle est la durée de vie en fatigue ?

Il existe quelques méthodes classiques pour représenter les propriétés des matériaux avec quelques paramètres discrets ou descripteurs. La partie la plus difficile reste la représentation de l'évolution des champs de contraintes qui sont ici les contraintes initiales dues au soudage (mais inconnues dans cette étude), les

contraintes parasites inconnues initiales dues aux mors, et l'effort de traction appliqué qui est de nature aléatoire.

## 5.2.1 Descripteurs matériaux

Nous retenons seulement ces 11 coefficients dont 7 qui sont classiques en fatigue :

Module d'Young	$Y_G$
Coefficient de Poisson	$\nu$
Limite élastique en traction macroscopique	$\sigma_y$
Module d'érouissage en traction macroscopique	$H$
Coefficient d'érouissage cyclique	$n'$
Coefficient de résistance à la déformation cyclique	$K'$
Contrainte ultime	$\sigma_u$
Limite élastique cyclique	$\sigma'_y$
Coefficient de résistance à la fatigue	$\sigma_f'$
Exposant de Basquin	$b$
Exposant de ductilité en fatigue	$c$

## 5.2.2 Descripteurs champ de contrainte

### 5.2.2.1 Caractéristiques à décrire

Nous supposons que le champ de contraintes à un instant donné est représenté en tout point par 3 champs scalaires (le problème concernant la prédiction de la durée de vie en fatigue) :

- i) son premier invariant  $I_1$  :

$$I_1 = tr(\underline{\underline{\Sigma}})$$

- ii) le deuxième invariant de sa partie déviatorique  $J_2$  :

$$J_2 = \frac{1}{2} \underline{\underline{S}} : \underline{\underline{S}}$$

où  $\underline{\underline{S}} = dev(\underline{\underline{\Sigma}}) = \underline{\underline{\Sigma}} - \frac{1}{3} tr(\underline{\underline{\Sigma}}) \underline{\underline{1}}$

- iii) et la norme du gradient de  $J_2$  :

$$\|\text{grad } J_2\| = \sqrt{\left(\frac{\partial J_2(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial J_2(x,y)}{\partial y}\right)^2}$$

Ce choix est justifié par l'analyse des critères de fatigue (chapitre 1). Il présente de plus l'avantage de conduire à des temps de calculs que nous qualifierons de raisonnable dans le sens où il ne nécessite pas la recherche de plan critique.

### 5.2.2.2 Description intelligente de l'évolution temporelle des champs caractéristiques

Il est nécessaire de décrire l'évolution temporelle des champs associés au champ de contrainte. Le chargement à amplitude variable ayant été représenté par le chargement radial cyclique équivalent à l'échelle de la structure grâce à notre règle d'équivalence, nous représentons l'évolution du champ de contrainte aux 3 positions :

- i) à la contrainte moyenne du chargement appliqué ( $MOY_t$ )
- ii) au maximum du chargement appliqué ( $MAX_t$ )
- iii) au minimum du chargement appliqué ( $MIN_t$ )

### 5.2.2.3 Description intelligente des champs caractéristiques

Notre objectif reste la description d'un cas général d'analyse à la fatigue à l'intérieur d'une région  $\Omega$  définie pour un **matériau donné** dans une **fenêtre 2D de taille donnée**. L'introduction de ce fenêtrage a été expliquée plus haut.

La solution locale du champ de contrainte dépend assez fortement du maillage. Nous supposons qu'un maillage convenable dans les zones à risque est réalisé. Une bonne représentation des caractéristiques associées au champ de contrainte doit permettre de prendre en compte ou de réduire les erreurs liées au maillage. Ici, une représentation simpliste est utilisée pour caractériser à chaque instant, un champ scalaire  $\underline{M}$  pouvant être entaché d'erreurs (J. M. Hablot, 1990) : ce que nous pensons convenable mais pour lequel nous ne savons pas cependant le niveau d'erreur.

Si  $M$  désigne l'un des 3 champs scalaires  $I_1$ ,  $J_2$  ou  $\|\text{grad } J_2\|$ , sa description à chaque instant ( $MOY_t$ ,  $MAX_t$ ,  $MIN_t$ ) dans la région  $\Omega$  est d'abord faite par l'introduction de 3 quantités :

- i) la valeur moyenne de  $M$  dans  $\Omega$  :  $(M_{moy})_{\Omega}$
- ii) le maximum de  $M$  dans  $\Omega$  :  $(M_{max})_{\Omega}$
- iii) le minimum de  $M$  dans  $\Omega$  :  $(M_{min})_{\Omega}$

Nous utilisons ensuite d'autres descripteurs pour caractériser le champ scalaire  $M$  variant entre  $M_{min}$  et  $M_{max}$ . Il s'agit de descripteurs surfaciques qui vont donner des indications sur la répartition du champ  $\underline{M}$  dans la région  $\Omega$ .

Ils sont notés  $M_{lay1}$ ,  $M_{lay2}, \dots, M_{layn}$  et sont définis de la manière suivante :

- i) On divise l'intervalle  $[M_{min} ; M_{max}]$  en  $n$  segments

ii) Puis on calcule la proportion relative de surface dans la région pour qui le scalaire  $M$  appartient à l'intervalle  $n$ , ( $M_{layn} = S_n / S_0$ ), où  $S_0$  est la surface de la région actuelle.

Dans cette étude, nous avons choisi cinq intervalles ( $n = 5$ ). Ces quantités peuvent être considérées comme des statistiques élémentaires du champ  $M$  dans la région  $\Omega$ .

Au total, 72 descripteurs sont donc introduits pour représenter l'évolution du champ de contrainte à l'intérieur de la région  $\Omega$ , dont:

- 27 descripteurs pour les valeurs min, max, moy.

$MOY_t(I1_{moy})_\Omega$	$MOY_t(I1_{max})_\Omega$	$MOY_t(I1_{min})_\Omega$
$MOY_t(J2_{moy})_\Omega$	$MOY_t(J2_{max})_\Omega$	$MOY_t(J2_{min})_\Omega$
$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{moy})_\Omega$	$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{max})_\Omega$	$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{min})_\Omega$
$MAX_t(J2_{moy})_\Omega$	$MAX_t(J2_{max})_\Omega$	$MAX_t(J2_{min})_\Omega$
$MAX_t(I1_{moy})_\Omega$	$MAX_t(I1_{max})_\Omega$	$MAX_t(I1_{min})_\Omega$
$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{moy})_\Omega$	$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{max})_\Omega$	$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{min})_\Omega$
$MIN_t(I1_{moy})_\Omega$	$MIN_t(I1_{max})_\Omega$	$MIN_t(I1_{min})_\Omega$
$MIN_t(J2_{moy})_\Omega$	$MIN_t(J2_{max})_\Omega$	$MIN_t(J2_{min})_\Omega$
$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{moy})_\Omega$	$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{max})_\Omega$	$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{min})_\Omega$

- 45 descripteurs surfaciques

$MOY_t(I1_{lay1})_\Omega$	$MOY_t(I1_{lay2})_\Omega$	$MOY_t(I1_{lay3})_\Omega$	$MOY_t(I1_{lay4})_\Omega$	$MOY_t(I1_{lay5})_\Omega$
$MOY_t(J2_{lay1})_\Omega$	$MOY_t(J2_{lay2})_\Omega$	$MOY_t(J2_{lay3})_\Omega$	$MOY_t(J2_{lay4})_\Omega$	$MOY_t(J2_{lay5})_\Omega$
$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay1})_\Omega$	$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay2})_\Omega$	$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay3})_\Omega$	$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay4})_\Omega$	$MOY_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay5})_\Omega$
$MAX_t(I1_{lay1})_\Omega$	$MAX_t(I1_{lay2})_\Omega$	$MAX_t(I1_{lay3})_\Omega$	$MAX_t(I1_{lay4})_\Omega$	$MAX_t(I1_{lay5})_\Omega$
$MAX_t(J2_{lay1})_\Omega$	$MAX_t(J2_{lay2})_\Omega$	$MAX_t(J2_{lay3})_\Omega$	$MAX_t(J2_{lay4})_\Omega$	$MAX_t(J2_{lay5})_\Omega$
$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay1})_\Omega$	$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay2})_\Omega$	$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay3})_\Omega$	$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay4})_\Omega$	$MAX_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay5})_\Omega$
$MIN_t(I1_{lay1})_\Omega$	$MIN_t(I1_{lay2})_\Omega$	$MIN_t(I1_{lay3})_\Omega$	$MIN_t(I1_{lay4})_\Omega$	$MIN_t(I1_{lay5})_\Omega$
$MIN_t(J2_{lay1})_\Omega$	$MIN_t(J2_{lay2})_\Omega$	$MIN_t(J2_{lay3})_\Omega$	$MIN_t(J2_{lay4})_\Omega$	$MIN_t(J2_{lay5})_\Omega$
$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay1})_\Omega$	$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay2})_\Omega$	$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay3})_\Omega$	$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay4})_\Omega$	$MIN_t(\ \text{grad } J_2\ _{lay5})_\Omega$

## 5.2.3 Descripteurs fatigue

### 5.2.3.1 Caractéristiques à décrire

L'utilisation d'un critère de fatigue permet de statuer en principe sur la tenue en fatigue d'une région particulière  $\Omega$ . Le critère se présente généralement sous la forme d'une fonction de fatigue  $\mathcal{F}$  de certaines composantes du cycle des contraintes dont il évalue la sévérité, des limites d'endurance du matériau, et voire de certaines de ses propriétés statiques. La caractéristique retenue pour représenter la tenue en fatigue est donc cette fonction de fatigue  $\mathcal{E}$ .

Les approches plus classiques du type stress-life et strain-life ont aussi été utilisées pour évaluer le nombre de cycles à l'initiation dans la région. Cette durée de vie sera retenue comme autre caractéristique à décrire.

Il est important aussi de faire figurer la norme du bloc chargement (soit la déformation plastique cumulée soit l'énergie dissipée). Elle comporte une information supplémentaire pour la prédiction du nombre de blocs à l'initiation.

Nous retenons les 3 caractéristiques fatigue à décrire :

- la fonction de fatigue  $\mathcal{F}^{DV}$  (uniquement calculée pour le critère de DangVan)
- le nombre de cycles à l'initiation ( $N^{S-N}$ , pour l'approche stress-life)

- et la norme du bloc chargement ( $\varepsilon_{pc}$  ou  $W_d$ )

### 5.2.3.2 Description intelligente des caractéristiques fatigue

Toujours pour assurer la fusion des cas, le même type de discrétisation que celle adoptée pour le champ de contrainte est utilisée. Les 3 caractéristiques ( $\mathcal{F}^{DV}$ ,  $N^{S-N}$  et  $\varepsilon_{pc}$  ou  $W_d$ ) sont donc représentées par leur valeur moyenne, maximale et minimale dans la région  $\Omega$ .

9 nouveaux descripteurs sont ainsi introduits :

- 3 descripteurs pour la fonction de fatigue  $\mathcal{F}^{DV}$  :

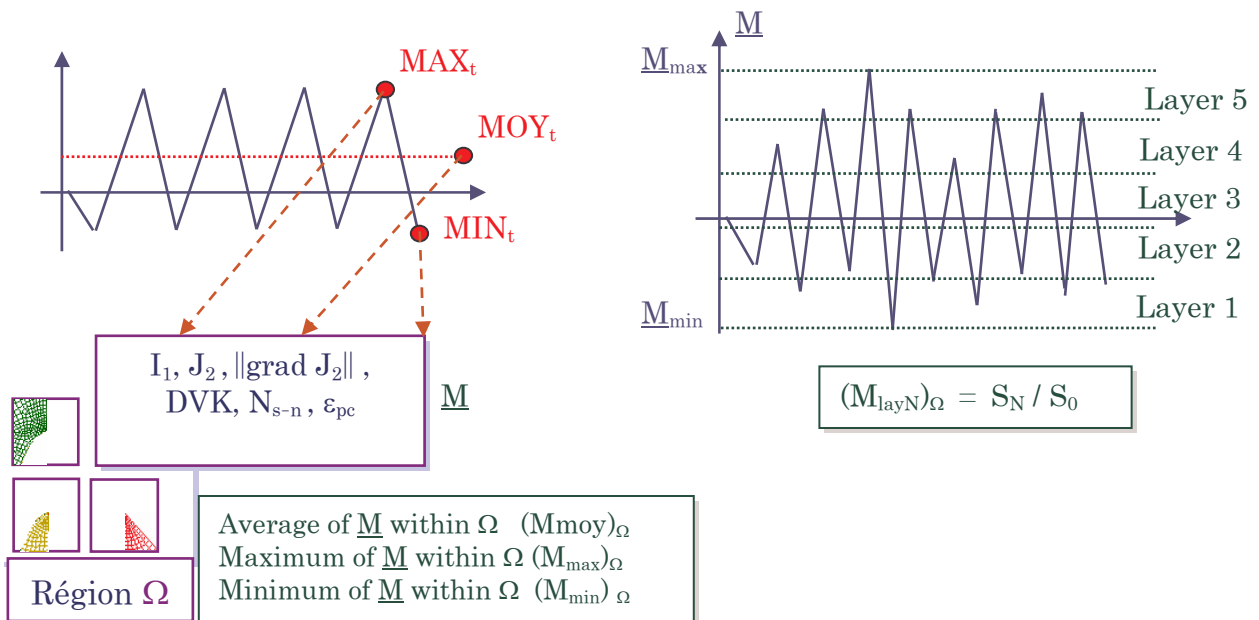
$$\left(\mathcal{F}_{moy}^{DV}\right)_{\Omega}, \left(\mathcal{F}_{min}^{DV}\right)_{\Omega}, \left(\mathcal{F}_{max}^{DV}\right)_{\Omega}$$

- 3 descripteurs pour la durée de vie donnée par l'approche stress-life :

$$\left(N_{moy}^{S-N}\right)_{\Omega}, \left(N_{min}^{S-N}\right)_{\Omega}, \left(N_{max}^{S-N}\right)_{\Omega}$$

- 3 descripteurs pour la norme du bloc de chargement :

$$\left(\varepsilon_{pc_{moy}}\right)_{\Omega}, \left(\varepsilon_{pc_{min}}\right)_{\Omega}, \left(\varepsilon_{pc_{max}}\right)_{\Omega}$$



## *Points essentiels à retenir*

Chaque cas/problème de fatigue est associée à une géométrie particulière de la structure, aux nombreux matériaux en présence, à un état initial, et à un bloc de chargement (qui est le plus souvent multiaxial aléatoire). Cette représentation primitive passive doit être transformée en une représentation active intelligente de même forme pour être appliquée à tous nouveaux cas.

Cela se fait en effectuant d'abord, une analyse multi-niveaux :

- i) le premier niveau est celui de la structure. Une analyse élastique est conduite en considérant les nombreux chargements, une schématisation éventuelle en plaques et poutres ainsi qu'un maillage grossier.
- ii) le deuxième niveau est celui d'une sous-structure 3D que l'on aura relevée comme critique. Un maillage plus fin et une modélisation plus correcte des détails soudés et des discontinuités géométriques présents dans ce domaine peuvent être effectués. Le chargement cyclique radial équivalent est alors défini.
- iii) le troisième niveau correspond à celui d'un détail élémentaire 2D qui est une coupe plane du deuxième niveau, avec éventuellement un maillage encore plus fin et une représentation des efforts plus précise.
- iv) enfin, nous considérons sur ce détail 2D, une fenêtre 2D virtuelle mobile. Cette fenêtre joue le rôle d'un filtre. Sa taille est telle que les quantités qui sont utiles deviennent relativement peu sensibles aux erreurs associées à la taille et à la distribution des éléments, et que de plus, le dommage doit concerner un certain volume caractéristique ; *la description du matériau, de certains champs (contrainte, gradient de contrainte, critère de fatigue..), dans cette fenêtre conduit à la description intelligente qui est applicable et unique sur toute structure complexe.*

Dans chaque région (dans la fenêtre mobile et un matériau donné), il est ensuite nécessaire de décrire d'une manière "intelligente":

- i) les caractéristiques du matériau
- ii) le champ de contraintes et son évolution dans la région.
- iii) quelques autres facteurs comme ceux indiqués par les experts en fatigue/rupture ou déduits à partir d'outils spécialisés comme ENDURE de EMRC ou SOLSTICE du LMS-X

Au total, **92 descripteurs intelligents** ont été introduits.

Nous avons atteint notre objectif qui était de trouver une représentation susceptible de faire la fusion de tous les cas/problèmes.

**L'analyse globale de la structure est réduite à une analyse sur une fenêtre 2D avec un chargement cyclique radial caractéristique obtenu grâce à notre règle d'équivalence. Il faut à présent donner les règles qui lient ces descripteurs pour séparer les cas où il y a ou pas initiation, puis dans les cas positifs dire qu'elle est la durée de vie. Cela est l'objet du chapitre suivant.**

# Descripteurs intelligents retenus

## Descripteurs champs de contraintes (72)

$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{max}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{min}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\Pi_{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{max}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{min}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{max}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{min}})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MOY}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{max}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{min}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{max}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\Pi_{\text{min}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{max}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{min}})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MAX}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{max}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{min}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\Pi_{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{max}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{min}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\mathcal{J}^2_{\text{lay}^5})_\Omega$
$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{moy}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{max}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{min}})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^1})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^2})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^3})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^4})_\Omega$	$\text{MIN}_t(\ \text{grad } \mathcal{J}_2\ _{\text{lay}^5})_\Omega$

## Descripteurs fatigue (9)

$$\left( \mathcal{F}_{\text{moy}}^{DV} \right)_\Omega, \left( \mathcal{F}_{\text{min}}^{DV} \right)_\Omega, \left( \mathcal{F}_{\text{max}}^{DV} \right)_\Omega$$

$$\left( N_{\text{moy}}^{S-N} \right)_\Omega, \left( N_{\text{min}}^{S-N} \right)_\Omega, \left( N_{\text{max}}^{S-N} \right)_\Omega$$

$$\left( \varepsilon_{p_{\text{moy}}} \right)_\Omega, \left( \varepsilon_{p_{\text{min}}} \right)_\Omega, \left( \varepsilon_{p_{\text{max}}} \right)_\Omega$$

## Descripteurs matériaux (11)

Module d'Young	$Y_G$
Coefficient de Poisson	$\nu$
Limite élastique en traction macroscopique	$\sigma_y$
Module d'écroutissage en traction macroscopique	$H$
Coefficient d'écroutissage cyclique	$n'$
Coefficient de résistance à la déformation cyclique	$K'$
Contrainte ultime	$\sigma_u$
Limite élastique cyclique	$\sigma'_y$
Coefficient de résistance à la fatigue	$\sigma'_f$
Exposant de Basquin	$b$
Exposant de ductilité en fatigue	$c$