

# Analyse des chargements en service pour le dimensionnement fiabiliste à la fatigue polycyclique

**B. Delattre**

Groupe PSA, Direction Scientifique et Technologies Futures, Route de Gisy – VV1415  
78943 Vélizy Villacoublay Cedex, [benoit.delattre@mpsa.com](mailto:benoit.delattre@mpsa.com)

## Résumé

*Nous abordons deux aspects importants pour le dimensionnement des structures à la fatigue polycyclique en service : d'une part la construction d'un chargement représentatif de l'usage d'une structure en clientèle qui puisse être utilisé numériquement et expérimentalement pour la conception d'une telle structure et d'autre part le rapport entre des essais de caractérisation sur éprouvettes mono-matériaux et essais de validation sur des structures multi-matériaux.*

**Mots clés :** Fatigue polycyclique ; chargement variable ; dimensionnement fiabiliste ; sévérité

## 1. Introduction

L'objectif final d'un constructeur, ici automobile, en matière de dimensionnement à la fatigue en service est de garantir que la structure proposée soit suffisamment résistante à l'usage auquel elle est destinée. La méthode de dimensionnement fiabiliste utilisée par le Groupe PSA [1] vise à définir une probabilité de fiabilité minimale en clientèle. D'autres méthodes existent dans l'industrie automobile, notamment [2], mais elles s'appuient sur les mêmes ingrédients : le prescripteur définit le chargement représentatif de l'usage en clientèle, le concepteur dessine la pièce répondant à ce cahier des charges, le valideur décide de la stratégie expérimentale et / ou numérique qualifiant l'adéquation entre le chargement et la structure et enfin l'intégrateur assemble les différentes pièces ainsi conçues. Améliorer la maîtrise des critères de fatigue correspond à la problématique du concepteur qui utilise un signal donné et un critère connu. La tendance aujourd'hui, notamment au sein du groupe PSA, est d'externaliser cette fonction vers des fournisseurs. Pour les grands groupes industriels, l'accent doit donc être mis sur les deux fonctions qui caractérisent leur cœur de métier : celle de prescripteur qui doit définir le chargement dimensionnant pour une structure inconnue et celle d'intégrateur qui doit garantir que l'ensemble des structures ainsi créées respectent le critère de tenue en service global une fois assemblées.

Nous allons donc nous focaliser sur ces deux aspects. Dans un premier temps, nous allons définir la notion de signal équivalent qui doit permettre de choisir un signal représentatif de l'usage indépendamment de la structure mais aussi du critère de fatigue choisi dans l'idéal, le concepteur pouvant choisir un critère différent de celui du prescripteur a priori. Dans un second temps, nous allons revenir sur la notion d'essai de validation sur structure.

## 2. Signaux équivalents

### 2.1 Type de signaux

Les signaux temporels généralement utilisés pour le dimensionnement en fatigue [3-6] peuvent être classés en plusieurs catégories (Table 1). Aux signaux aléatoires ou stochastiques, on oppose les signaux déterministes. Les premiers sont caractérisés par leurs moments statistiques (moyenne, variance, ...) s'ils sont stationnaires mais leur description temporelle peut changer à chaque réalisation. Ces signaux sont généralement décrits par leur densité spectrale de puissance (DSP) [7-9]. Les signaux déterministes quant à eux sont décrits par leur contenu temporel. Ils peuvent être périodiques (harmoniques s'ils peuvent être décrits par leurs moyenne, amplitude et fréquence ou non s'ils sont décrits par un signal au support temporel plus court {i.e. bloc} répété pour former le signal périodique) ou apériodiques (un signal au support temporel long, non répété). Les signaux déterministes sont souvent caractérisés par les cycles qui les composent [10, 11].

Catégorie	Aléatoire		Déterministe		
	Stationnaire	Instationnaire	Périodique		Apériodique
			Harmonique	Bloc répété	
Description		DSP	1 cycle	1 bloc	Temporelle
Caractéristiques	Moments statistiques	Fluctuantes	Amplitude, moyenne	Cycles, répétitions	Décomposition Rainflow
Exemple	Signal gaussien	Mesure expérimentale répétée	Sinus	Sinus par blocs	Mesure expérimentale unique

**Table 1.** Caractérisation de signaux utilisés en fatigue

L'usage réel des structures étant a priori aléatoire, cette description semble naturelle. Pour pouvoir comparer les structures et les signaux entre eux, les signaux aléatoires instationnaires, pourtant représentatifs d'un usage non régulier, sont exclus car ils ne présentent pas de caractéristiques stables. En suivant [12, 13], nous ne considérons que les sources d'incertitude attribuables aux chargements des structures et non aux structures elles-mêmes. Même dans ces conditions, la prise en compte de ces aléas à travers une description statistique stationnaire du signal nécessite de construire des critères de fatigue adaptés à ce type de signaux [7-9, 12, 13]. Les auteurs cités s'attachent à décrire des phénomènes de fatigue polycyclique classique. Ces chargements par ailleurs sont utilisés aussi pour décrire des phénomènes de fatigue vibratoire, c'est-à-dire où la structure à dimensionner peut présenter des résonances aux fréquences sollicitées [14, 15].

Historiquement, avec Wöhler et ses courbes expérimentales de description de la durée de vie en fatigue à partir de signaux harmoniques [3-5], des signaux déterministes ont d'abord été utilisés. Cependant la prise en compte d'évènements aléatoires a été assez rapidement identifiée comme nécessaire, notamment dans l'industrie aéronautique [16-19]. Une solution très souvent utilisée a été de construire des signaux dits aléatoires mais qui sont en fait des descriptions temporelles uniques (donc déterministes) d'une occurrence mesurée d'un signal aléatoire. Heuler et al. [20] cite ce qu'il appelle des Standardised Load-time History (SLH), 17 signaux européens et 5 américains utilisés dans diverses industries. Pour comprendre les difficultés de transformer des signaux aléatoires en SLH déterministes (séquençage), le lecteur pourra se reporter par exemple à [21, 22].

## 2.2 Sources

Dans le contexte automobile, des signaux de différents types sont utilisés et souvent comparés pour la description de la tenue en service des structures [17, 23, 24] : des sinus, des sinus par blocs, des

SLH et des signaux aléatoires. Les sources expérimentales disponibles pour générer ces signaux sont multiples [1] : des mesures directes en clientèle pour des clients choisis au hasard ou des mesures sur des pistes « internes » jugées représentatives et composées d'obstacles standardisés [2]. Ces deux sources, qui génèrent des signaux aléatoires ou des SLH, supposent d'avoir à disposition une structure à tester. Elles sont donc indisponibles pour la construction d'un cahier des charges a priori. Dans ce cas-là, pour générer des signaux de même type sans avoir la structure, 3 autres sources sont disponibles : les SLH de la littérature (CarLoS : Car Loading Standard sequence [20]), les mesures sur le véhicule de la génération précédente et les enquêtes pour déterminer l'usage du véhicule en clientèle [1]. Ces 3 sources supposent intrinsèquement que pour comparer les véhicules entre eux, les signaux présentent des distributions (temporelles ou statistiques) comparables mais de normes différentes. Cette notion de norme est appelé sévérité [1, 25, 26] et permet de comparer les structures entre elles mais aussi les clients ou chargements, induisant la possibilité de définir des usages « moyens » ou « sévères ». Ici, deux écoles de pensées s'opposent, l'école « allemande » [3] qui utilise des chargements standardisés uniques permettant la comparaison expérimentale des structures avec l'historique et donc sans lien avec le client réel et l'école « française » représentée par exemple par le Groupe PSA [1] qui construit des chargements dits équivalents, harmoniques, qui s'adaptent aux clients. C'est cette notion d'équivalence que nous définissons maintenant.

### 2.3 Équivalence à structure donnée

Pour introduire cette notion, supposons que nous connaissons la structure à dimensionner (ce qui n'est pas le cas). Nous nous plaçons dans la situation du concepteur à qui le prescripteur a défini un signal SLH ou aléatoire comme référence, noté  $\underline{F}$ . Cependant, le concepteur souhaite utiliser un critère de fatigue qui n'est pas compatible avec le type de signal à sa disposition. Par exemple, pour utiliser une courbe de Wöhler, il a besoin d'un signal harmonique. Le problème est alors simple, trouver un signal  $\underline{F}_{eq}$  compatible avec les critères de fatigue souhaités qui génère exactement le même résultat expérimental pour la structure conçue que le signal  $\underline{F}$  fourni au cahier des charges.

Cette équivalence exacte en endurance illimitée devient : si la structure ne présente pas d'endommagement par fatigue après avoir subi expérimentalement le signal  $\underline{F}_{eq}$ , alors elle n'en présentera pas plus après avoir subi le signal  $\underline{F}$ . De même, si la structure présente expérimentalement un endommagement par fatigue non compatible avec sa fonction avant la fin du signal  $\underline{F}_{eq}$  alors elle présentera le même endommagement aussi avant la fin du signal  $\underline{F}$ . Il est important de noter que cette équivalence dite « en dommage » se fait à même phénomène d'endommagement. Un contre-exemple tribologique simple serait un essai de fretting [27, 28]. A fort niveau d'effort mais faible déplacement, le phénomène d'endommagement observé est de la fissuration par fatigue en bord de contact. Au contraire, à faible niveau d'effort et fort déplacement, un phénomène d'usure sous contact est observé.

Cette définition présente deux défauts par construction : d'une part, l'intérêt d'un signal équivalent  $\underline{F}_{eq}$  (généralement plus simple et plus court) que le signal  $\underline{F}$  est de ne justement pas avoir à l'utiliser expérimentalement, d'autre part, numériquement, si le signal  $\underline{F}$  n'est pas compatible avec le critère de fatigue caractérisé, alors il n'est pas possible de l'utiliser pour comparaison avec le signal  $\underline{F}_{eq}$ . Pour régler ce dernier point, les méthodes dites de cumul d'endommagement et de comptage permettent de comparer les réponses de la structure à différents signaux [29].

### 2.4 Équivalence à structure inconnue

Illustrons la démarche sur un cas simple. Prenons une structure déterministe linéaire avec un comportement élastique linéaire. Le rapport  $\underline{\underline{K}}$  entre la contrainte locale  $\underline{\underline{\sigma}}$  et le chargement  $\underline{\underline{F}}$  est alors linéaire. Notre critère de tenue en service nous autorise à faire l'hypothèse que l'évolution de l'endommagement par fatigue a une influence négligeable sur le comportement de la structure. En prenant dès lors un critère de fatigue de la forme générique d'une fonction  $f$  qui associe à un état de contrainte  $\underline{\underline{\sigma}}$  et un ensemble de paramètres matériaux  $p$  dont les isovaleurs  $N$  donnent soit un critère d'endurance ( $N=0$ ) soit une durée de vie limitée, nous avons un critère qui associe le chargement à la tenue en service (Eq. (1)).

$$\left. \begin{array}{l} \underline{\underline{\sigma}}(x,t) = \underline{\underline{K}}(x) \cdot \underline{\underline{F}}(t) \\ f(\underline{\underline{\sigma}}, p) = N \end{array} \right\} \Rightarrow \tilde{f}(\underline{\underline{K}}, \underline{\underline{F}}, p) = N \quad (1)$$

Sous ce formalisme, une structure est représentée par  $\left\{ \underline{\underline{K}}(\underline{\underline{x}}) \right\}$ , l'ensemble des facteurs de localisation, qui peuvent être décrits comme une direction dans l'espace des contraintes et une norme. Le dimensionnement en fatigue d'une structure étant celui de ses maillons faibles, une structure peut être réduite à ses seuls points faibles pour le chargement, à savoir l'ensemble des points de norme maximale  $\underline{\underline{K}}_M$  pour chaque direction de contraintes rencontrées dans la structure.

Ainsi, trouver un signal équivalent à un chargement  $\underline{\underline{F}}$  pour un critère de fatigue  $f$  et une structure inconnue revient à trouver un signal  $\underline{\underline{F}}_{eq}$  générant exactement le même endommagement pour chaque point faible possible, soit pour chaque direction de l'espace des contraintes. En notant la boule unité sur l'espace des structures  $\mathcal{B}_1$ , un équivalent à structure inconnue s'écrit (Eq.(2)):

$$\forall \underline{\underline{K}} \in \mathcal{B}_1, \tilde{f}(\underline{\underline{K}}, \underline{\underline{F}}_{eq}, p) = \tilde{f}(\underline{\underline{K}}, \underline{\underline{F}}, p) \quad (2)$$

Nous verrons comment, en pratique, il est possible de réduire l'espace des possibles  $\mathcal{B}_1$  en exploitant les informations a priori sur les types de structures à concevoir. Par exemple, si cette dernière est exclusivement constituée de tôles d'acier laminées embouties, l'état de contraintes possibles pour la structure doit respecter l'hypothèse des contraintes planes.

Notons ici en aparté que le caractère multiaxial local de la contrainte observée peut être pris en compte dans le choix de la fonction critère  $f$  choisie. A contrario le caractère multientrée du chargement, sous-entendu qu'il se compose de plusieurs voies d'efforts ou de déplacements imposés, est pris en compte dans le caractère vectoriel de la fonction de chargement  $\underline{\underline{F}}$ . Un exemple de construction de signal équivalent à structure inconnue pour un critère multiaxial et un chargement multientrée se trouve dans [30].

### 3. Caractérisation et validation expérimentale

#### 2.1 Caractérisation de la durée de vie en fatigue

La caractérisation de la durée de vie en fatigue, à travers des critères d'endurance illimitée, en temps/longueur/nombre de séquences de chargement ou des lois de cumul d'endommagement, se pratique généralement sur éprouvette mono-matériau et avec des chargements standardisés, par exemple avec une courbe de Wöhler (signal harmonique) ou courbe de Gassner (signal sinus par blocs ou SLH). La validation expérimentale d'une conception, elle, se fait généralement par un essai sur pièce seule potentiellement multi-matériau ou sur une structure assemblée. Dans l'industrie automobile, ces essais de validation sont conduits habituellement avec des chargements de type SLH.

L'hypothèse classique à vérifier pour permettre d'exploiter les propriétés de tenue à la fatigue caractérisées sur éprouvette pour les pièces et structures complexes est que l'état de contraintes locales aux points faibles de la structure soit le même que sur éprouvette et conduit au même endommagement observé. Or le chargement utilisé pour la validation d'une structure est d'une part défini au niveau global et non local et d'autre part, imposé contractuellement au prestataire concepteur avant la conception.

Ainsi, en pratique, nous verrons que le signal utilisé pour la validation doit respecter plusieurs critères supplémentaires : générer des états de contraintes similaires à ceux observés sur éprouvette à tous les points faibles potentiels de chaque pièce de l'assemblage, imposer que la sévérité du chargement soit homogène sur l'ensemble des pièces et/ou matériaux constituant la structure testée et enfin garantir que les endommagements générés dans les différentes pièces et/ou matériaux n'induisent pas de variation dans le chargement local, ailleurs dans la structure.

## **2.2 Effets d'histoire**

Une autre limitation dans l'exploitation directe des propriétés en fatigue caractérisées sur éprouvette pour le dimensionnement de structures est l'effet d'histoire du chargement sur la tenue en fatigue, c'est-à-dire que l'ordre et le niveau des différents cycles constituant un signal influe sur la tenue en fatigue dans certains cas [3, 17, 18, 20]. Il a d'ailleurs été démontré que certains traitements peuvent impacter la courbe de Wöhler d'un matériau différemment de sa courbe de Gassner [17]. Nous discuterons les conséquences de ces effets d'histoire sur la pratique d'utiliser des signaux de caractérisation et de validation différents.

## **2.3 Réduction de signal**

Le dernier point que nous aborderons est en fait la justification de l'ensemble de la démarche. La question à laquelle répond le problème de chercher un ensemble de chargements équivalents pour dimensionner une structure à la tenue en fatigue en service est simplement de disposer de signaux qui s'adaptent à la capacité de l'industriel à les utiliser. En effet, même si nous pouvions disposer de la mesure complète et exacte d'un chargement réel en clientèle, nous ne pourrions pas l'exploiter tel quel ni numériquement sur une structure automobile complète ni expérimentalement même sur éprouvette. Nous avons besoin de signaux relativement simples pour l'exploitation numérique d'une structure complexe (dont le temps de calcul est dû à la taille et la complexité de la structure), de signaux les plus courts possibles pour l'exploitation expérimentale (pour réduire le temps donc le prix des essais) et de signaux équivalents pour un ensemble des pièces et matériaux constitutifs de structures pour réduire le nombre d'essais sur pièce individuelle. Nous discuterons ainsi la démarche fiabiliste qui permet de construire cet ensemble de signaux tout en restant représentatif de l'usage en clientèle.

## **3. Conclusion**

La problématique du choix pertinent du chargement à utiliser pour le dimensionnement de structures à la tenue en service est primordial pour l'avenir de l'industrie. La tendance à recourir à la délégation aux fournisseurs pour la conception de pièces mécaniques impose de maîtriser les signaux caractérisant le cahier des charges et de validation des pièces conçues. Parallèlement, améliorer la représentativité des critères de fatigue sans améliorer celle des chargements utilisés présente un intérêt industriel restreint. Au cours de la présentation, nous présenterons plus de questions que de réponses. L'idée est d'introduire la problématique de la construction raisonnée de l'ensemble des

chargements utilisés en pratique et présenter la notion de signaux équivalents et représentatifs de l'usage en clientèle, pour des structures connues ou inconnues.

## Références

- [1] J. THOMAS, G. PERROUD, A. BIGNONNET, and D. MONNET, *Fatigue Design and Reliability, ESIS PUBLICATION* **23**, 1 (1999).
- [2] N. HÄGELE and C. SONSINO, *Int. J. of Fatigue* **69**, 63 (2014).
- [3] C. BERGER, K.-G. EULITZ, P. HEULER, K.-L. KOTTE, H. NAUNDORF, W. SCHUETZ, C. SONSINO, A. WIMMER, and H. ZENNER, *Int. J. of Fatigue* **24**, 603 (2002).
- [4] J. SCHIJVE, *Int. J. of Fatigue* **25**, 679 (2003).
- [5] W. SCHÜTZ, *Eng. fracture mechanics* **54**, 263 (1996).
- [6] C. F. D. L. SF2M, A. BIGNONNET, R. CHIERAGATTI, B. COLIN, S. COURTIN, M. HUTHER, M.-L. NGUYEN-TAJAN, and F. SZMYTKA, Définition des chargements en fatigue, in *Technique de l'Ingénieur*, Editions T.I., 2016.
- [7] D. BENASCIUTTI and R. TOVO, *Int. J. of Fatigue* **27**, 867 (2005).
- [8] X. PITOISSET and A. PREUMONT, *Int. J. of Fatigue* **22**, 541 (2000).
- [9] A. BANVILLET, T. AGODA, E. MACHA, A. NIESONY, T. PALIN-LUC, and J.-F. VITTORI, *Int. J. of Fatigue* **26**, 349 (2004).
- [10] M. MATSUISHI and T. ENDO, *Japan Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan* **68**, 37 (1968).
- [11] AFNOR A 03-406 : Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable, 1993.
- [12] T. SVENSSON, *Int. J. of Fatigue* **19**, 295 (1997).
- [13] R. TOVO, *Int. J. of Fatigue* **23**, 587 (2001).
- [14] C. LALANNE, *Vibration et chocs mécaniques*, volume 4 : Dommage par fatigue, Hermes Science, 1999.
- [15] B. DELATTRE, Dimensionnement à la fatigue vibratoire dans l'industrie automobile, in *Journées de printemps SF2M, Senlis, France*, 2011.
- [16] H. KAUL, *Jahrbuch 1938 der Deutschen Luftfahrtforschung: Ergänzungsband* (1938).
- [17] C. SONSINO, *Int. J. of Fatigue* **29**, 1080 (2007).
- [18] C. M. SONSINO, *Materials Testing* **52**, 440 (2010).
- [19] A. ALTAMURA and D. STRAUB, *Eng. Fracture Mechanics* **121**, 40 (2014).
- [20] P. HEULER and H. KLÄTSCHKE, *Int. J. of Fatigue* **27**, 974 (2005).
- [21] A. NIESONY, *Mechanical Systems and Signal Processing* **23**, 2712 (2009).
- [22] Y. GAO and Y. M. LOW, *Probabilistic Eng. Mech.* **45**, 102 (2016).
- [23] J. TEDFORD, A. CARSE, and B. CROSSLAND, *Eng. Fracture Mechanics* **5**, 241 (1973).
- [24] T. SVENSSON, D. HANNES, P. JOHANNESSON, M. DAHLBERG, and A. ANDERSON, *Procedia Eng.* **101**, 476 (2015).
- [25] L. XIE, *Int. J. of pressure vessels and piping* **76**, 267 (1999).
- [26] X. HE, F. SUI, Y. DONG, and W. LIU, *Eng. Failure Analysis* **17**, 1509 (2010).
- [27] S. FOUVRY, P. DUÓ, and P. PERRUCHAUT, *Wear* **257**, 916 (2004).
- [28] D. HERISSON, *Méthode de dimensionnement à l'usure de systèmes de transmission*, PhD thesis, Ecole Polytechnique, 2009.
- [29] A. FATEMI and L. YANG, *Int. J. of Fatigue* **20**, 9 (1998).
- [30] G. GENET, *A statistical approach to multi-input equivalent fatigue loads for the durability of automotive structures*, PhD thesis, Chalmers, Goteborg, Sweden, 2006.