

Calibration des coefficients partiels pour le dimensionnement des structures en fatigue

Nicolas Gayton, Maurice Lemaire

LaMI - IFMA et UBP

Campus de Clermont-Ferrand - Les Cézeaux BP 265 – F-63175 Aubière Cedex

Résumé. 80% des défaillances de pièces mécaniques sont dues à des problèmes de fatigue. L'objectif de cet article est d'exposer une démarche générale de dimensionnement des structures en fatigue en contexte probabiliste. Elle repose sur la méthode de l'équivalent fatigue tout d'abord présentée. La procédure générale de calibration des coefficients partiels est ensuite exposée et appliquée à un exemple par éléments finis en application du critère multiaxial de Dang Van.

1 INTRODUCTION

De plus en plus de concepteurs s'intéressent à l'évaluation de la fiabilité des structures qu'ils conçoivent et dimensionnent. Quelle est la probabilité de défaillance des structures dimensionnées ? Quelle est la marge de sécurité associée ? Comment dimensionner au plus juste sans pénaliser la fiabilité de la structure ? Quelles sont les variables d'intérêt dont les fluctuations ont des conséquences très importantes sur la fiabilité de la structure et au contraire quelles sont celles dont les fluctuations ont peu d'importance ? Beaucoup de questions soulevant le problème de la robustesse de la conception sont aujourd'hui posées. Des éléments de réponse à ces questions peuvent être apportés grâce aux approches probabilistes dont les développements scientifiques en amont pénètrent petit à petit la recherche industrielle dans différents domaines (construction automobile, construction navale, génie civil,...).

Traditionnellement, la justification du dimensionnement s'appuie sur un ensemble de connaissances issues de la science et de l'expérience. Cet ensemble est codifié dans des méthodes et des règles faisant intervenir une définition des variables de conception ; un modèle de connaissance du processus physique et/ou mécanique et en général, des marges estimées entre le besoin et la ressource. Si cet ensemble de connaissances conduit à des solutions très généralement satisfaisantes, il ne permet pas au concepteur de disposer d'une mesure chiffrée de la défaillance et conduit en général à des structures très hétérogènes en terme de fiabilité.

Cet article est basé sur l'application des méthodes probabilistes dans le contexte particulier des structures mécaniques dont la défaillance peut se produire en fatigue (80% des structures mécaniques actuellement en service). Il constitue une première phase de réflexion pour répondre aux questions posées par les industriels. Après avoir rappelé quelques généralités sur les méthodes de calcul de fiabilité et exposé la procédure de calibration des coefficients partiels, ce papier présente la méthode de l'équivalent fatigue [1] mise en oeuvre pour la modélisation d'une séquence de chargement dans le but d'un calcul de fiabilité. L'application de ces méthodes à une structure dont le modèle mécanique est de type éléments finis utilisant le critère de fatigue de Dang Van est ensuite exposée.

2 METHODE DE CALIBRATION DES COEFFICIENTS PARTIELS

2.1 Rappels de fiabilité [2]

Tout calcul de fiabilité des structures nécessite la définition d'un modèle probabiliste. Celui-ci est caractérisé par :

- un vecteur de n variables aléatoires $\{X_1, \dots, X_n\}$, issu du modèle mécanique, dont on a estimé les densités marginales $f_{X_i}(x_i)$ et les corrélations éventuelles, ou mieux, la densité conjointe de probabilité $f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n)$;
- un ou plusieurs scénarios de défaillance. A chaque scénario est associée une fonction de performance $G(x_i)$ résultant du calcul mécanique, dont les valeurs positives constituent les réalisations du succès (non défaillance) alors que les valeurs négatives ou nulles traduisent l'échec (défaillance).

La probabilité de défaillance de la structure est alors définie mathématiquement par :

$$P_f = \int_{G(x_i \leq 0)} f_{X_1, \dots, X_n}(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (1)$$

L'expression théorique de P_f n'est pas d'utilisation aisée et le passage par l'indice de fiabilité β de Hasofer et Lind en permet une approximation. Celui-ci résulte de la solution du problème d'optimisation suivant :

$$\beta = \min \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (2)$$

sous les contraintes $G(x_i) = 0$ et $u_i = T_i(x_j)$ où u_i est l'image de x_j par la transformation iso-probabiliste notée T de manière à ce que u_i suive une loi Gaussienne normée centrée, les variables étant décorrélées. Le point solution du problème défini par l'équation (2) est le point de défaillance le plus probable noté P^* (ou point de conception), ses coordonnées dans l'espace des variables centrées normées décorrélées sont notées u_i^* . Il est obtenu en utilisant des algorithmes spécifiques tels que Rackwitz-Fiessler, Abdo-Rackwitz, ... nécessitant le calcul du gradient de la fonction de performance ou par l'intermédiaire de surfaces de réponse. Le calcul de P_f peut s'effectuer ensuite par une approximation FORM, $P_f \approx \Phi(-\beta)$ où Φ est la fonction de répartition de la gaussienne centrée réduite.

2.2 Calibration des coefficients partiels ([2] chapitre 10, [3])

Une règle de dimensionnement met en jeu des variables X_i ($i=1\dots n$) dont les réalisations sont incertaines et modélisées, pour l'élaboration de la règle de dimensionnement, par des variables aléatoires de densité de probabilité $f_{X_i}(x_i)$, de moyenne m_{X_i} et d'écart type σ_{X_i} , le coefficient de variation c_{X_i} étant le rapport de la moyenne sur l'écart type. Nous nous intéressons à un format de la règle de dimensionnement du type :

$$G(x_i^d) \leq 0 \leftrightarrow G(x_i^k, \gamma_{X_i}) \leq 0 \quad (3)$$

où x_i^d est la valeur de calcul de la variable X_i . Elle dépend de la valeur caractéristique x_i^k (seule valeur représentative connue par le concepteur) de la variable X_i et de son coefficient partiel associé γ_{X_i} : $x_i^d = \gamma_{X_i} x_i^k$ si la variable X_i est de type sollicitation et $x_i^d = x_i^k / \gamma_{X_i}$ si la variable X_i est de type résistance, les coefficients partiels γ_{X_i} étant en général supérieurs à 1.

Ce type de format est dit semi-probabiliste et présente l'avantage d'être utilisable par un concepteur qui n'a aucune connaissance en fiabilité des structures. Cette règle est néanmoins élaborée en utilisant des informations supplémentaires sur les variables aléatoires et grâce à des méthodes de fiabilité type FORM. Le concepteur va donc appliquer une règle de dimensionnement élaborée pour une fiabilité cible sans en avoir conscience et sans calcul supplémentaire de sa part.

La procédure de calibration est définie comme étant la phase d'optimisation d'une règle de dimensionnement avec comme variable d'optimisation les coefficients partiels utilisés. Son objectif est la détermination d'un jeu de coefficients partiels γ_{X_i} associé à un ensemble de valeurs caractéristiques et utilisable pour un ensemble de situations de dimensionnement. Les étapes de la calibration sont au nombre de 6. Les deux premières concernent la définition précise du problème. Les étapes 3, 4 et 5 concernent la partie technique de la calibration des coefficients et la dernière étape concerne la validation des coefficients proposés.

Etape 1 : domaine d'application de la règle de dimensionnement.

Cette première étape est très importante puisqu'il s'agit de la définition du domaine d'application de la règle de dimensionnement. Le domaine d'application regroupe le type des structures concernées avec leurs modes de défaillance. Il peut mettre en jeu des variables continues (effort appliqué à la structure, ...) ou discrètes (dimension d'un profilé, épaisseur d'une tôle, ...). La règle de dimensionnement ne doit pas être utilisée en dehors de son domaine d'application. Dans tous les cas, le domaine d'application de la règle doit être exprimé à l'aide des valeurs caractéristiques des variables c'est-à-dire des valeurs connues par le concepteur. Il doit mentionner le modèle probabiliste retenu pour chaque variable ainsi que le format de la règle de dimensionnement.

Etape 2 : choix de l'objectif.

Cette étape définit l'objectif de fiabilité des structures dimensionnées. Un indice de fiabilité cible doit être défini, souvent en comparaison avec des situations connues.

Etape 3 : choix des situations particulières de dimensionnement.

Il s'agit de sélectionner L situations de dimensionnement $j=1,...,L$ choisies dans le domaine d'application de la règle ainsi que leur poids w_j dans le domaine d'application. Ces situations doivent être définies à l'aide des valeurs caractéristiques des variables. Les situations extrêmes pour les variables continues sont en général choisies, la situation centrale pouvant aussi être ajoutée.

Etape 4 : choix de la fonction de pénalité.

Il s'agit de sélectionner une fonction de pénalité notée W qui «pénalise» la déviation de la règle par rapport à son objectif. Cette fonction est évaluée pour chaque situation de dimensionnement choisie en étape 3. Elle dépend des coefficients partiels γ_{X_i} utilisés pour le dimensionnement.

Etape 5 : calibration des coefficients partiels.

Cette phase concerne la détermination des coefficients partiels par minimisation de la somme des pénalités W_j calculées sur les L situations particulières définies en étape 3 :

$$f(\gamma_{X_i}) = \sum_{j=1}^L W_j(\gamma_{X_j}) \quad (4)$$

Les variables d'optimisation sont les coefficients γ_{X_i} . Le résultat est l'obtention des coefficients γ_{X_i} calibrés applicables pour toutes les situations définies en étape 1.

Etape 6 : vérification.

Cette phase concerne la vérification des coefficients partiels calibrés en étape 5. La fonction $f(\gamma_{X_i})$ est calculée à partir de plusieurs situations tirées aléatoirement dans le domaine d'application. La déviation de la règle par rapport à son objectif est alors mesurée sur des situations qui n'ont pas servi à la procédure de calibration.

3 METHODE DE L'EQUIVALENT FATIGUE

L'évaluation de la fiabilité d'une structure sollicitée en fatigue nécessite la prise en compte de la variabilité rencontrée sur le chargement. Les séquences de chargement que voit une structure sont très variables et le calcul de l'endommagement de la structure nécessite en toute rigueur (surtout dans le cas d'un comportement mécanique non linéaire) autant de calculs mécaniques qu'il y a de cycles de chargement. Le calcul d'endommagement d'une structure ainsi sollicitée est alors très coûteux en temps de calcul et il n'est pas envisageable de prendre en compte, de cette manière, la variabilité du chargement dans le calcul de fiabilité.

La référence [1] propose de représenter chaque séquence de chargement, issue d'enquêtes en clientèle par exemple, par un scalaire unique appelé l'équivalent fatigue noté F_{eq} , c'est-à-dire de transformer la séquence quelconque de chargement en une séquence symétrique alternée de 10^n ($n=6$ en général) cycles d'amplitude constante F_{eq} et équivalent à la séquence de départ en terme de dommage engendré sur la structure. L'étude de plusieurs séquences de chargement permet alors de représenter la variabilité des séquences de chargement par une unique variable aléatoire F_{eq} qui peut ensuite être simplement introduite dans un calcul de fiabilité.

3.1 Principe de la méthode

La méthode est basée sur une succession d'étapes.

Filtrage de la séquence (extraction des extremums et comptage Rainflow)

Après avoir échantillonner la séquence des chargements, une procédure d'extraction des extremums est effectuée pour obtenir une séquence composée uniquement de pics et de vallées. Une méthode classique de type Rainflow [4] permet alors d'extraire uniquement les cycles significatifs d'un point de vue de la fatigue. Deux vecteurs sont alors obtenus à l'issue du comptage Rainflow :

- un vecteur M^u des moyennes de la séquence u de chargement : pour le cycle i , sa composante est notée M_i^u ;

- un vecteur A^u des amplitudes de la séquence u de chargement : pour le cycle j , sa composante est notée A_j^u ;

Si l'ensemble des moyennes et des amplitudes est rassemblé en plusieurs classes (p classes pour les moyennes et l classes pour les amplitudes), une matrice de taille $p \times l$ appelée matrice Rainflow constituée des nombres n_{ij} de cycles associés à chaque classe i pour la moyenne et j pour l'amplitude est alors obtenue.

Transformation en cycles à R=-1

La séquence des chargements filtrés est ensuite transformée en une succession de cycles à R=-1. Pour chaque couple (moyenne M_i^u , amplitude A_j^u), une matrice des amplitudes équivalentes A^{uu} est construite grâce, par exemple, à la parabole de Gerber. Ses composantes sont :

$$A_{ij}^{uu} = \frac{A_j^u}{1 - \left(\frac{M_i^u}{KF_{eq}} \right)^2} \quad (5)$$

où K est le rapport entre la charge à rupture et le chargement F_{eq} conduisant à la limite d'endurance à 10^6 cycles.

Courbe SN

A partir des A_{ij}^{uu} amplitudes répétées n_{ij}^u fois, l'endommagement de la structure peut être calculé à partir du nombre de cycles à rupture donné par une courbe SN paramétrique normée par rapport à F_{eq} :

$$N(A', F_{eq}) = 10^6 (F_{eq} / A')^m \quad (6)$$

où m est un paramètre matériau. Une succession de 10^6 cycles d'amplitude F_{eq} conduit à un endommagement de 1. La valeur F_{eq}^u pour la séquence u à utiliser dans le modèle de Gerber (eq. 5) et la courbe SN (eq. 6) de manière à obtenir un endommagement unitaire est donc l'équivalent fatigue.

3.2 Principe de calcul

La durée de vie de la structure sous un chargement de moyenne M_i^u et d'amplitude A_j^u vaut donc :

$$N_{ij} = 10^6 \left(\frac{F_{eq}}{A_{ij}^{uu}} \right)^m = 10^6 \frac{(F_{eq})^m \left(1 - \left(\frac{M_i^u}{KF_{eq}} \right)^2 \right)^m}{(A_j^u)^m} \quad (7)$$

L'endommagement de la structure suite à n_{ij} cycles vaut :

$$D_{ij} = \frac{n_{ij}}{10^6} \frac{(F_{eq})^{-m} \left(1 - \left(\frac{M_i^u}{KF_{eq}} \right)^2 \right)^{-m}}{(A_j^u)^{-m}} \quad (8)$$

L'objectif est donc de trouver F_{eq} tel que la séquence de chargement produise un dommage unitaire, soit :

$$\sum_i \sum_j \frac{n_{ij}}{10^6} \frac{(F_{eq})^{-m} \left(1 - \left(\frac{M_i^u}{KF_{eq}} \right)^2 \right)^{-m}}{(A_j^u)^{-m}} = 1 \quad (9)$$

La résolution de cette équation s'effectue de façon itérative [5] en partant d'une première valeur F_{eq} qu'il faut augmenter ou diminuer afin de trouver une valeur satisfaisant l'équation 9. L'exploitation de l'ensemble des

séquences u issues d'enquêtes permet d'obtenir une distribution empirique de la variable aléatoire d'équivalent fatigue F_{eq} .

3.3 Illustration

Considérons une séquence de chargement constituée de 10^7 cycles formée de 100 séquences élémentaires (pour une meilleure représentation graphique) d'amplitude constante par séquence, aléatoire, indépendante et uniformément répartie entre 0 et 300N. La figure 1 nous montre une représentation graphique de la séquence initiale, des extremums extraits et de la séquence équivalente obtenue. L'exploitation de 100 séquences différentes nous permet de représenter une densité de probabilité empirique de la variable aléatoire F_{eq} (voir figure 2). Celle-ci peut donc être modélisée par une loi de probabilité et injectée dans un calcul de fiabilité où l'évaluation du modèle mécanique n'est effectuée que pour la seule amplitude de chargement F_{eq} .

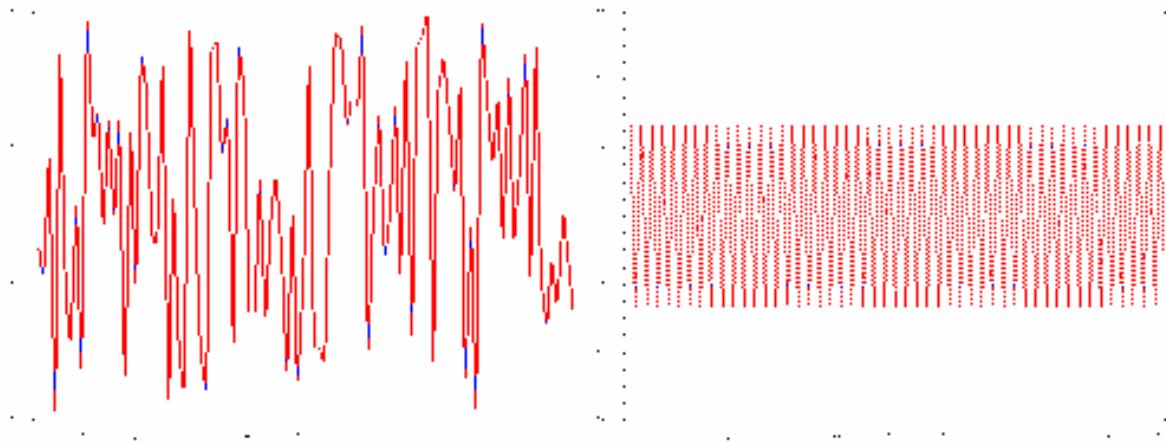


Figure 1. Illustration de la méthode de l'équivalent fatigue (trait continu à gauche : séquence initiale / cercles : extremums / traits pointillés à droite : séquence équivalente d'amplitude F_{eq}).

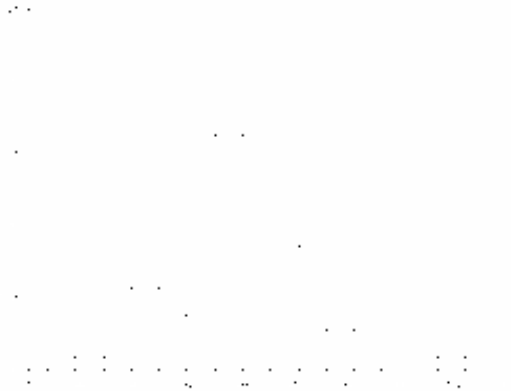


Figure 2. Densité de probabilité empirique de la variable aléatoire F_{eq} .

4 DEFAILLANCE D'UNE CORNIERE SOLLICITEE EN FATIGUE

Une cornière métallique est considérée dans cet exemple. Sa géométrie est paramétrée selon la figure (3). Son dimensionnement en fatigue est étudié. Elle est sollicitée par un effort ponctuel F_{eq} résultant du traitement d'un ensemble de séquences de chargement par la méthode de l'équivalent fatigue. Le critère de Dang Van [6] est considéré pour définir le dimensionnement en fatigue et pour évaluer la fiabilité de la structure :

$$\Gamma = \max_t \frac{\tau_{pr}(t) + aP_H(t)}{b} \quad (10)$$

où $\tau_{pr}(t) = \frac{1}{2} \max\{|S_{1a}(t) - S_{2a}(t)|; |S_{1a}(t) - S_{3a}(t)|; |S_{3a}(t) - S_{2a}(t)|\}$ et $S_{1a}(t)$, $S_{2a}(t)$, $S_{3a}(t)$ sont les valeurs principales du déviateur alterné des contraintes à l'instant t . Les constantes a et b sont des constantes matériaux et s'écrivent :

$$a = 3 \left(\frac{\tau_{-1}}{S_{-1}} - \frac{1}{2} \right); b = \tau_{-1} \quad (11)$$

où τ_{-1} et S_{-1} sont respectivement les limites en fatigue à 10^6 cycles en traction compression et en torsion symétrique alternée.

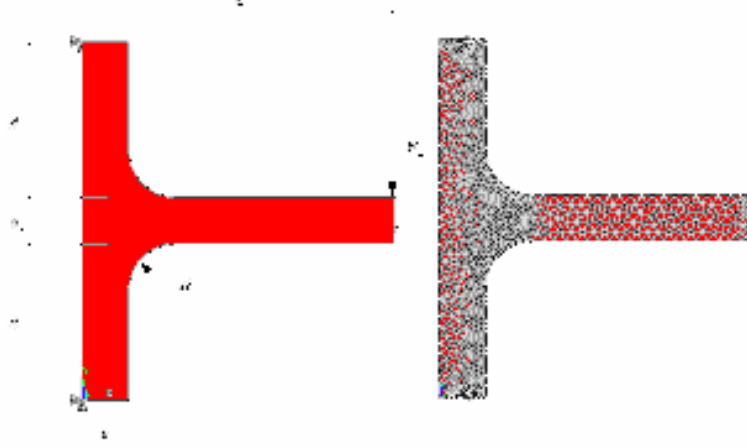


Figure 2. Paramétrage de la cornière (gauche) - Maillage de la cornière (droite).

Le critère de Dang Van Γ résulte d'un calcul éléments finis élastique linéaire (voir le maillage de la structure en figure 2) et dépend des données du problème. La défaillance de la structure est considérée lorsque le critère de Dang Van atteint la valeur 1. La fonction de performance caractérisant la défaillance de cette structure en fatigue s'écrit alors :

$$G = 1 - \Gamma(e_1, e_2, R, L, d, F_{eq}, \tau_{-1}, S_{-1}) \quad (12)$$

Le format de la règle de dimensionnement recherché, dans le cas où toutes les variables e_1 , e_2 , R , L , d , F_{eq} , τ_{-1} , S_{-1} sont considérées aléatoires, est donc le suivant :

$$\Gamma \left(\frac{e_1^k}{\gamma_{e_1}}, \frac{e_2^k}{\gamma_{e_2}}, \frac{R^k}{\gamma_R}, L^k \gamma_L, d^k \gamma_d, F_{eq}^k \gamma_F, \frac{\tau_{-1}^k}{\gamma_\tau}, \frac{S_{-1}^k}{\gamma_S} \right) = 1 \quad (13)$$

les variables e_1 , e_2 , R et les données de résistance à la fatigue τ_{-1} et S_{-1} étant à priori des variables de type résistance alors que L , d et F_{eq} sont de type sollicitation.

Etape 1 : domaine d'application de la règle de dimensionnement

Au titre de cette illustration, les variables e_1 , e_2 , R , L , d , F_{eq} , τ_{-1} , S_{-1} sont modélisées par des v.a gaussiennes dont les valeurs caractéristiques ainsi que les données statistiques sont définies en tableau I.

Tableau I. Définition des variables aléatoires et du domaine d'application (borne inf. et borne sup.) de la valeur caractéristique de chaque variable.

Va. X_i	e_1	e_2	R	L	d	F_{eq}	τ_{-1}	S_{-1}
x_i^k	m_X	m_X	m_X	m_X	m_X	Fract. 95%	Fract. 5%	Fract. 5%
c_{X_i}	-	-	-	-	-	0,3	0,2	0,2
σ_{X_i}	0,0005m	0,0005m	0,0005m	0,002m	0,002m	-	-	-
Borne inf.	0	0,005m	0,002m	0,05m	0,05m	5000N	200MPa	300MPa
Borne sup.	∞	0,02m	0,005m	0,1m	0,05m	20000N	200MPa	300MPa

Les valeurs caractéristiques des variables de type géométrique sont considérées à la valeur médiane de leur distribution alors que pour les variables F_{eq} , τ_{-1} , S_{-1} la valeur fractile à 95% (dans le sens de la sûreté) a été définie comme valeur caractéristique. De plus, les variables géométriques sont considérées évoluer à écart-type constant (toute augmentation de la valeur médiane diminue donc son coefficient de variation) alors que les données F_{eq} , τ_{-1} , S_{-1} sont considérées évoluer à coefficient de variation constant (toute augmentation de la valeur médiane augmente l'écart type). Cette règle de dimensionnement concerne un seul type de matériau défini par $\tau_{-1} = 200\text{MPa}$ et $S_{-1} = 300\text{MPa}$ et une seule hauteur de cornière $d^k = 0,05\text{m}$.

Etape 2 : choix de l'objectif

L'objectif de fiabilité de la règle de dimensionnement est défini par un indice de fiabilité cible $\beta = 3,8$, valeur souvent utilisée pour les ouvrages de génie civil et correspondant à une probabilité de défaillance de 10^{-5} .

Etape 3 : choix des situations particulières de dimensionnement

Toutes les situations extrêmes de dimensionnement sont considérées pour les variables e_2 , R , L , F_{eq} soit $2^4 = 16$ situations. La situation médiane pour ces 4 variables est aussi considérée portant le nombre de situations de dimensionnement pour la calibration à $L = 17$. La variable e_1 n'est pas considérée pour la définition du domaine d'application. En effet, c'est cette variable qui a été choisie comme variable de pilotage pour dimensionner chaque situation selon la règle définie par l'équation (13).

Etape 4 : choix de la fonction de pénalité

La fonction de pénalité choisie est une fonction des moindres carrés :

$$f(\gamma_{X_i}) = \sum_{j=1}^L w_j (\beta_j(\gamma_{X_i}) - \beta)^2 \quad (14)$$

où $\beta_j(\gamma_{X_i})$ est l'indice de fiabilité de la situation j dimensionnée avec le jeu de coefficients partiels γ_{X_i} . Elle « pénalise » autant un jeu de coefficients partiels conduisant à un indice de fiabilité supérieur à l'objectif qu'à un indice de fiabilité inférieure. Ce choix peut être discuté et d'autres fonctions existent [2]. Toutes les situations de dimensionnement sont considérées avoir un poids identique dans la règle de dimensionnement.

Etape 5 : calibration des coefficients partiels

Les résultats de la procédure de calibration sont présentés en tableau II. Certaines valeurs obtenues sont inférieures à 1 traduisant une marge de sécurité trop importante prise en compte dans la définition de la valeur caractéristique par rapport à l'influence de la variable sur la fiabilité de la structure. Ceci se produit significativement pour τ_{-1} qui a une influence très faible dans le calcul de fiabilité (voir tableau III). Pour les variables géométriques, dont les valeurs caractéristiques sont les valeurs médianes, ce phénomène ne se produit pas sauf pour d où la faible influence dans le calcul de fiabilité engendre un coefficient partiel très proche de 1.

Tableau II. Résultat de la procédure de calibration.

Va. X_i	e_1	e_2	R	L	d	F_{eq}	τ_{-1}	S_{-1}
γ_{X_i}	1,19	1,04	1,08	1,00	0,99	0,93	0,75	1,62

Tableau III. Résultat du calcul de fiabilité pour une situation particulière de dimensionnement ($\beta = 3,6$).

Va. X_i	e_1	e_2	R	L	d	F_{eq}	τ_{-1}	S_{-1}
x_i^k	0,035	0,005m	0,002m	0,05m	0,05m	5000N	200MPa	300MPa
u_i^*	-2,26	-1,15	-1,93	0,24	0,00	1,16	0,02	-1,47

Etape 6 : vérification

Les résultats obtenus sur 17 situations aléatoires de dimensionnement sont représentés graphiquement en figure 3. Les résultats sont relativement dispersés par rapport à des applications analytiques [3]. En effet, des problèmes numériques de convergence de l'algorithme de fiabilité peuvent conduire à des oscillations de l'indice de fiabilité.

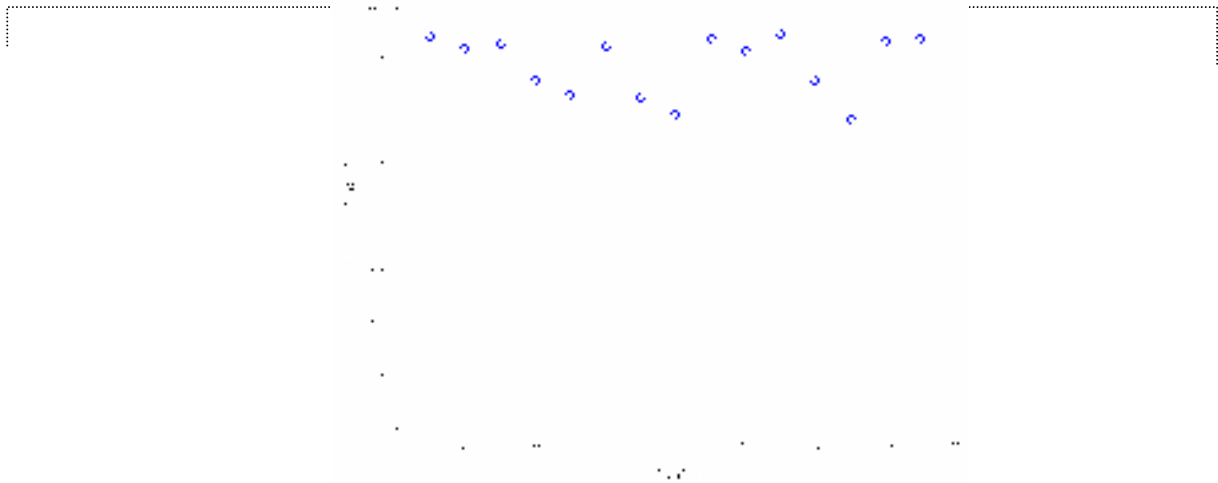


Figure 3. Indices de fiabilité obtenus sur 17 situations aléatoires de dimensionnement (o : indices de fiabilité obtenus, - : objectif de fiabilité).

Pour quantifier l'importance de chaque variable dans le calcul de fiabilité, les résultats du calcul de fiabilité sur la situation où toutes les variables sont au minimum sont présentés dans le tableau III. Comme le laissent présager les coefficients partiels, les variables d et τ_{-1} ont très peu d'influence sur le calcul de fiabilité. Les résultats vérifient le caractère résistance et sollicitation de chacune des variables. La sensibilité du modèle mécanique au rayon de raccordement R conduit à une importance non négligeable de la variable aléatoire R sur les résultats du calcul de fiabilité.

5 CONCLUSION

Le calcul de fiabilité d'une structure sollicitée en fatigue a été mis en place dans le cas d'un modèle mécanique éléments finis. Ce calcul a été intégré à un processus de calibration des coefficients partiels. La méthode de l'équivalent fatigue est nécessaire au traitement de la variabilité du chargement dans un calcul de fiabilité et de calibration des coefficients partiels.

Les voies d'amélioration concernent l'utilisation d'un algorithme d'optimisation topologique pour dimensionner au plus juste chaque situation. La procédure de calibration conduira alors à dimensionner des structures fiables mais aussi optimales.

Remerciements

Cette étude est une contribution s'inscrivant dans le cadre du Grand Projet Innovant du CETIM "Démarche Fiabiliste de conception et de validation en Fatigue pour l'Industrie" dirigé par H.P. Lieurade et A. Bignonnet.

Références

- [1] JJ. Thomas. Fatigue modeling for automotive applications. Society of automotive Engineers, 2002.
- [2] M. Lemaire. Fiabilité des structures – Couplage mécano-fiabiliste statique. Hermes Science, 2005.
- [3] N. Gayton *et al.* Calibration methods for reliability-based design codes. *Structural Safety* (26), 2004, 91-121.
- [4] AFNOR. Fatigue sous sollicitation d'amplitude variable. Normalisation Française, A 03-406, 1993.
- [5] JJ. Thomas *et al.* L'équivalence fatigue : état de l'art. SF2M 18^{ème} journée de printemps dimensionnement en fatigue des structures : démarche et outils, 1999.
- [6] K. Dang Van *et al.* On a new multiaxial fatigue criterion : theory and application, biaxial and multiaxial fatigue. In EGF3, London, Mechanical Engineering Publications, pages 479-496, 1982.